

УДК 621.3.04:537.632/.636:53.098:538.955

Изучение влияния слабых импульсов магнитного поля на локальные свойства ленточных аморфных сплавов Fe(Ni, Cu)(SiB)

^{1*} Каминская Т. П., ² Степович М. А., ³ Шипко М. Н.,
³ Тихонов А. И., ¹ Попов В. В.

¹ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, ГСП-1, 119991, Российская Федерация

² Калужский государственный университет им. К. Э. Циолковского
Калуга, 248023, Российская Федерация

³ Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина
Иваново, 153003, Российская Федерация
*ktp53@mail.ru

Получено: 20 мая 2023 г.

Отрецензировано: 31 мая 2023 г.

Принято к публикации: 31 мая 2023 г.

Аннотация: Методами атомной силовой микроскопии и магнитной силовой микроскопии исследовано влияние импульсов слабого магнитного поля на локальные свойства ленточных аморфных сплавов Fe(Ni, Cu)(SiB) толщиной около 100 мкм, шириной 10 мм, длиной 50 мм, которые были получены методом сверхбыстрого охлаждения расплава на вращающемся медном барабане. На поверхности ленты, прилегавшей к медному барабану, практически отсутствовали участки с низкой шероховатостью, что не позволило провести последующие исследования этой стороны ленты методом магнитно-силовой микроскопии. Этим методом исследована другая, свободная поверхность фольги, не прилегавшая к медному барабану и не имевшая существенных шероховатостей. До воздействия импульсов магнитного поля на фольгу магнитный контраст на свободной стороне ленты не наблюдался. После магнитоимпульсной обработки на этой стороне фольги был зарегистрирован магнитный контраст: стали видны полосовые домены шириной 0,6—0,8 мкм, а на дефектах структуры также замыкающие домены, т. н. клиновидные домены Нееля, шириной от 1 мкм до 1,6 мкм. Результаты исследования позволяют говорить, что потери на перемагничивание в большой степени связаны с потерями, обусловленными вихревыми токами, и связаны с шириной доменов, которая зависит от режимов магнитоимпульсной обработки незначительно. Полученные результаты исследований могут быть использованы для уточнения методики снятия напряжений, возникающих в процессе изготовления аморфных лент.

Ключевые слова: атомная силовая микроскопия, магнитно-силовая микроскопия, магнитоимпульсная обработка, полосовые домены, замыкающие домены.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Каминская Т. П., Степович М. А., Шипко М. Н., Тихонов А. И., Попов В. В. Изучение влияния слабых импульсов магнитного поля на локальные свойства ленточных аморфных сплавов Fe(Ni, Cu)(SiB) // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 4. С. 398—409.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Каминская, Т. П. Изучение влияния слабых импульсов магнитного поля на локальные свойства ленточных аморфных сплавов Fe(Ni, Cu)(SiB) / Т. П. Каминская, М. А. Степович, М. Н. Шипко, А. И. Тихонов, В. В. Попов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2023. — Т. 6, № 4. — С. 398—409.

1. Введение

Качество цифровых высокочастотных трансформаторов обеспечивается уровнем электромагнитных свойств ленточных аморфных сплавов, используемых при изготовлении магнитопроводов. Одним из таких сплавов является Fe(Ni, Cu)(SiB). Среди свойств таких сплавов особое место занимают коэрцитивная сила, магнитострикция, магнитные потери, которые лимитируются химическим составом сплава, состоянием поверхности, особенностями ближнего порядка. Использование только традиционных металлургических способов для управления этими свойствами затруднено вследствие высокой степени неопределенности влияния состава аморфного сплава и технологических параметров на магнитостатическую энергию дефектов, реальную магнитную структуру поверхности ленточных образцов [1—3]. Такие факторы оказывают существенное влияние на процессы перемагничивания и, как следствие, на магнитные потери в сердечниках, включающие гистерезисные и более значительные вихревые потери.

