

Received: 19.09.2024

Revised: 15.10.2024

Accepted: 22.11.2024

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.6.008-017

FEATURES OF FABRICATING Fe-Ga-BAKELITE MAGNETOSTRICTIVE COMPOSITES

V. A. Milyutin^a * and N. N. Nikulchenkov^b

*M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620137, Russia*

^a  <https://orcid.org/0000-0002-5808-3959>  milyutin@imp.uran.ru;

^b  <https://orcid.org/0000-0003-1948-7843>  niccuby@gmail.com

*Corresponding author. Email: milyutin@imp.uran.ru

Address for correspondence: ul. S. Kovalevskoy, 18, Ekaterinburg, 620108, Russia
Tel.: +7 (343) 378-3820

Magnetostrictive metal-organic composites are an important class of materials for various electrical engineering applications. Fe-Ga alloy is one of the main materials used as a basis for such composites. Epoxy resin is generally used as the organic matrix. The problem of these composites is the extremely low temperature stability of their properties due to softening of the resin at elevated temperatures. This paper is the first to propose using Bakelite, a widespread organic compound based on phenol-formaldehyde resin, to create composites. Composites based on Fe-Ga powder with the addition of 5 wt% of Bakelite were produced by cold pressing at different pressures. Besides, the effect of powder annealing after milling in a ball mill on the structure and properties of the composites is studied. It is shown that the composite made with the same parameters from the annealed powder has a significantly higher magnetostriction.

Keywords: metal-organic composites, magnetostrictive composites, Fe-Ga alloy, magnetostriction

Acknowledgment

The study was assigned by the Russian Ministry of Science and Higher Education (code Magnet, No. 122021000034-9).

References

1. Elhajjar, R., Law, C.-T., and Pegoretti, A. Magnetostrictive polymer composites: recent advances in materials, structures and properties. *Progress in Materials Science*, 2018, 97, 204–229. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2018.02.005.
2. Dong, X., Qi, M., Guan, X., and Ou, J. Fabrication of Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂/epoxy composites: enhanced uniform magnetostrictive and mechanical properties using a dry process. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2011, 323 (3–4), 351–355. DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.09.040.
3. Duenas, T.A. and Carman, G.P. Large magnetostrictive response of Terfenol-D resin composites (invited). *Journal of Applied Physics*, 2000, 87 (9), 4696–4701. DOI: 10.1063/1.373133.
4. Yang, Z.Z., Li, J., Zhou, Z., Gong, J., Bao, X., and Gao, X. Recent advances in magnetostrictive Tb–Dy–Fe alloys. *Metals*, 2022, 12 (2), 341. DOI: 10.3390/met12020341.
5. Na, S.-M., Park, J.-J., Lee, S., Jeong, S.-Y., and Flatau, A.B. Magnetic and structural anisotropic properties of magnetostrictive Fe–Ga flake particles and their epoxy-bonded composites. *Materials Letters*, 2018, 213, 326–330. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.11.052.

