



УДК 621.762

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-5-5-12>Научная статья  
Research article

# Структура и магнитные свойства порошка гексаферрита стронция после измельчения в бильной мельнице в магнитоожигенном слое с последующим отжигом

И. Н. Егоров<sup>1</sup>, Н. Я. Егоров<sup>1</sup>, Ю. В. Русалев<sup>1</sup>, С. И. Егорова<sup>2</sup> <sup>1</sup> Южный федеральный университет

Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42

<sup>2</sup> Донской государственный технический университет

Россия, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

 [siyegorova@gmail.com](mailto:siyegorova@gmail.com)

**Аннотация.** В работе рассмотрена эффективность обработки дисперсного материала гексаферрита стронция в бильной мельнице в магнитоожигенном слое, образованном в магнитных полях – неоднородном переменном с частотой 50 Гц, градиентом индукции 90 мТл/м и постоянном с индукцией 15,3 мТл – в условиях, когда измельчение сопровождается агрегацией частиц. Линии магнитной индукции полей взаимно перпендикулярны и параллельны плоскости вращения бил. Методами растровой электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа проведено комплексное исследование особенностей изменения дисперсного состава и структурных характеристик порошка гексаферрита стронция при увеличении продолжительности измельчения. Показано, что при обработке дисперсной системы гексаферрита стронция со средним размером частиц 1558,5 мкм в магнитоожигенном слое в течение 120 мин не происходит изменения фазового состава порошка, измельчение приводит к уменьшению среднего размера частиц порошка до 0,57 мкм, снижению размера областей когерентного рассеяния, увеличению микродеформации решетки фазы  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  и плотности дислокаций. С помощью вибрационного магнитометра при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении изучены магнитные характеристики порошковых образцов до и после отжига. Проведенные исследования позволяют оценить технологический результат обработки дисперсной системы в магнитоожигенном слое с учетом совокупности основных явлений, сопровождающих измельчение.

**Ключевые слова:** порошковая металлургия, гексаферрит стронция, механическое измельчение, рентгеноструктурный анализ, растровая электронная микроскопия, вибрационный магнитометр

**Для цитирования:** Егоров И.Н., Егоров Н.Я., Русалев Ю.В., Егорова С.И. Структура и магнитные свойства порошка гексаферрита стронция после измельчения в бильной мельнице в магнитоожигенном слое с последующим отжигом. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2024;18(5):5–12. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-5-5-12>

# Structure and magnetic properties of strontium hexaferrite powder after milling in a beater mill in a magnetoliquefied layer followed by annealing

I. N. Egorov<sup>1</sup>, N. Ya. Egorov<sup>1</sup>, Yu. V. Rusalev<sup>1</sup>, S. I. Egorova<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Southern Federal University

105/42 Bolshaya Sadovaya Str., Rostov-on-Don 344006, Russia

<sup>2</sup> Don State Technical University

1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russia

 siyegorova@gmail.com

**Abstract.** This study examines the effectiveness of processing dispersed strontium hexaferrite material in a beater mill within a magnetoliquefied layer formed by magnetic fields – an inhomogeneous alternating field with a frequency of 50 Hz and an induction gradient of 90 mT/m, and a constant field with an induction of 15.3 mT – under conditions where milling is accompanied by particle aggregation. The magnetic field lines are mutually perpendicular and parallel to the plane of the milling bodies. A comprehensive investigation of the changes in the dispersed composition and structural characteristics of the strontium hexaferrite powder with increased milling duration was conducted using scanning electron microscopy and X-ray diffraction analysis. The results show that processing the strontium hexaferrite dispersed system with an initial average particle size of 1558.5  $\mu\text{m}$  in a magnetoliquefied layer for 120 min does not alter the phase composition of the powder. However, milling reduces the average particle size to 0.57  $\mu\text{m}$ , decreases the size of the coherent scattering regions, increases the lattice microstrain of the  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  phase, and raises the dislocation density. Magnetic properties of the powder samples before and after annealing were studied using a vibrating sample magnetometer at room temperature and normal atmospheric pressure. The conducted research allows for the assessment of the technological outcomes of processing the dispersed system in a magnetoliquefied layer, considering the collective effects that accompany milling.

**Keywords:** powder metallurgy, strontium hexaferrite, mechanical milling, X-ray diffraction analysis, scanning electron microscopy, vibrating sample magnetometer

**For citation:** Egorov I.N., Egorov N.Ya., Rusalev Yu.V., Egorova S.I. Structure and magnetic properties of strontium hexaferrite powder after milling in a beater mill in a magnetoliquefied layer followed by annealing. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2024;18(5):5–12. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-5-5-12>

## Введение

Гексагональные ферриты находят широкое применение в порошковой металлургии для изготовления спеченных магнитов и магнитопластов [1; 2]. Ферритостронциевые магниты по сравнению с магнитами на основе гексаферрита бария обеспечивают более высокие магнитные свойства [3–6]. На критерий качества магнитных свойств порошка гексаферрита стронция влияют гранулометрический состав и степень однородности размеров частиц дисперсной системы [7; 8].