Перспективным способом контролируемого изменения вихревых потерь магнитных аморфных сплавов является управление динамикой магнитных доменов, поскольку скорость перемещения доменной стенки при перемагничивании образца связана с электродвижущей силой, возникающей на его локальном участке и ограничивающей вихревые потери. В свою очередь, эта скорость связана с шириной доменов, которая определяется константой анизотропии, намагниченностью насыщения сплава, внутренними напряжениями, вызванными специфическим состоянием поверхности фольг [4—7].

Снижения напряжений, определяющих параметры доменной структуры, возможны не только в результате воздействия лазерного излучения, электронов, ионов — модификация напряженного состояния поверхности

сплава возможна и в результате магнитоимпульсного воздействия [8—12]. Воздействие импульсов слабых магнитных полей на сплавы обеспечивает проявление магнитопластического эффекта, снижение их склонности к хрупкому разрушению. Изучение влияния слабых импульсов магнитного поля на локальные свойства ленточных аморфных сплавов Fe(Ni, Cu)(SiB) и составляет предмет рассмотрения настоящей работы.

2. Материалы и методы

Образцы ленточных аморфных сплавов Fe(Ni, Cu)(SiB) представляли собой ленту (фольгу) толщиной около 100 мкм, шириной 10 мм, длиной 50 мм, которые были получены методом сверхбыстрого охлаждения расплава на вращающемся медном барабане. Для их магнитоимпульсной обработки (МИО) использовали импульсы магнитного поля амплитудой $(5—8) \cdot 10^3 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ и длительностью (0,1—0,5) с. Количество импульсов составляло 10—50, интервал между импульсами — (1—2) с.

Локальные магнитные свойства фольги исследовались методами атомной силовой микроскопии (АСМ) и магнитно-силовой микроскопии (МСМ) по стандартной двухпроходной методике [13, 14] с использованием сканирующего зондового микроскопа *SMENA-A*, платформа «*Solver*» (*NT-MDT*, РФ, г. Зеленоград, Москва). Для МСМ исследований предварительно в растровом электронном микроскопе выбирались участки фольги с низкой шероховатостью [15].

3. Результаты исследований и их обсуждение

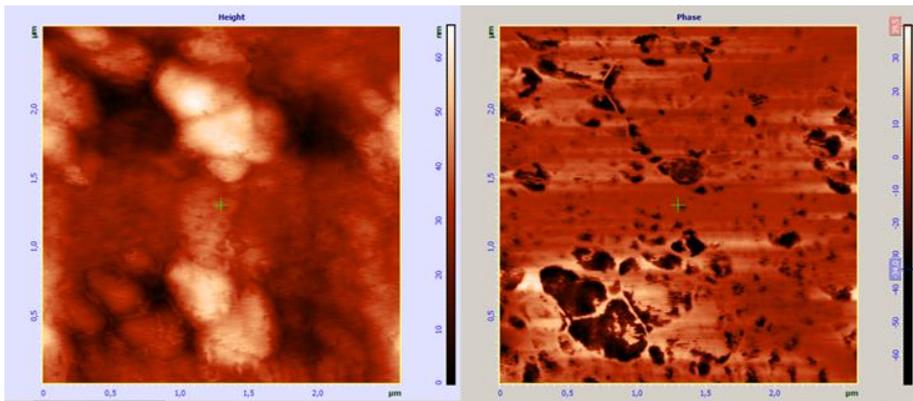
Ранее [15] исследования структуры поверхности фольги в растровом электронном микроскопе показали, что на поверхности ленты, прилегавшей к медному барабану, практически отсутствовали участки с низкой шероховатостью, что не позволило провести последующие МСМ-исследования этой стороны ленты. Методом МСМ исследована другая, свободная поверхность фольги, не прилегавшая к медному барабану и не имевшая шероховатостей, препятствующих МСМ-исследованиям.