6. Pradhan, G., Celegato, F., Barrera, G., Olivetti, E.S., Coisson, M., Hajduček, J., Arregi, J.A., Čelko, L., Uhlř, V., Rizzi, P., and Tiberto, P. Magnetic properties of FeGa/Kapton for flexible electronics. *Scientific Reports*, 2022, 12 (1), 17503. DOI: 10.1038/s41598-022-21589-3.
7. Zhao, X., Tian, X., Yao, Z., Zhao, L., Wang, R., Yan, J., and Liu, X. Flexible Pr-doped Fe–Ga composite materials: preparation, microstructure, and magnetostrictive properties. *Advanced Engineering Materials*, 2020, 22 (12), 2000080. DOI: 10.1002/adem.202000080.
8. Kiseleva, T.Yu., Zholudev, S.I., Novakova, A.A., Gendler, T.S., Ilyinykh, I.A., Smarzhenskaya, A.I., Anufriev, Yu., and Grigorieva, T.F. Magnetodeformational anisotropy of FeGa/PU hybrid nanocomposite via particle concentration and spatial orientation. *Solid State Phenomena*, 2015, 233–234, 607–610. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.233-234.607.
9. Kiseleva, T., Zholudev, S., Novakova, A., and Grigoryeva, T. The enhanced magnetodeformational effect in Galfenol/polyurethane nanocomposites by the arrangement of particle chains. *Composite Structures*, 2016, 138, 12–16. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.11.030.
10. Lin, J., Yang, Q., Wen, X., Cai, Z.-Q., Pi, P., Zheng, D.-F., Cheng, J., and Yang, Z. Preparation, characterization, and properties of novel bisphenol-A type novolac epoxy-polyurethane polymer with high thermal stability. *High Performance Polymers*, 2011, 23, 394–402.
11. Kim, H.G. and Ryu, J.H. The change of physical properties of epoxy molding compound according to the change of softening point of o-cresol novolac epoxy resin. *Journal of the Korean Chemical Society*, 1996, 40 (1), 81–86.
12. Aryani, L., Bhakti, B.S., Mubarak, A.R., Septiyani, A., Mulyani, R.H., Sudrajat, N., and Dedi, D. The effect of bakelite binders on magnetic properties and hardness values of MQP-type bonded NdFeB magnets. *Metalurgi*, 2023, 38 (2), 49–56. DOI: 10.55981/metalurgi.2023.718.
13. Thepsuwan, U., Intiya, W., Sa-Nguanhammarong, P., Sae-oui, P., Sirisinha, C., and Thaptong, P. Reinforcement of bakelite moulding powder in acrylonitrile butadiene rubber (NBR): in comparison with cashew nut oil modified phenolic resin. *Scientific Review*, 2020, 6 (4), 28–35. DOI: 10.32861/sr.64.28.35. URL: <https://arpgweb.com/journal/journal/10>
14. Mahapatra, P.M., Kumar, S., Mishra, P., and Panda, A.K. Effect of different thermoplastics on the thermal degradation behavior, kinetics, and thermodynamics of discarded bakelite. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 31, 38788–38800. DOI: 10.1007/s11356-023-25953-2.
15. Milyutin, V.A. and Gervasieva, I.V. Application of the instrumented nanoindentation method to evaluating the behavior of the mechanical properties of a Fe–Ga alloy with increasing gallium content. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2018, 6, 90–99. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.090-099. Available at: http://dream-journal.org/issues/2018-6/2018-6_227.html
16. Na, S.M., Suh, S.J., Shin, K.H., Lee, Y.S., and Lim S.H. Magnetostrictive properties of polymer-bonded Fe–Co based alloy composites. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93 (10), 8501–8503. DOI: 10.1063/1.1543869.
17. Dong, X., Ou, J., Guan, X., and Qi, M. Optimal orientation field to manufacture magnetostrictive composites with high magnetostrictive performance. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, 322 (22), 3648–3652. DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.07.015.
18. Dong, X., Qi, M., Guan, X., Li, J., and Ou, J. Magnetostrictive properties of titanate coupling agent treated Terfenol-D composites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, 324 (6), 1205–1208. DOI: 10.1016/j.jmmm.2011.11.010.
19. Mudivarthi, C., Na, S.-M., Schaefer, R., Laver, M., Wuttig, M., and Flatau, A.B. Magnetic domain observations in Fe–Ga alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, 322 (14), 2023–2026. DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.01.027.
20. Mansouri, Y., Cheverikin, V.V., Palacheva, V.V., Koshmin, A.N., Aleshchenko, A.S., Astakhov, V.A., Dementeva, O.Yu., Milyutin, V.A., and Golovin, I.S. Texture and magnetostriction in warm rolled and recrystallized Fe–Ga alloy. *Physics of Metals and Metallography*, 2021, 122 (4), 389–395. DOI: 10.1134/S0031918X21040062.

Подана в журнал: 19.09.2024

УДК 621.763

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.6.008-017

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИТОВ «Fe–Ga – БАКЕЛИТ»

В. А. Милютин^{а,*}, Н. Н. Никульченков^б

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

*Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620137, Россия*

^а  <https://orcid.org/0000-0002-5808-3959>  milyutin@imp.uran.ru;

^б  <https://orcid.org/0000-0003-1948-7843>  niccuby@gmail.com

*Ответственный автор. Электронная почта: milyutin@imp.uran.ru

Адрес для переписки: ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия

Тел.: +7 (343) 378-38-20

Магнитоотрицательные металлоорганические композиты – важный класс материалов для различных электротехнических приложений. Сплав Fe–Ga – один из основных материалов, используемых в основе таких композитов. В качестве органической матрицы обычно используется эпоксидная смола. Проблемой таких композитов является крайне низкая температурная стабильность свойств из-за размягчения смолы при повышенных температурах. В данной работе впервые предложено использовать для создания композитов широко распространенное органическое соединение на основе фенолформальдегидной смолы – бакелит. Методом холодного прессования при различном давлении были изготовлены композиты на основе порошка Fe–Ga с добавлением 5 масс. % бакелита. Кроме того, реализовано исследование по влиянию отжига порошка после размолла в шаровой мельнице на структуру и свойства композитов. Показано, что композит, изготовленный при тех же параметрах из отожженного порошка, обладает существенно более высокой магнитоотрицательностью.

Ключевые слова: металлоорганические композиты, магнитоотрицательные композиты, сплав Fe–Ga, магнитоотрицательность

1. Введение

Магнитоотрицательные металлоорганические композиты – это перспективный класс материалов для применения в различных электротехнических устройствах, таких как преобразователи ультразвука, актуаторы, датчики различного типа и других [1]. С точки зрения структуры эти композиты представляют собой частицы магнитоотрицательного сплава в органической матрице. Такая структура позволяет обеспечить электрическую изоляцию частиц, что, в свою очередь, приводит к снижению потерь на вихревые токи при повышенных частотах. У материалов такого типа имеются и другие преимущества по сравнению с цельнометаллическими магнитоотрицательными сплавами. Среди них можно выделить возможность прямого изготовления изделий заданной формы без необходимости дополнительной механической обработки и потери материала. Кроме того, за счет замещения части магнитоотрицательного сплава органической составляющей такие материалы легче и дешевле. Однако это также приводит к снижению магнитоотрицательности.