Одновременно с ростом производства постоянных магнитов увеличивается количество отходов, образованных на различных технологических операциях и подлежащих переработке. Переработка отходов производства магнитов или использованных спеченных магнитов включает этапы измельчения и получения порошка [9; 10]. Наиболее распространенные способы получения тонких и ультратонких порошков ферромагнитных материалов – мокрый и сухой помол [11–14]. Известны также способы повышения эффективности процесса измельчения путем пере-

вода измельчаемого материала в псевдооживленное состояние [15–17].

Основная задача производства порошка гексаферрита стронция – получение дисперсной системы с заданным комплексом физико-технологических и структурных характеристик. Большое значение имеет создание высокопроизводительного оборудования по измельчению ферромагнитных материалов, так как важной экономической составляющей процесса измельчения являются его длительность и удельный расход энергии. На эффективность диспергирования может влиять изменение режимов, в которых проводится измельчение, в частности с воздействием на дисперсный ферромагнитный материал в бильной мельнице переменным неоднородным и постоянным магнитными полями, силовые линии которых взаимно перпендикулярны и параллельны плоскости вращения бил [18]. При электромагнитном воздействии из дисперсного материала образуется магнитооживленный слой, в котором частицы и агрегаты движутся в неоднородном переменном магнитном поле, что обеспечивает принцип многократного возвращения частиц и агрегатов

в область вращающихся бил и значительное увеличение частоты их соударения с билами. При измельчении дисперсных сред в магнитооживленном слое требуется дополнительный расход энергии на питание электромагнитов. С увеличением индукции постоянного и градиента индукции переменного магнитных полей возрастает расход энергии на электропитание. Однако только при повышении индукции постоянного магнитного поля до 15,3 мТл и градиента индукции переменного магнитного поля до 90 мТл/м наблюдается интенсивное движение частиц грубодисперсных ферромагнитных материалов. Процесс сокращения крупности частиц в магнитооживленном слое в бильной мельнице отмечается только при интенсивном движении частиц дисперсной системы. За счет значительного сокращения времени диспергирования в магнитооживленном слое обеспечивается снижение энергозатрат [19].

При обработке дисперсных веществ в любых измельчительных аппаратах получают порошок, имеющий не только определенный гранулометрический состав, но и различного рода структурные дефекты, повышающие реакционную способность частиц. При получении тонкодисперсных порошков гексаферрита стронция в порошковой металлургии предъявляются высокие требования как к дисперсному составу, так и структурным характеристикам дисперсной системы [20]. Поэтому изучение закономерностей измельчения в мельнице необходимо для определения эффективных режимов работы аппарата с точки зрения процесса изменения дисперсного состава и структурных характеристик порошка.

Цель работы заключалась в исследовании влияния механической обработки грубодисперсной системы гексаферрита стронция в бильной мельнице в магнитооживленном слое на гранулометрический состав, структурные характеристики порошка и его магнитные свойства до и после отжига.

Решение поставленных задач осуществлялось с использованием таких методов исследования, как растровая электронная микроскопия, рентгеновская дифрактометрия, магнитные измерения порошковых образцов.

## Экспериментальная часть

Для проведения исследований грубодисперсный материал гексаферрита стронция со средним размером частиц 1558,5 мкм, наиболее вероятным размером 1420 мкм, дисперсией 497 мкм и медианой 1476,9 мкм измельчали в бильной мельнице, билы которой вращались с частотой  $15,0 \pm 1,6$  тыс. об/мин в горизонтальной плоскости. При измельчении в бильной мельнице магнитных материалов происходят два процесса: разрушение частиц за счет взаимо-

действия частиц с билами и агрегирование частиц. С уменьшением размеров частиц измельчаемого дисперсного материала возрастает их склонность к агрегированию и интенсивность измельчения значительно снижается. При обработке дисперсной системы в бильной мельнице в магнитооживленном слое увеличиваются интенсивность движения ферромагнитных элементов и частота их соударения с вращающимися билами. В магнитооживленном слое ферромагнитных дисперсных систем при определенных режимах электромагнитного воздействия происходят процессы разрушения агрегатов [21; 22]. Для образования из дисперсной системы в мельнице магнитооживленного слоя, обеспечивающего режим дефлокуляции ферромагнитных элементов и возвращение порошка в область вращающихся бил, воздействовали магнитными полями: переменным с частотой 50 Гц и градиентом индукции 90 мТл/м, а также постоянным с индукцией 15,3 мТл.

Исследование закономерностей изменения дисперсного состава и структурных характеристик при измельчении исходной дисперсной системы гексаферрита стронция проводили путем анализа проб, отобранных через 10, 30 и 120 мин измельчения.