Для предварительной оценки профиля рельефа поверхности в нанометровом масштабе проводилось изучение различных участков фольги методом АСМ. В качестве примера на рис. 1 показан участок фольги, полученный при АСМ исследованиях свободной поверхности ленты, не прилегавшей к медному барабану. На рис. 1а показан профиль высот, характеризующий неровности этого участка, а на рис. 1б и 1в — изображение этого участка поверхности в режиме латеральных сил (1б) и в

режиме фазового контраста (1в); профиль высот получен при однострочном сканировании по прямой в средней области участка (для изображений рис. 1б и рис.1в — по горизонтали). Для этого участка фольги перепад высот не превышает 26 нм на расстоянии 2,5 мкм.



а



б

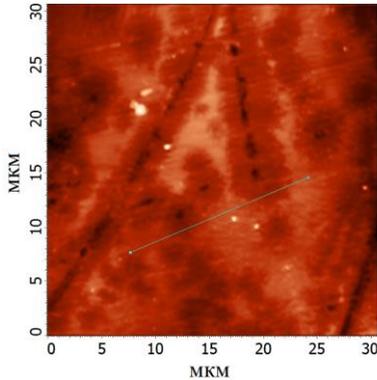
в

Рис. 1. а — профиль сечения фольги, иллюстрирующий характер неровностей в средней части выбранной области; б — изображение участка фольги, полученное в АСМ, иллюстрирующий характер неровностей поверхности фольги размером 2,5×2,5 мкм; в — изображение того же участка фольги в режиме фазового контраста АСМ.

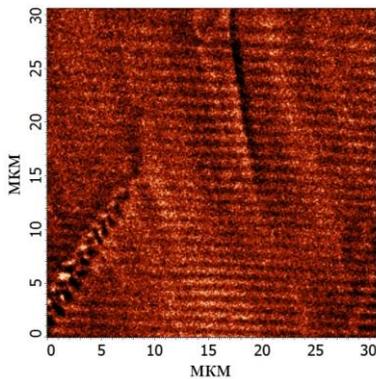
Fig. 1. а – profile of the foil section, illustrating the nature of irregularities in the middle part of the selected area; б – image of a foil section obtained in AFM, illustrating the nature of the irregularities of the foil surface with a size of 2.5×2.5 µm; в – image of the same section of the foil in the AFM phase contrast mode

Участок фольги с увеличением на порядок меньшим, чем на рис. 1, показан на рис. 2а и рис. 2в. На рис. 2а также показан отрезок прямой, вдоль которого профиль шероховатости имел перепад высот не более 25 нм на расстоянии примерно 20 мкм — см. рис. 2б. Уточненные данные изучения различных участков фольги показали, что перепад высот на свободной стороне аморфной ленты обычно не превышает 25—30 нм на расстояниях примерно 20—30 мкм.

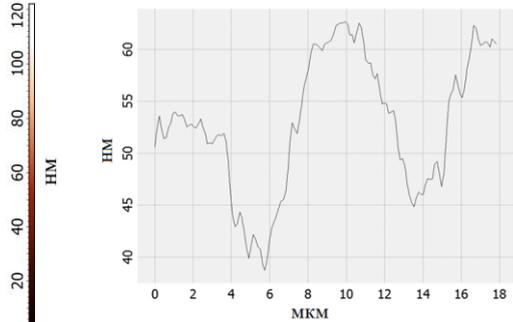
После МИО фольги характер шероховатости не изменился и, как и ранее [15], наиболее заметные изменения после МИО были зарегистриро-



а



в



б

Рис. 2. а — изображение участка свободной поверхности фольги, полученное в АСМ; б — профиль сечения фольги, иллюстрирующий характер неровностей вдоль отрезка прямой, указанной на рис. 2а; в — МСМ-изображение участка свободной поверхности фольги, приведенного на рис. 2а.

Fig. 2. а – image of the area of the free surface of the foil, obtained in AFM; б – profile of the foil section, illustrating the nature of irregularities along the segment of the straight line indicated in Fig. 2а; в – MFM image of the area of the free surface of the foil shown in Fig. 2а

ваны на МСМ-снимках свободной стороны образцов при использовании 20 импульсов магнитного поля.