Функциональные свойства магнитоотрицательных композитов определяются активной частью (порошок магнитоотрицательного сплава), матрицей и параметрами изготовления. Традиционно, основным магнитоотрицательным сплавом, используемым при создании таких объектов, является сплав Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe₂ [1–3], который обладает гигантской магнитоотрицатель-

ей, вплоть до 2000×10^{-6} [4]. Его применение позволяет достигать высоких значений магнитострикции в композитах, даже при большом содержании органической матрицы (50 % и более) [3]. Однако данный сплав содержит большое количество дорогих редкоземельных элементов, что делает его использование в большинстве магнитострикционных устройств экономически не целесообразным. В качестве его перспективной замены рассматривают сплав Fe–Ga, который хоть и имеет в несколько раз более низкую магнитострикцию насыщения, выигрывает по многим другим параметрам, таким как цена (примерно в 5 раз ниже), более низкие поля насыщения (примерно в 8 раз ниже), лучшие механические свойства (предел прочности выше более чем в 10 раз) и практически в два раза более высокая температура Кюри. Таким образом, данный сплав более предпочтителен для практического использования, чем $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$, в особенности, когда не требуются экстремально высокие значения магнитострикции. По этой причине в последние годы появляется все больше работ, направленных на разработку и исследование магнитострикционных композитов на основе Fe–Ga [5–7]. В качестве органической матрицы чаще всего используется эпоксидная смола [5, 7]. В отдельных случаях также применяют и другие соединения, например полиуретан [8, 9]. Материал матрицы для достижения наилучших свойств композита должен обладать следующими свойствами: оптимальные механические свойства, хорошая адгезия к порошку магнитострикционного сплава, высокая температурная стабильность, высокая диэлектрическая проницаемость и низкая цена. Эпоксидные смолы, как правило, обладают оптимальным сочетанием большинства из этих свойств, в том числе низкой ценой, а также простотой в использовании. Именно поэтому они получили широкое распространение в качестве матрицы для магнитострикционных композитов. Однако их серьезной проблемой является крайне низкая температурная стабильность. Обычно температура их разложения составляет порядка $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ [10], тогда как размягчение возможно уже при температурах от $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [11]. Размягчение матрицы – крайне нежелательное явление в магнитострикционных композитах, поскольку при этом частично теряется ее способность передавать упругую деформацию. Это делает невозможным использование композитов на основе эпоксидных смол в условиях, когда температура эксплуатации превышает комнатную. Для таких применений требуется замена эпоксидной смолы на более термостойкое соединение. В данной работе для этого впервые предлагается использовать вещество на основе фенолформальдегидной смолы, которое известно под коммерческим названием «бакелит» (Bakelite). Отличительными чертами бакелита являются возможность получения из вторсырья [12], высокая температурная стабильность (точка размягчения – около $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [13], температура деградации – вплоть до $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ [14]). Разумеется, температурная стабильность как эпоксидных смол, так и бакелита зависит от особенностей их изготовления и может варьироваться в широких пределах, однако, как правило, бакелит более предпочтителен по этому параметру. Кроме того, он обладает высокой диэлектрической проницаемостью и хорошими механическими свойствами. Все это делает данное соединение потенциально подходящим для замены эпоксидной смолы в магнитострикционных композитах. Целью настоящей работы является отработка технологии изготовления композитов «Fe–Ga – бакелит», исследование их структуры и свойств.

2. Материал и методика

2.1. Изготовление образцов

Слиток Fe–19%Ga цилиндрической формы был получен с помощью электродуговой плавки в атмосфере аргона с последующей разливкой в медную изложницу. Масса слитка составляла 50 г. Для получения порошка слиток был механически размолот сначала с помощью металлической ступки, а затем с помощью шариковой мельницы. В 125- миллиметровый контейнер мельницы Retsch Emax помещались частицы Fe–Ga размером $< 500\text{ }\mu\text{m}$. Для размола использовались шары диаметром 10 мм в количестве, обеспечивающем соотноше-