Гранулометрический состав порошковых проб анализировали с помощью сканирующего электронного микроскопа «Supra 25» (Carl Zeiss, Германия). Структурные характеристики измельчаемого дисперсного материала исследовали методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре XRD-7000 (Shimadzu, Япония) с использованием  $\text{CuK}_\alpha$ -излучения с длиной волны  $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$  и фокусировкой по Брегу–Брентано ( $\theta$ – $2\theta$ ). Учитывая сложный вид дифрактограммы фазы  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ , для обработки дифракционных спектров порошковых образцов применялась компьютерная программа PowderCell, версия 2.3, основанная на методе полнопрофильного уточнения структуры Ритвелда [23; 24]. Для анализа и уточнения структурных характеристик использована база данных ICSD. Рентгеновские измерения проводили при комнатной температуре в режиме пошагового сканирования (шаг  $0,03^\circ$ ) в интервале углов  $2\theta = 5\div 90^\circ$ . Время экспозиции на каждом шаге составляло 8 с. Критерием хорошего согласия структурной модели и реального эксперимента было выбрано значение профильного R<sub>p</sub>-фактора.

Исследования магнитных характеристик порошковых образцов гексаферрита стронция были проведены на вибрационном магнитометре фирмы «LakeShore» (США) при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении. Точность измерения величины магнитного поля составляла 0,1 Э. Измерения петли гистерезиса выполнены в режиме непрерывного измерения «Continuous».

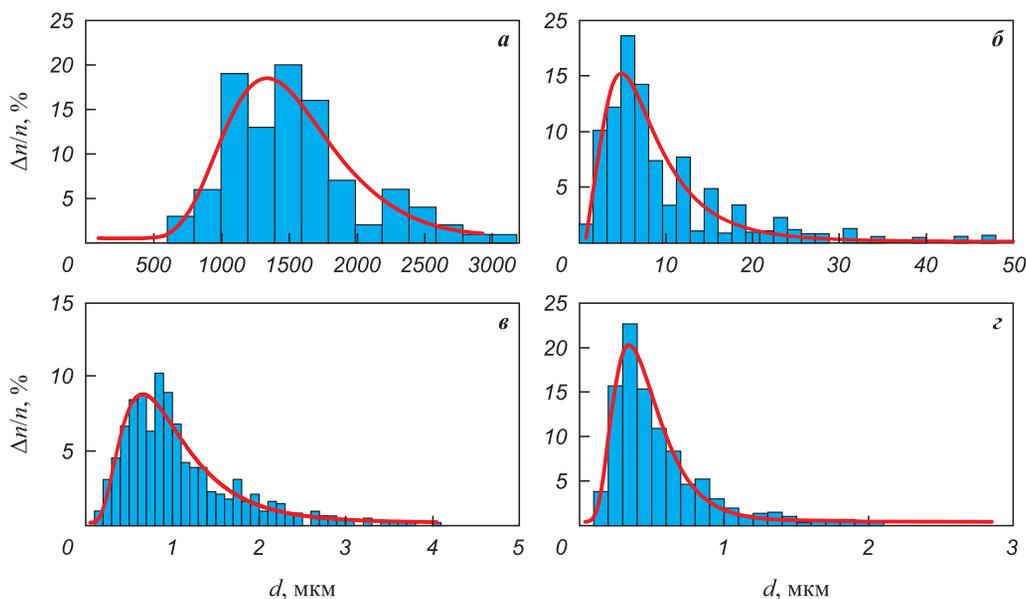


Рис. 1. Гистограммы и функции логарифмически нормального распределения порошка гексаферрита стронция по размерам  
а – исходное состояние; б–г – после измельчения в течение 10 мин (б), 30 мин (в), 120 мин (г)

Fig. 1. Histograms and logarithmic-normal distribution functions of strontium hexaferrite powder particle sizes  
а – initial powder, б–г – after milling for 10 min (б), 30 min (в), 120 min (г)

## Результаты исследований и их обсуждение

Средний размер частиц через 10, 30 и 120 мин обработки дисперсной системы в бильной мельнице составил 12,48; 1,09 и 0,57 мкм. Из полученных экспериментальных результатов следует, что после 10-минутной обработки в мельнице степень измельчения (отношение среднего размера частиц исходной дисперсной системы к среднему размеру частиц измельченного продукта) составила 124,9. В последующие 20 мин степень измельчения сократилась до 11,5, а через 90 мин значительно уменьшилась до 1,9. Скорость уменьшения среднего размера частиц при измельчении в течение 10 мин составила 154,6 мкм/мин, по истечении следующих 20 мин – 0,57 мкм/мин, а при дальнейшем измельчении в течение 90 мин – всего 0,006 мкм/мин.

Таким образом, наиболее интенсивное измельчение дисперсного материала гексаферрита стронция наблюдается в первые 10 мин измельчения. Этот результат согласуется с исследованиями, которые показали, что прочность частиц и работа, необходимая для их разрушения, возрастают с уменьшением размера частиц [25–27].