На МСМ-снимках свободной стороны до МИО доменной структуры не наблюдалось. После МИО на этой стороне фольги был зарегистрирован МСМ-контраст: стали видны полосовые домены, а на дефектах структуры также замыкающие домены, т. н. клиновидные домены Нееля [16]. На рис. 2в полосовые домены видны на всей площади этого участка фольги, а замыкающие домены наиболее ярко видны в нижней левой части рис. 2в на дефекте структуры (царапине). Магнитный контраст также проявляется и на других царапинах, однако в меньшей мере.

Как известно [17], стенки замыкающих доменов прикрепляются к областям, содержащим включения либо дефекты (разрывы, царапины), прочнее, чем к участкам гомогенного материала, в результате движение стенок в этой области замедляется и магнитостатическая энергия уменьшается. Этот эффект хорошо иллюстрируется на рис. 3 и рис. 4.

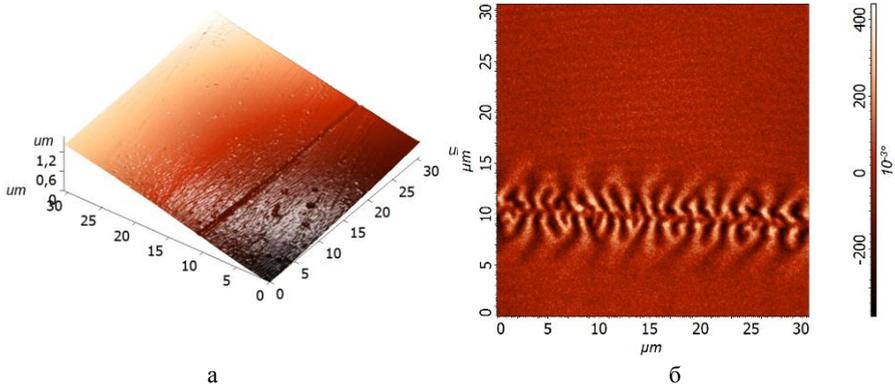


Рис. 3. а — АСМ-изображение участка свободной стороны фольги с царапиной на поверхности; б — МСМ-изображение этого же участка фольги с замыкающими доменами. В верхней части рис. 3б видны полосовые домены.

Fig. 3. а – AFM image of a section of the free side of the foil with a scratch on the surface; б – MFM image of the same section of the foil with trailing domains. At the top of Fig. 3b shows stripe domains

На рис. 3а приведено 3D-изображение поверхности участка фольги, полученное в АСМ, а на рис. 3б — МСМ-изображение этого же участка фольги с замыкающими доменами шириной от 1 мкм до 1,6 мкм, а в верхней части видны полосовые домены шириной 0,6—0,8 мкм.

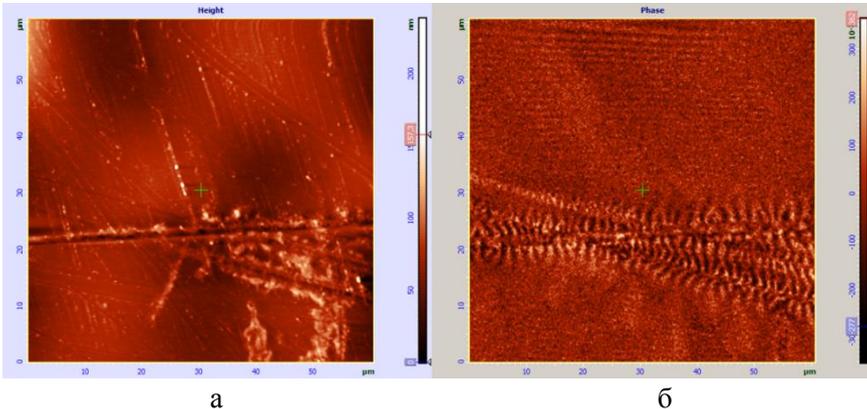


Рис. 4. а — АСМ-изображение участка свободной стороны фольги с царапинами на поверхности; б — МСМ-изображение этого же участка фольги с замыкающими доменами вокруг царапин. В верхней части рис. 4б видны полосовые домены.