ние к порошку 20 : 1. Материал контейнера и шаров – нержавеющая сталь. Интенсивность размола составляла 1000 об/мин, длительность – 20 мин. Для изготовления композитов «металл – изолятор» в качестве изолятора был использован порошковый бакелит фирмы QATM. Его помещали в ножевую мельницу с целью получения мелкодисперсного порошка с размером частиц < 10 мкм. Мелкодисперсный порошок бакелита перемешивали с частицами Fe–Ga в массовом соотношении 5 : 95 с помощью резонансного акустического миксера в течение 10 минут. Затем полученную смесь помещали в пресс-форму и подвергали холодному изостатическому прессованию с помощью гидравлического пресса при различном давлении (500, 800, 1000 МПа). Кроме того, для изготовления части композитов использовали порошок Fe–Ga, предварительно отожженный в атмосфере аргона при температуре 400 °С в течение 60 мин с целью снятия остаточных напряжений после размола. Все композитные образцы (вне зависимости от режима изготовления) представляли собой параллелепипед размером $5 \times 20 \times 4$ мм. После их прессования осуществляли отжиг при температуре 165 °С в течение 60 минут. Данный режим рекомендован производителем бакелита для обеспечения его полимеризации и оптимальных свойств.

2.2. Методы исследования

Химический состав слитка контролировали с помощью энергодисперсионной приставки к сканирующему электронному микроскопу Tescan Vega 3. Анализ гранулометрического состава порошка осуществляли с помощью просеивания через лабораторные сита с различными размерами ячеек (100, 200, 300 и 500 мкм). Частицы крупнее 500 мкм удалялись из порошка. Структуру порошка и композитов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 и оптического светового микроскопа Nikon с функцией автофокусировки и 3D-реконструкции изображения. Для анализа доли пор и их среднего размера использовали программу ImageJ. Магнитострикцию слитка и композитов измеряли методом тензодатчиков с помощью прибора P3 Strain Indicator and Recorder в поле электромагнита (до 400 кА/м). Тензодатчики с сопротивлением 350 Ом наклеивали на предварительно подготовленную поверхность образцов. Измерялась величина $\lambda_{//}$ вдоль длинного направления композитов.

3. Результаты и обсуждение

Для реализации эксперимента был выплавлен слиток Fe–19%Ga, в котором контролировался химический состав и магнитострикция. Затем он был измельчен с помощью шаровой мельницы для получения порошка. Проведен гранулометрический анализ и исследована морфология порошка. Затем полученный порошок был использован для изготовления композитов «Fe–Ga – бакелит» при различных параметрах. В композитах исследовали структуру и магнитострикцию.

3.1. Слиток Fe–Ga

Для дальнейшего измельчения был приготовлен слиток Fe–19%Ga, химический состав которого был подтвержден с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Электронная сканирующая микроскопия показывает, что матрица слитка однородная, без включений, отклонение реального содержания Fe и Ga от номинального не превышает 0,5 %. Измерения тензометрическим методом показали, что в литом состоянии слиток имеет величину магнитострикции 53×10^{-6} .

3.2. Порошок Fe–Ga

Гранулометрический анализ (рис. 1 а) показал, что после грубого помола доля порошка размером 300–500 мкм составила 47 %, 200–300 мкм – 22 %, 100–200 мкм – 21 %, < 100 мкм – 10 %. Затем был реализован помол данного порошка в шаровой мельнице, после кото-

рого эти значения изменились следующим образом: 300–500 мкм – 17 %, 200–300 мкм – 16 %, 100–200 мкм – 29 %, < 100 мкм – 39 %. Как видно, порошок хорошо поддается размолу благодаря повышенной хрупкости, которая характерна для сплавов Fe–Ga, содержащих в составе свыше 18 % Ga [15]. Оптическая микроскопия с 3D-реконструкцией показала, что морфология порошка преимущественно хлопьевидная (рис. 1 б).

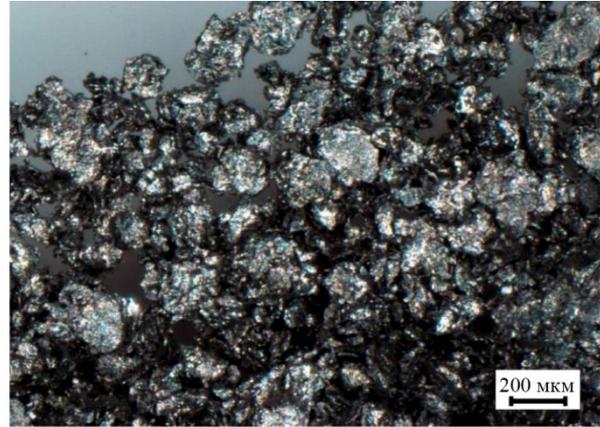
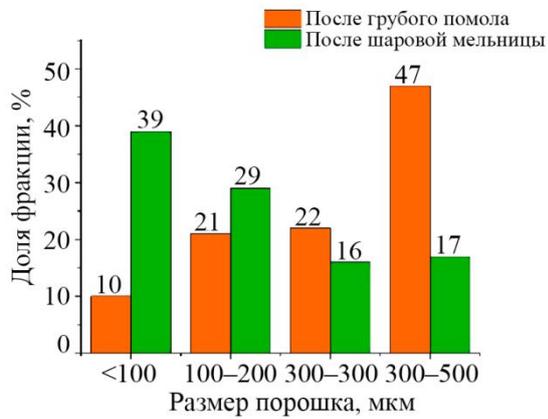