Из гистограмм и функций логарифмически нормального распределения частиц по размерам порошка гексаферрита стронция, приведенных на рис. 1, видно, что для исходного дисперсного материала (рис. 1, а) наиболее вероятный размер составляет 1337,23 мкм, а ширина максимума функции

на половине высоты – 968,16 мкм. Через 10, 30 и 120 мин измельчения в бильной мельнице в магнитооживленном слое наиболее вероятный размер частиц составил 4,93; 0,67 и 0,34 мкм, а ширина максимума на половине высоты функции распределения частиц по размерам уменьшилась до 7,68; 0,91 и 0,40 мкм (рис. 1, б–г). Морфологические особенности частиц порошка гексаферрита стронция после 120 мин измельчения в магнитооживленном слое представлены на рис. 2. Таким образом, уже через 30 мин измельчения степень однородности дисперсного состава значительно повышается.

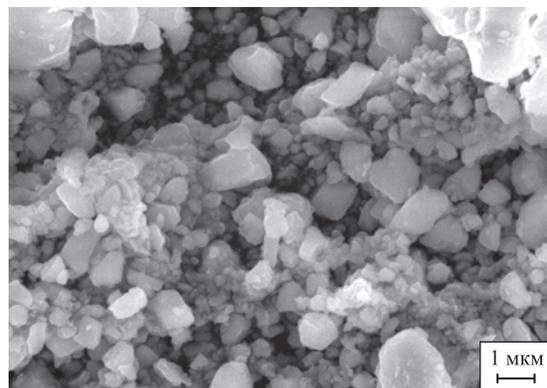
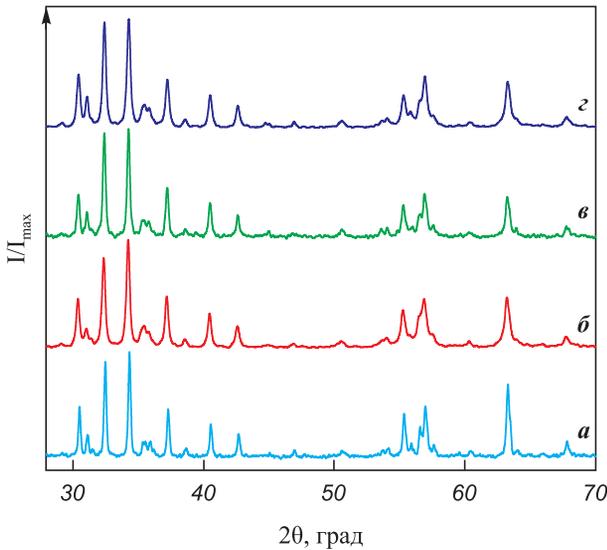


Рис. 2. Морфологические особенности частиц порошка гексаферрита стронция после 120 мин измельчения в магнитооживленном слое

Fig. 2. Morphological features of strontium hexaferrite powder particles after 120 min of milling in a magnetoliquefied layer



**Рис. 3.** Рентгенограммы относительной интенсивности образцов дисперсного материала гексаферрита стронция *а* – исходное состояние; *б–г* – после измельчения в течение 10 мин (*б*), 30 мин (*в*), 120 мин (*г*)

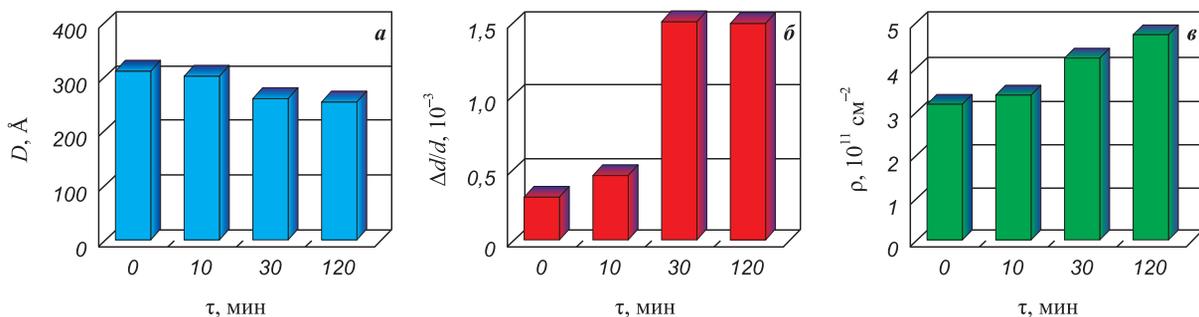
**Fig. 3.** X-ray diffraction patterns of the relative intensity of strontium hexaferrite dispersed material samples *а* – initial powder, *б–г* – after milling for 10 min (*б*), 30 min (*в*), 120 min (*г*)

Таким образом, из полученных экспериментальных результатов следует, что процесс измельчения исходной дисперсной системы гексаферрита стронция в бильной мельнице в магнитоожигенном слое можно разделить на три этапа. На первом этапе длительностью 10 мин наблюдается наиболее интенсивное измельчение. На втором этапе, продолжительность которого составляет 20 мин, происходит менее интенсивное измельчение, но повышается однородность распределения дисперсной системы. На третьем этапе, в течение 90 мин, интенсивность измельчения значительно уменьшается, при этом существенно возрастает однородность дисперсной системы.