Fig. 4. а – AFM image of a section of the free side of the foil with scratches on the surface; б – MFM image of the same foil section with trailing domains around the scratches. At the top of Fig. 4b shows stripe domains

Отметим, что потери на перемагничивание связаны с шириной доменов [15], которая согласно результатам МСМ-исследований изменяется незначительно. Зависимость удельных потерь на перемагничивание P от магнитной индукции поля B_S нелинейная и ее можно описать квадратичной функцией — рис. 5.

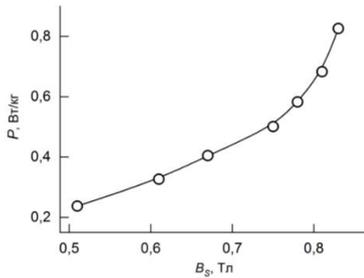


Рис. 5. Зависимость удельных потерь P от магнитной индукции поля B_S .

Fig. 5. Dependence of specific losses P on the magnetic field induction B_S

4. Выводы

Установлено влияние МИО на магнитные свойства поверхности аморфных сплавов Fe(Ni, Cu)(SiB). Результаты исследования позволяют говорить, что потери на перемагничивание в большой степени связаны с потерями, обусловленными вихревыми токами, и связаны с шириной доменов, которая зависит от режимов МИО незначительно. Полученные результаты исследований могут быть использованы для уточнения методики снятия напряжений, возникающих в процессе изготовления аморфных лент.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Правительства Калужской области № 23-21-10069, <https://rscf.ru/project/23-21-10069/>.

Список литературы

1. Глезер А. М., Молотиллов Б. В. Структура и механические свойства аморфных сплавов. М.: Металлургия, 1992. 207 с.
2. Стародубцев Ю. Н., Белозеров В. Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2002. 376 с.
3. Стогней О. В. Физика аморфных металлических сплавов. Учебное пособие. Воронеж: 2007. 139 с.
4. Глезер А. М., Плотникова М. Р. Влияние мегапластической деформации на структуру и магнитные свойства аморфных сплавов на основе железа и никеля // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. Математика, физика. 2011. № 11(106). Вып. 23. С. 159—165.
5. Драгошанский Ю. Н., Пудов В. И. Улучшение магнитной структуры и свойств магнитомягких сплавов за счет модифицирования поверхности // Физика и химия обработки материалов. 2013. № 3. С. 44—52.

6. Стародубцев Ю., Белозеров В. Аморфные металлические материалы // Силовая электроника. 2009. № 2. С. 86—89.
7. Сокол-Кутыловский О. Л. Некоторые перспективы применения аморфных ферромагнитных сплавов // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 5-3 (47). С. 176—179.
8. Альшиц В. И., Даринская Е. В., Колдаева М. В., Петржик Е. А. Магнитопластический эффект : основные свойства и физические механизмы // Кристаллография. 2003. Т. 48, № 5. С. 826—854.
9. Шипко М. Н., Тихонов А. И., Степович М. А., Вирюс А. А., Каминская Т. П., Коровушкин В. В., Савченко Е. С., Еремин И. В. Влияние магнитоимпульсной обработки на микроструктуру и магнитные свойства аморфной электротехнической стали // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82, № 8. С. 1090—1095.
10. Viryus A. A., Kaminskaya T. P., Shipko M. N., Bakhteeva N. D., Korovushkin V. V., Savchenko A. G., Stepovich M. A., Savchenko E. S. Todorova E. V. Microscopic research of amorphous alloys AlFeNiLa exposed to magnetic pulse processing // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 848. Art. no. 012085.
11. Шипко М. Н., Сибирев А. Л., Степович М. А., Тихонов А. И., Савченко Е. В. Влияние магнитоимпульсной обработки на эмиссионные и магнитные свойства поверхностного слоя аморфных сплавов, используемых в электротехнике // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2021. № 9. С. 80—85.
12. Шипко М. Н., Степович М. А., Сибирев А. Л., Тихонов А. И., Савченко Е. В., Каминская Т. П. Влияние магнитоимпульсной обработки на состояние поверхности, эмиссионные и магнитные свойства аморфных магнитных сплавов // Известия РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85, № 11. С. 1528—1531.
13. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений. Нижний Новгород : Институт физики микроструктур РАН, 2004. 114 с.
14. Meyer E., Hug H. J., Binnewitz R. Scanning Probe Microscopy. The Lab on a Tip. Berlin, Heidelberg : Springer, 2004. 210 p.
15. Шипко М. Н., Каминская Т. П., Степович М. А., Вирюс А. А., Тихонов А. И. О влиянии магнитоимпульсной обработки на структуру поверхности и магнитные свойства ленточных аморфных сплавов Fe(Ni, Cu)(SiB) // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2023. № 2. С. 17—22.
16. Вонсовский С. В. Магнетизм. М. : Наука, 1984, 208 с.
17. Андреева Н. В., Филимонов А. В., Рудской А. И., Бурханов Г. С., Терёшина И. С., Политова Г. А., Пелевин И. А. Исследование наноструктурированных магнитотвердых материалов системы Nd-Нo-Fe-Co-B методами атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии // Физика твердого тела. 2016. Т. 58, № 9. С. 1798—1805.