Рис. 1. Гранулометрический анализ порошка Fe–Ga: *а* – гистограмма, *б* – оптическая микроскопия

3.3. Композиты «Fe–Ga – бакелит»

В первую очередь было исследовано влияние давления, прикладываемого при холодном прессовании, на величину магнитоотрицательности композитов. Полевые зависимости магнитоотрицательности, измеренные с шагом 80 кА/м, для композитов, спрессованных при 500, 800 и 1000 МПа, показаны на рис. 2. Видна четкая тенденция к росту магнитоотрицательности композитов при повышении давления прессования, что может быть связано с уменьшением количества пор. Наличие пор в композитах мешает передаче упругой деформации от частиц в матрицу и снижает магнитоотрицательность всего образца. Аналогичный результат был получен ранее на композитах «Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ – эпоксидная смола» [2]. При давлении 1000 МПа магнитоотрицательность значительно выше, чем при двух других. Величины магнитоотрицательности насыщения (при 400 кА/м) составили 13, 17 и 27 × 10⁻⁶ для образцов, спрессованных при 600, 800 и 1000 МПа соответственно.

Необходимо отметить, что такие значения магнитоотрицательности считаются низкими, поэтому требуется разработка способа дальнейшего ее повышения в исследуемых композитах. Существует множество путей повышения магнитоотрицательности в композитах, например изменение содержания связующего вещества [16], приложение магнитного поля при изготовлении композитов в попытке изменения ориентации частиц [17] или химическая обработка частиц с целью повышения адгезии к связующему соединению [18]. В данной работе для этой цели предлагается реализовывать предварительный отжиг порошка перед изготовлением образцов. Целью такого отжига является снятие напряжений, возникших в процессе механического размолва порошка. Это, в свою очередь, может привести к улучшению прессуемости частиц благодаря повышению пластичности за счет разупрочнения. Кроме того, снятие остаточных напряжений может способствовать появлению более благоприятной доменной структуры, которая оказывает влияние на величину магнитоотрицательности. Таким образом, ожидается, что отжиг позволит повысить магнитоотрицательность композитов. Однако проблемой металлоорганических композитов является то, что в них нельзя реализовать отжиг при температурах, достаточных для снятия напряжений, из-за низкой термической стабильности связующего вещества. Поэтому в данной работе предложен подход, при котором отжигу под-

вергается порошок после размола, а не готовый композит. Температура и длительность отжига должны быть такими, чтобы обеспечить снятие напряжений, но при этом не привести к спеканию порошка, поскольку в этом случае снова потребуется размол. По этой причине был выбран режим отжига 60 мин при 400 °С. Степень снятия напряжений контролировали по величине коэрцитивной силы. Для исходного порошка она составила 3,3 кА/м, а после отжига снизилась до 1,4 кА/м. Затем в одинаковых условиях были изготовлены новые композиты при давлении 1000 МПа.

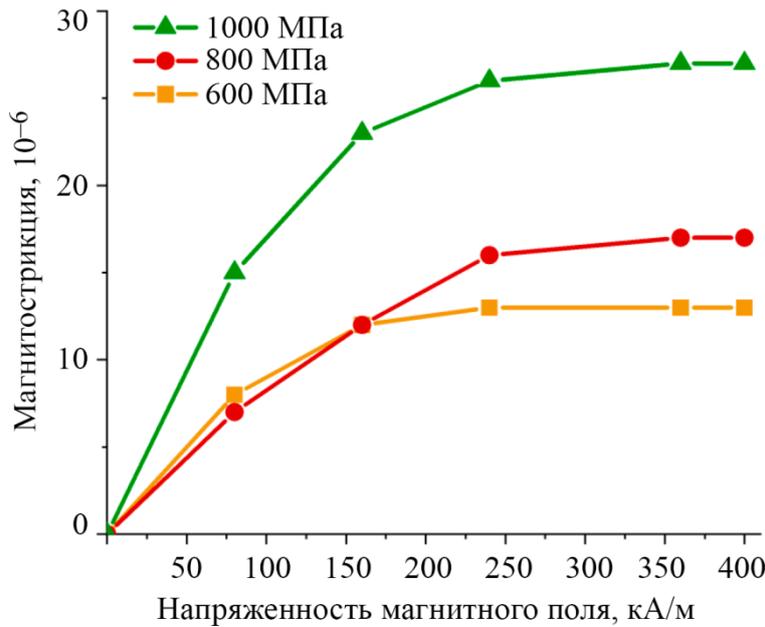


Рис. 2. Полевые зависимости магнитострикции в композитах «Fe–Ga – бакелит», полученных при разном давлении при холодном прессовании: 600, 800 и 1000 МПа