Однако измельчение приводит к накоплению дефектов кристаллической структуры, которые снижают магнитные характеристики порошка. Очевидно, что наиболее полную информацию об изменении структурных характеристик измельчаемого материала можно получить, исследуя дифракционные профили рентгенограмм относительной интенсивности (рис. 3) порошковых образцов исходного дисперсного материала и после измельчения в течение  $\tau = 10, 30, 120$  мин. Длительность обработки дисперсного материала в мельнице в магнитоожигенном слое влияет на размеры областей когерентного рассеяния (ОКР), величину дополнительных относительных микродеформаций  $\Delta d/d_{hkl}$  ( $\Delta d$  – среднее по величине изменение межплоскостного расстояния  $d_{hkl}$ , обусловленное наличием дефектов) и плотность дислокаций  $\rho$ .

По данным рентгеноструктурного анализа (рис. 3) измельчение грубодисперсного материала гексаферрита стронция в бильной мельнице в течение  $\tau = 120$  мин в магнитоожигенном слое не приводит к изменению фазового состава.

На рис. 4 представлены гистограммы изменения размеров областей когерентного рассеяния ( $D$ ), микроискажений кристаллической решетки ( $\Delta d/d$ ) и плотности дислокаций ( $\rho$ ) для образцов исходного дисперсного материала гексаферрита стронция и после обработки в мельнице при  $\tau = 10, 30$  и 120 мин. Для исходного дисперсного материала размер ОКР  $D = 309,4 \text{ \AA}$ , значение плотности дислокаций  $\rho = 3,13 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , относительная деформация  $\Delta d/d = 3,49 \cdot 10^{-4}$ . При повышении времени измельчения наблюдается уменьшение размеров кристаллитов, определенных из анализа уширения дифракционных линий, увеличение микродеформации решетки фазы  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  и плотности дислокаций. Однако в процессе обработки дисперсной системы в магнитоожигенном слое интенсивность изменения структурных характеристик порошка изменяется. На первом этапе измельчения ( $\tau = 10$  мин) идет интен-



**Рис. 4.** Изменение размера областей когерентного рассеяния  $D$  (*а*), микроискажений кристаллической решетки  $\Delta d/d$  (*б*), плотности дислокаций  $\rho$  (*в*) для образцов исходного дисперсного материала гексаферрита стронция и после обработки в мельнице с различной длительностью ( $\tau$ )

**Fig. 4.** Changes in the size of coherent scattering regions  $D$  (*а*), lattice microstrains  $\Delta d/d$  (*б*) and dislocation density  $\rho$  (*в*) for samples of the initial dispersed strontium hexaferrite material and after milling with different durations ( $\tau$ )

сивное уменьшение размера частиц, но вклад процессов дефектообразования невелик. Как видно из рис. 4, на этом этапе обработки исходной дисперсной системы гексаферрита стронция изменение микроискажений кристаллической решетки  $\Delta d/d$  увеличилось на  $1,06 \cdot 10^{-4}$ , плотность дислокаций  $\rho$  возросла на  $0,21 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , а размер областей когерентного рассеяния  $D$  уменьшился на  $9,9 \text{ \AA}$ . На втором этапе обработки дисперсной системы в мельнице длительностью 20 мин интенсивность измельчения снижается, а процесс дефектообразования возрастает. На этом этапе изменение микроискажений кристаллической решетки увеличилось на  $\Delta d/d = 7,50 \cdot 10^{-4}$ , плотность дислокаций возросла на  $\rho = 1,15 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , а размер областей когерентного рассеяния уменьшился на  $41,0 \text{ \AA}$ . На третьем этапе измельчения в течение 90 мин значение  $\Delta d/d$  увеличилось на  $1,27 \cdot 10^{-4}$ , величина  $\rho$  возросла на  $0,21 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , а размер  $D$  уменьшился на  $5,96 \text{ \AA}$ .

Из полученных экспериментальных результатов следует, что наиболее интенсивный процесс уменьшения размеров частиц при обработке дисперсной системы в магнитоожигенном слое осуществляется в первые 10 мин: на этом этапе степень измельчения составила 271,2. Наиболее значительный рост микроискажений кристаллической решетки и плотности дислокаций наблюдается в интервале от 10 до 30 мин: на этом этапе средний размер дисперсной системы изменился от 12,48 до 1,09 мкм. При измельчении в интервале от 30 до 120 мин снижается интенсивность процесса измельчения и дефектообразования, но значительно повышается степень однородности дисперсной системы.

После измельчения в течение 120 мин исходной дисперсной системы гексаферрита стронция средний размер частиц составил 0,57 мкм, медиана – 0,46 мкм, значения  $D$ ,  $\Delta d/d$  и  $\rho$  становятся равными  $252,54 \text{ \AA}$ ,  $13,32 \cdot 10^{-4}$  и  $4,70 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  соответственно.