Информация об авторах

Каминская Татьяна Петровна, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник кафедры общей физики физического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва.

Степович Михаил Адольфович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики и математики Калужского государственного университета им. К. Э. Циолковского, Калуга.

Шипко Михаил Николаевич, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры физики Ивановского государственного энергетического университета им. В. И. Ленина, Иваново.

Тихонов Андрей Ильич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Ивановского государственного энергетического университета им. В. И. Ленина, Иваново.

Попов Владимир Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры общей физики физического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва.

Studying the Influence of Weak Impulses Magnetic Field on Local Properties Ribbon Amorphous Alloys Fe(Ni, Cu)(SiB)

T. P. Kaminskaya¹, M. A. Stepovich², M. N. Shipko³,
A. I. Tikhonov³, and V. V. Popov¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation

²Tsiolkovsky Kaluga State University, Kaluga, 248023, Russian Federation

³Lenin Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, 153003, Russian Federation
ktp53@mail.ru

Received: May 20, 2023

Peer-reviewed: May 20, 2023

Accepted: June 3, 2023

Abstract: Atomic force microscopy and magnetic force microscopy have been used to study the influence of weak magnetic field pulses on the local properties of ribbon amorphous Fe(Ni, Cu)(SiB) alloys about 100 μm thick, 10 mm wide, and 50 mm long, which were obtained by ultrafast cooling of the melt on a rotating copper drum. On the surface of the tape adjacent to the copper drum, there were practically no areas with low roughness, which did not allow subsequent studies of this side of the tape by magnetic force microscopy. This method was used to investigate another, free surface of the foil, which was not adjacent to the copper drum and did not have significant roughness. Prior to the impact of magnetic field pulses on the foil, no magnetic contrast was observed on the free side of the ribbon. After magnetic pulse processing, a magnetic contrast was registered on this side of the foil: stripe domains 0.6–0.8 μm wide became visible, and closing domains, became visible on structural defects, wedge-shaped Neel domains, from 1 μm to 1.6 μm wide. The results of the study allow us to say that the magnetization reversal losses are to a large extent associated with losses due to eddy currents and are associated with the domain width, which depends slightly on the modes of magnetic pulse processing. The obtained results of the re-search can be used to refine the method for relieving stresses arising in the process of manufacturing amorphous ribbons.

Keywords: atomic force microscopy, magnetic force microscopy, magnetic pulse processing, stripe domains, closure domains.

For citation (IEEE): T. P. Kaminskaya, M. A. Stepovich, M. N. Shipko, A. I. Tikhonov, and V. V. Popov, “Studying the Influence of Weak Impulses Magnetic Field on Local Properties Ribbon Amorphous Alloys Fe(Ni, Cu)(SiB),” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 4, pp. 398–409, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.4.30. (In Russ.).