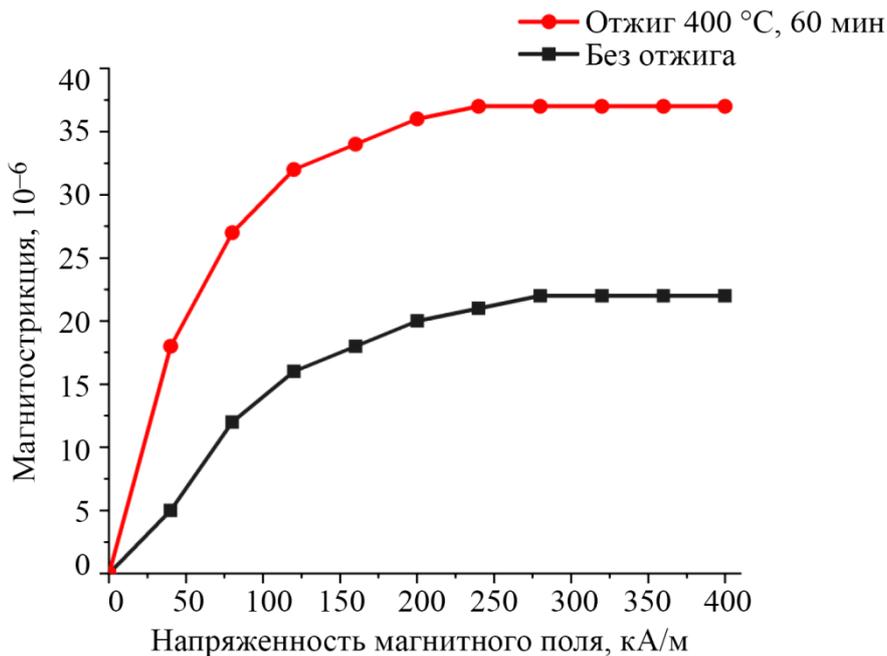


Рис. 3. Полевая зависимость магнитострикции композитов «Fe–Ga – бакелит», изготовленных из отожженного и неотожженного порошков

Результат измерения магнитострикции в этих образцах при увеличении напряженности намагничивающего поля с шагом 40 кА/м показан на рис. 3. Видно, что отжиг порошка значительно повышает магнитострикцию композита как в малых полях, так и при насыщении.

Данный эффект может быть обусловлен двумя факторами: изменением структуры композита при использовании отожженного порошка и изменением внутреннего состояния самого порошка после отжига. Анализ текстуры осуществляли с использованием сканирующего электронного микроскопа при различных увеличениях. Структуры композитов, изготовленных из отожженного и неотожженного порошков Fe–Ga, показаны на рис. 4. Отжиг порошка может приводить к частичному разрушению и повышению его пластичности по сравнению с порошком, сильно деформированным после размолла. Это, в свою очередь, может способствовать улучшению прессуемости порошка и изменению структуры композита, получаемого при холодном прессовании.

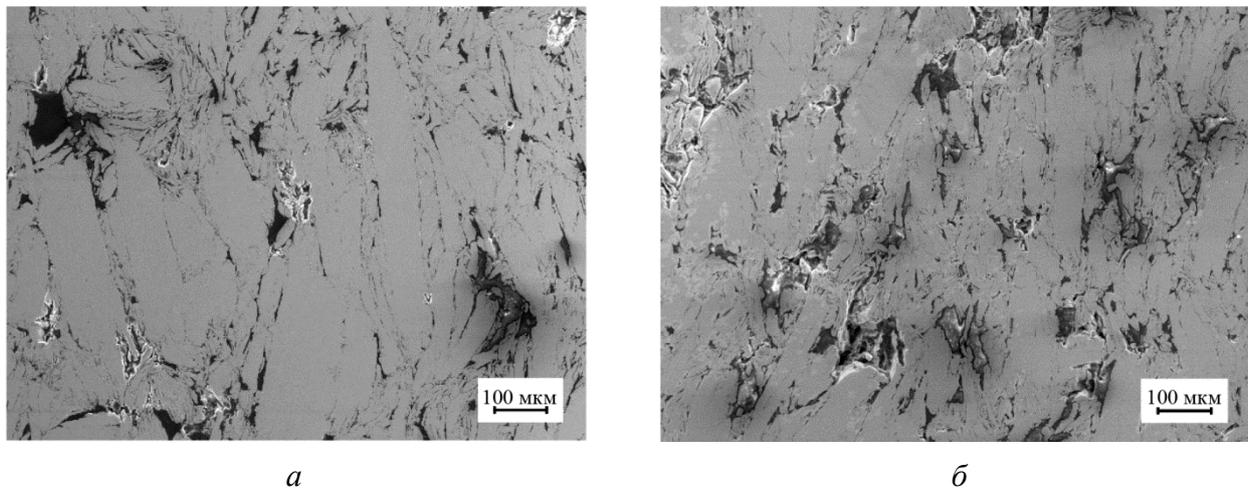


Рис. 4. Структура композитов «Fe–Ga – бакелит»: *а* – без отжига порошка Fe–Ga, *б* – с отжигом 60 мин при 400 °С