Магнитные свойства объемных образцов, полученных из порошка гексаферрита стронция, обработанного в бильной мельнице в магнитоожигенном слое в течение 120 мин, до и после отжига можно оценить по приведенным на рис. 5 петлям магнитного гистерезиса. Для восстановления кристаллической структуры образца проведен отжиг продолжительностью 3 ч при  $t = 950 \text{ }^\circ\text{C}$ .

По результатам выполненных магнитных исследований образца, изготовленного из порошка, обработанного в бильной мельнице в магнитоожигенном слое в течение 120 мин, намагниченность насыщения составила  $M_s = 60,032 \text{ Гс} \cdot \text{см}^3/\text{г}$ , остаточная намагниченность  $M_r = 29,991 \text{ Гс} \cdot \text{см}^3/\text{г}$ , коэрцитивная сила  $H_c = 1656,6 \text{ Э}$ . В результате отжига магнитные свойства порошка гексаферрита стронция повышаются – намагниченность насыщения, остаточная намагниченность и коэрцитивная сила образца возросли на 8,7; 43,7 и 64,3 % соответственно.

## Заключение

Проведенные экспериментальные исследования позволяют проследить при измельчении в магнитоожигенном слое особенности изменения гранулометрического состава, размера кристаллитов фаз, микродеформаций их решеток и плотности дислокаций в процессе получения порошка  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ . Установлено, что обработка дисперсной системы грубодисперсного материала гексаферрита стронция в течение 120 мин в бильной мельнице в переменном неоднородном магнитном поле с частотой 50 Гц и градиентом индукции 90 мТл/м и постоянном поле с индукцией 15,3 мТл не изменяет фазовый состав порошка, приводит к значительному уменьшению размера его частиц, снижению размера областей когерентного рассеяния и увеличению микроискажений кристаллической решетки фазы  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  и плотности дислокаций.

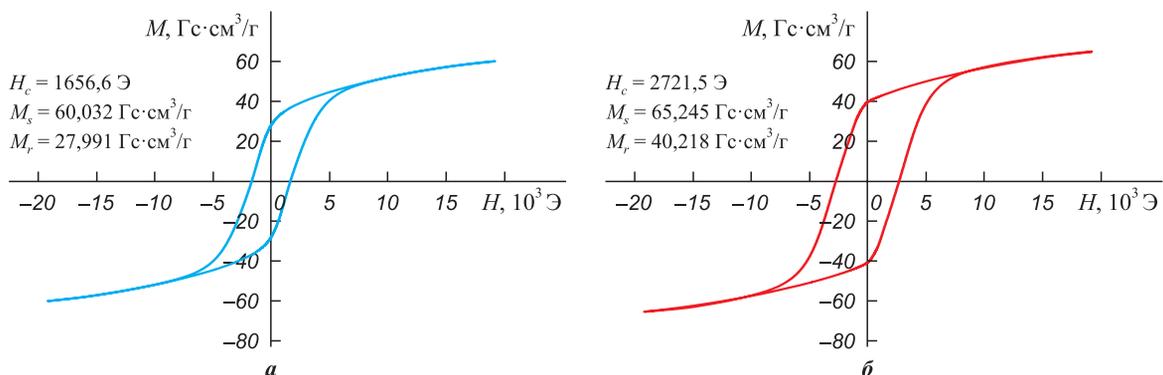


Рис. 5. Магнитные петли гистерезиса объемных образцов порошка гексаферрита стронция после измельчения в магнитоожигенном слое в течение 120 мин до отжига (а) и после отжига (б)

Fig. 5. Hysteresis loops of bulk samples of strontium hexaferrite powder after milling in a magnetoliquefied layer for 120 min (a) before annealing and (b) after annealing

Показано, что при измельчении интенсификация изменений гранулометрического состава и структурных характеристик дисперсной системы обрабатываемого материала значительно уменьшается при достижении среднего размера частиц 1 мкм. При дальнейшем измельчении интенсивность изменения гранулометрического состава обрабатываемого в мельнице материала существенно снижается, при этом значительно повышается однородность дисперсной системы.

По данным исследований, проведенных на вибрационном магнитометре, магнитных характеристик образца, изготовленного из порошка, полученного после обработки в мельнице, определены остаточная намагниченность, намагниченность насыщения и коэрцитивная сила. В результате отжига образца магнитные характеристики увеличиваются.