Однако на снимках структуры не наблюдается существенных различий. Тем не менее стоит отметить, что простая визуальная оценка структуры не позволяет сделать обоснованный вывод о различиях в двух образцах. Для более детального сравнения с помощью подходов количественной металлографии была рассчитана доля площади, занимаемая порами, и их средний размер в каждом образце. Поры – ключевой объект структуры магнитострикционных композитов, поскольку они оказывают негативное влияние на величину магнитострикции всего композита. Наличие большого количества пор препятствует распространению упругих деформаций по образцу в результате магнитострикционных искажений. Поэтому необходимо тщательно контролировать пористость в таких материалах и стремиться к ее уменьшению. В результате расчета было установлено, что поры занимают 3,3 % площади сечения образца, полученного из неотожженного порошка, и 4,2 % образца, полученного из порошка после отжига. Учитывая, что стандартное отклонение составило 2,1 и 2,4 % соответственно, можно сделать вывод о том, что пористость в образцах одинакова. Отжиг также не оказал влияния на размер пор, средний периметр которых составил 100,2 и 90,5 мкм для композитов с отжигом и без. Стандартное отклонение – 48,7 и 43,7 соответственно. Таким образом, можно сделать вывод, что отжиг при температуре 400 °С в течение 60 минут порошка из сплава Fe–Ga, полученного с помощью размолла в шаровой мельнице, не приводит к существенному изменению пластичности материала и, как следствие, структуры композита, полученного на его основе. Учитывая одинаковую структуру композитов, можно предположить, что причина роста магнитострикции после отжига, вероятно, кроется в изменении до-

менной структуры внутри частиц Fe–Ga. При отжиге происходит частичное снятие остаточных напряжений и аннигиляция дефектов, что может уменьшить количество пиннинг-центров при движении доменных границ и изменить вид доменной структуры. Известно, что в сплаве Fe–Ga механические напряжения приводят к росту анизотропии, вызванной напряжением, и к смене доменной структуры с типичной для кубических магнитомягких материалов, состоящей из 90- и 180-градусных доменов, на лабиринтоподобную [19]. Такая смена негативным образом сказывается на величине магнестрикции в данном материале, поэтому частичное снятие остаточных напряжений позволяет ожидать роста магнестрикции. Аналогичный результат наблюдали, например, в работе [20], где измеряли магнестриксию образцов Fe–Ga после деформации и отжигов по различным режимам.

4. Заключение

В работе впервые изготовлены и исследованы магнестрикционные композиты «Fe–Ga – бакелит». Установлено, что величина магнестрикции композитов растет при увеличении давления, прикладываемого при холодном прессовании. В целом композиты, полученные при использовании порошка непосредственно после размолла в шаровой мельнице, имеют низкую величину магнестрикции. Предварительный отжиг порошка приводит к увеличению магнестрикции композита на 60 %, при этом не влияя на его микроструктуру. Предполагается, что наблюдаемый эффект связан с влиянием отжига на доменную структуру и подвижность доменных границ в частицах Fe–Ga, что благоприятным образом сказывается на величине магнестрикции композитов.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (шифр «Магнит», номер 122021000034-9).

Литература

1. Elhajjar R., Law C.-T., Pegoretti A. Magnetostrictive polymer composites: recent advances in materials, structures and properties // *Progress in Materials Science*. – 2018. – Vol. 97. – P. 204–229. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2018.02.005.
2. Fabrication of Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂/epoxy composites: enhanced uniform magnetostrictive and mechanical properties using a dry process / X. Dong, M. Qi, X. Guan, J. Ou // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2011. – Vol. 323 (3–4). – P. 351–355. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.09.040.
3. Duenas T. A., Carman G. P. Large magnetostrictive response of Terfenol-D resin composites (invited) // *Journal of Applied Physics*. – 2000. – Vol. 87 (9). – P. 4696–4701. – DOI: 10.1063/1.373133.
4. Recent advances in magnetostrictive Tb–Dy–Fe alloys / Z. Yang Z., J. Li, Z. Zhou, J. Gong, X. Bao, X. Gao // *Metals*. – 2022. – Vol. 12 (2). – P. 341. – DOI: 10.3390/met12020341.
5. Magnetic and structural anisotropic properties of magnetostrictive Fe–Ga flake particles and their epoxy-bonded composites / S.-M. Na, J.-J. Park, S. Lee, S.-Y. Jeong, A. B. Flatau // *Materials Letters*. – 2018. – Vol. 213. – P. 326–330. – DOI: 10.1016/j.matlet.2017.11.052.
6. Magnetic properties of FeGa/Kapton for flexible electronics / G. Pradhan, F. Celegato, G. Barrera, E. S. Olivetti, M. Coisson, J. Hajduček, J. A. Arregi, L. Čelko, V. Uhlíř, P. Rizzi, P. Tiberto // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12 (1). – P. 17503. – DOI: 10.1038/s41598-022-21589-3.
7. Flexible Pr-doped Fe–Ga composite materials: preparation, microstructure, and magnetostrictive properties / X. Zhao, X. Tian, Z. Yao, L. Zhao, R. Wang, J. Yan, X. Liu // *Advanced Engineering Materials*. – 2020. – Vol. 22 (12). – P. 2000080. – DOI: 10.1002/adem.202000080.
8. Magnetodeformational anisotropy of FeGa/PU hybrid nanocomposite via particle concentration and spatial orientation / T. Yu. Kiseleva, S. I. Zholudev, A. A. Novakova, T. S. Gendler, I. A. Ilyinych,