## Список литературы / References

1. Анциферов В.Н. Проблемы порошкового материаловедения. Ч. IV. Материаловедение поликристаллических ферритов. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 395 с.
2. Pullar R. Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics. *Progress in Materials Science*. 2012;57(7):1191–1334. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.04.001>
3. Канева И.И., Костишин В.Г., Андреев В.Г., Читанов Д.Н., Николаев А.Н., Кислякова Е.И. Получение гексаферрита бария с повышенными изотропными свойствами. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2014;(3):183–188. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2014-3-183-188>  
Kaneva I.I., Kostishin V.G., Andreev V.G., Chitanov D.N., Nikolaev A.N., Kislyakova E.I. Obtaining barium hexaferrite brand 7B1215 with isotropic properties. *Materials of Electronics Engineering*. 2014;(3):183–188. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2014-3-183-188>
4. Цзэ У, Башкиров Л.А., Слонская С.В., Шевченко С.В., Шамбалев В.Н. Магнитные свойства постоянных магнитов на основе феррита стронция М-типа с замещением ионов  $\text{Sr}^{2+}$  ионами  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Gd}^{3+}$  и ионов  $\text{Fe}^{3+}$  ионами  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ . *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук*. 2015;(3):11–16.  
Ze Wu, Bashkirov L.A., Slonskaya S.V., Shauchenka S.V., Shambalyov V.N. Magnetic properties of permanent magnets based on M-type strontium ferrite with  $\text{Sr}^{2+}$  substituted by  $\text{Sm}^{3+}$  and  $\text{Gd}^{3+}$  and  $\text{Fe}^{3+}$  substituted by  $\text{Zn}^{2+}$  and  $\text{Co}^{2+}$ . *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*. 2015;(3):11–16 (In Russ.).
5. Kikuchi T., Nakamura T., Yamasaki T., Nakanishi M., Fujii T., Takada J., Ikeda Y. Magnetic properties of La–Co substituted M-type strontium hexaferrites prepared by polymerizable complex method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2010;322(16):2381. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.02.041>
6. Huang X., Zhang J., Wang L., Zhang Q. Simple and reproducible preparation of barium hexagonal ferrite by adsorbent combustion method. *Journal of Alloys and Compounds*. 2012;540(5):137–140. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.05.015>
7. Ketov S.V., Yagodkin Yu.D., Lebed A.L., Chernopyatova Yu.V., Khlopkov K. Structure and magnetic properties of nanocrystalline  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  alloy produced by high-energy ball milling and annealing. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2006;300(1):e479–e481. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2005.10.199>
8. Ketov S.V., Yagodkin Yu.D., Menushenkov V.P. Structure and magnetic properties of strontium ferrite anisotropic powder with nanocrystalline structure. *Journal of Alloys and Compounds*. 2011;509(3):1065–1068. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.09.184>
9. Bollero A., Rial J., Villanueva M., Golasinski K.M., Seoane A., Almunia J., Altimira R. Recycling of strontium ferrite waste in a permanent magnet manufacturing plant. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2017;5(4):3243–3249. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b03053>
10. Liu B., Zhang S., Steenari B.M., Ekberg K. Synthesis and properties of  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  obtained by solid waste recycling of oily cold rolling mill sludge. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2019;26:642–648. <https://doi.org/10.1007/s12613-019-1772-2>
11. Летюк Л.М. Технология ферритовых материалов магнитоэлектроники. М.: МИСИС, 2005. 352 с.
12. Goldman A. Modern ferrite technology. 2<sup>nd</sup> ed. Pittsburgh: Springer, 2006. 438 p.
13. Ketov S.V., Lopatina E.A., Bulatov T.A., Yagodkin Yu.D., Menushenkov V.P. Effect of milling in various media and annealing on the structure and magnetic properties of strontium hexaferrite powder. *Solid State Phenomena*. 2012;190:183–187. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.190.183>
14. Stingaciu M., Topole M., McGuinness P., Christensen M. Magnetic properties of ball-milled  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  particles consolidated by Spark-Plasma Sintering. *Scientific Reports*. 2015;5:14112. <https://doi.org/10.1038/srep14112>
15. Valverde J.M. Fluidization of fine powders: Cohesive versus Dynamical Aggregation. Netherlands: Springer, 2013. 136 p.
16. Espin M.J., Valverde J.M., Quintanilla M.A.S., Castellanos A. Stabilization of gas-fluidized beds of magnetic powders by a cross-flow magnetic field. *Journal of Fluid Mechanics*. 2011;680:80–113. <https://doi.org/10.1017/jfm.2011.151>
17. Vandewalle N., Lumay G. Flow properties and heap shape of magnetic powders. *AIP Conference Proceedings*. 2009; 1145:135–138. <https://doi.org/10.1063/1.3179847>
18. Егоров И.Н., Егорова С.И., Вернигоров Ю.М. Способ измельчения магнитных материалов и устройство для его осуществления: Патент 2306180 (РФ). 2007.
19. Егоров И.Н., Егоров Н.Я. Энергозатраты при измельчении в бильной мельнице в магнитоожигенном слое. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016;8(50):44–47. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.50.182>  
Egorov I.N., Egorov N.Ya. Energy consumption of milling in beater mill in magnetoliquefied layer. *International Research Journal*. 2016;8(50):44–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.50.182>

20. Андреев В.Г., Канева И.И., Подгорная С.В., Тихонов А.Н. Исследование влияния длительности измельчения порошков гексаферрита стронция на микроструктуру и свойства магнитов на их основе. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2010;(2):43–47.  
Andreev V.G., Kaneva I.I., Podgornaya S.V., Tikhonov A.N. Investigation of the effect duration of grinding powder of strontium hexaferrite microstructure and properties of the magnets on the basis of their. *Materials of Electronics Engineering*. 2010;(2):43–47. (In Russ.).
21. Егоров И.Н. Исследование электромагнитного воздействия на процессы структурообразования в магнитоожоженном слое ферритовых дисперсных систем. *Вестник ДГТУ. Технические науки*. 2012;3(64):44–50.  
Egorov I.N. Investigation of electromagnetic effect on structuring processes in magnetoliquefied layer of ferrite disperse systems. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2012;3(64):44–50. (In Russ.).
22. Егоров И.Н., Егорова С.И., Kryzhanovsky V.P. Particle size distribution and structural state analysis of mechanically milled strontium hexaferrite. *Materials Science Forum*. 2019;946:293–297.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.293>
23. PowderCell 2.3 – powder pattern calculation from single crystal data and refinement of experimental curves. URL: [http://mil2.chem.ucl.ac.uk/ccp/web-mirrors/powdcell/a\\_v/v\\_1/powder/e\\_cell.html](http://mil2.chem.ucl.ac.uk/ccp/web-mirrors/powdcell/a_v/v_1/powder/e_cell.html) (accessed: 17.09.2023).
24. Rietveld H.M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *Journal of Applied Crystallography*. 1969;2:65–71.  
<https://doi.org/10.1107/S0021889869006558>
25. Middlemiss S. Surface damage effects in single particle comminution. *International Journal of Mineral Processing*. 2007;84(1):207–220.  
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2007.03.001>
26. Blanc N., Mayer-Laigle C., Frank X., Radjai F., Delenne J. Evolution of grinding energy and particle size during dry ball-milling of silica sand. *Powder Technology*. 2020;376:661–667.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.048>
27. Sharapov R. Determination of the ball mills performance, taking into account the particle size of the finished product. *E3S Web of Conferences*. 2021;281:01004.  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128101004>

### Сведения об авторах



### Information about the Authors

**Иван Николаевич Егоров** – к.т.н., доцент, вед. программист Зональной научной библиотеки им. Ю.А. Жданова Южного федерального университета (ЮФУ)  
 **ORCID:** 0000-0001-8352-2311  
 **E-mail:** egorovivan1@gmail.com

**Ivan N. Egorov** – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Lead Programmer at the Regional State Library named after Yu.A. Zhdanov, Southern Federal University (SFU)  
 **ORCID:** 0000-0001-8352-2311  
 **E-mail:** egorovivan1@gmail.com

**Николай Яковлевич Егоров** – к.т.н., доцент кафедры технологии и профессионально-педагогического образования ЮФУ  
 **ORCID:** 0000-0001-6921-1701  
 **E-mail:** nyegorov@sfnu.ru

**Nikolay Ya. Egorov** – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Department of Technology And Professional Pedagogical Education, SFU  
 **ORCID:** 0000-0001-6921-1701  
 **E-mail:** nyegorov@sfnu.ru

**Юрий Владимирович Русалев** – аспирант, мл. науч. сотрудник Международного исследовательского института интеллектуальных материалов ЮФУ  
 **ORCID:** 0000-0002-6507-6298  
 **E-mail:** rusalev@sfnu.ru

**Yury V. Rusalev** – Postgraduate Student, Junior Scientist at the Smart Materials Research Institute, SFU  
 **ORCID:** 0000-0002-6507-6298  
 **E-mail:** rusalev@sfnu.ru

**Светлана Ивановна Егорова** – д.т.н., доцент, профессор кафедры физики Донского государственного технического университета  
 **ORCID:** 0009-0003-6580-638X  
 **E-mail:** siyegorova@gmail.com

**Svetlana I. Egorova** – Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Department of Physics, Don State Technical University  
 **ORCID:** 0009-0003-6580-638X  
 **E-mail:** siyegorova@gmail.com

### Вклад авторов



### Contribution of the Authors

**И. Н. Егоров** – определение цели работы, проведение рентгеноструктурного анализа, подготовка текста статьи.  
**Н. Я. Егоров** – проведение экспериментов по измельчению порошков, участие в обсуждении результатов.  
**Ю. В. Русалев** – исследование магнитных свойств порошков.  
**С. И. Егорова** – участие в обсуждении результатов, написание текста статьи.

**I. N. Egorov** – defined the purpose of the work, conducted X-ray diffraction analysis, wrote the manuscript.  
**N. Ya. Egorov** – conducted experiments on powder milling, participated in the discussion of the results.  
**Yu. V. Rusalev** – investigated the magnetic properties of the powders.  
**S. I. Egorova** – participated in the discussion of the results, wrote the manuscript.

Статья поступила 26.11.2023 г.  
Доработана 24.01.2024 г.  
Принята к публикации 29.01.2024 г.

Received 26.11.2023  
Revised 24.01.2024  
Accepted 29.01.2024