- A. I. Smarzhevskaya, Yu. Anufriev, T. F. Grigorieva // *Solid State Phenomena*. – 2015. – Vol. 233–234. – P. 607–610. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.233-234.607.
9. The enhanced magnetodeformational effect in Galfenol/polyurethane nanocomposites by the arrangement of particle chains / T. Kiseleva, S. Zholudev, A. Novakova, T. Grigoryeva // *Composite Structures*. – 2016. – Vol. 138. – P. 12–16. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.11.030.
 10. Preparation, characterization, and properties of novel bisphenol-A type novolac epoxy-polyurethane polymer with high thermal stability / J. Lin, Q. Yang, X. Wen, Z.-Q. Cai, P. Pi, D.-F. Zheng, J. Cheng, Z. Yang // *High Performance Polymers*. – 2011. – Vol. 23 (5). – P. 394–402.
 11. Kim H. G., Ryu J. H. The change of physical properties of epoxy molding compound according to the change of softening point of o-cresol novolac epoxy resin // *J. Korean Chem. Soc.* – 1996. – Vol. 40 (1). – P. 81–86.
 12. The effect of bakelite binders on magnetic properties and hardness values of MQP-type bonded NdFeB magnets / L. Aryani, B. S. Bhakti, A. R. Mubarak, A. Septiyani, R. H. Mulyani, N. Sudrajat, D. Dedi // *Metalurgi*. – 2023. – Vol. 38 (2). – P. 49–56. – DOI: 10.55981/metalurgi.2023.718.
 13. Reinforcement of bakelite moulding powder in acrylonitrile butadiene rubber (NBR): in comparison with cashew nut oil modified phenolic resin / U. Thepsuwan, W. Intiya, P. Sa-Nguanhammarong, P. Sae-oui, C. Sirisinha, P. Thaptong // *Scientific Review*. – 2020. – Vol. 6 (4). – P. 28–35. – DOI: 10.32861/sr.64.28.35.
 14. Effect of different thermoplastics on the thermal degradation behavior, kinetics, and thermodynamics of discarded bakelite / P. M. Mahapatra, S. Kumar, P. Mishra, A. K. Panda // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2023. – Vol. 31. – P. 38788–38800. – DOI: 10.1007/s11356-023-25953-2.
 15. Milyutin V. A., Gervasieva I. V. Application of the instrumented nanoindentation method to evaluating the behavior of the mechanical properties of a Fe–Ga alloy with increasing gallium content // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2018. – Iss. 6. – P. 90–99. – DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.090-099. – URL: http://dream-journal.org/issues/2018-6/2018-6_227.html
 16. Magnetostrictive properties of polymer-bonded Fe–Co based alloy composites / S. M. Na, S. J. Suh, K. H. Shin, Y. S. Lee, S. H. Lim // *Journal of Applied Physics*. – 2003. – Vol. 93 (10). – P. 8501–8503. – DOI: 10.1063/1.1543869.
 17. Optimal orientation field to manufacture magnetostrictive composites with high magnetostrictive performance / X. Dong, J. Ou, X. Guan, M. Qi // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2010. – Vol. 322 (22). – P. 3648–3652. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.07.015.
 18. Magnetostrictive properties of titanate coupling agent treated Terfenol-D composites / X. Dong, M. Qi, X. Guan, J. Li, J. Ou // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2012. – Vol. 324 (6). – P. 1205–1208. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2011.11.010.
 19. Magnetic domain observations in Fe–Ga alloys / C. Mudivarthi, S.-M. Na, R. Schaefer, M. Laver, M. Wuttig, A. B. Flatau // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2010. – Vol. 322 (14). – P. 2023–2026. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.01.027.
 20. Texture and magnetostriction in warm rolled and recrystallized Fe–Ga alloy / Y. Mansouri, V. V. Cheverikin, V. V. Palacheva, A. N. Koshmin, A. S. Aleshchenko, V. A. Astakhov, O. Yu. Dementeva, V. A. Milyutin, I. S. Golovin // *Physics of Metals and Metallography*. – 2021. – Vol. 122 (4). – P. 389–395. – DOI: 10.1134/S0031918X21040062.