References

- [1] A. M. Glezer and B. V. Molotilov, *Structure and mechanical properties of amorphous alloys*. Moscow : Metallurgiya, 1992. (In Russ.).
- [2] Yu. N. Starodubtsev and V. Ya. Belozerov, *Magnetic properties of amorphous and nanocrystalline alloys*. Yekaterinburg : Ural University Press, 2002. (In Russ.).
- [3] O. V. Stogney, *Physics of amorphous metal alloys*. Voronezh : 2007. (In Russ.).
- [4] A. M. Glezer and M. R. Plotnikova, "Influence of megaplastic deformation on the structure and magnetic properties of amorphous alloys based on iron and nickel," *Scientific Bulletin of the Belgorod State University. Ser. Math., physics*, no. 11(106), iss. 23, pp. 159–165, 2011. (In Russ.)
- [5] Yu. N. Dragoshansky and V. I. Pudov, "Improvement of the magnetic structure and properties of soft magnetic alloys due to surface modification," *Physics and Chemistry of Materials Processing*, no. 3, pp. 44–52, 2013 (In Russ.).
- [6] Y. Starodubtsev and V. Belozerov, "Amorphous metallic materials," *Power electronics*, no. 2, pp. 86–89, 2009. (In Russ.).
- [7] O. L. Sokol-Kutylovsky, "Some prospects for the use of amorphous ferromagnetic alloys," *International Scientific Research Journal*, no. 5-3 (47), pp. 176–170, 2016, doi: 10.18454/IRJ.2016.47.226. (In Russ.).
- [8] V. I. Alshits, E. V. Darinskaya, M. V. Koldaeva, and E. A. Petrzhik, "Magnetoplastic effect : Basic properties and physical mechanisms," *Crystallography Reports*, vol. 48, no. 5, pp. 768–795, 2003, doi: 10.1134/1.1612598. (In Russ.).
- [9] M. N. Shipko, A. I. Tikhonov, M. A. Stepovich, A. A. Viryus, T. P. Kaminskaya, V. V. Korovushkin, E. S. Savchenko, and I. V. Eremin, "Effect of Magneto-Pulse Processing on the Microstructure and Magnetic Behavior of Amorphous Electrotechnical Steel," *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, vol. 82, no. 8, pp. 988–992, 2018, doi: 10.3103/S1062873818080373.
- [10] A. A. Viryus, T. P. Kaminskaya, M. N. Shipko, N. D. Bakhteeva, V. V. Korovushkin, A. G. Savchenko, M. A. Stepovich, E. S. Savchenko, and E. V. Todorova, "Microscopic research of amorphous alloys AlFeNiLa exposed to magnetic pulse processing," *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, vol. 848, Art. no. 012085, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/848/1/012085.
- [11] M. N. Shipko, A. L. Sibirev, M. A. Stepovich, A. I. Tikhonov, and E. V. Savchenko, "Effect of Magnetic-Pulse Processing on the Emission and Magnetic Properties of the Surface Layer of Amorphous Alloys Used in Electrical Engineering," *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, vol. 15, no. 5, pp. 970–974, 2021, doi: 10.1134/S1027451021050190.
- [12] M. N. Shipko, M. A. Stepovich, A. L. Sibirev, A. I. Tikhonov, E. S. Savchenko, and T. P. Kaminskaya, "Effect of magnetic pulse treatment on the surface state, emission, and magnetic properties of amorphous magnetic alloys," *Bulletin of the Russian Academy of Sciences : Physics*, vol. 85, no. 11, pp. 1191–1194, 2021, doi: 10.3103/S1062873821110356.
- [13] V. L. Mironov, *Fundamentals of scanning probe microscopy. Textbook for senior students of higher educational institutions*. Nizhny Novgorod : Institute of Physics of Microstructures RAS, 2004. (In Russ.).
- [14] E. Meyer, H. J. Hug, R. Bennewitz, *Scanning Probe Microscopy. The Lab on a Tip*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2004.
- [15] M. N. Shipko, T. P. Kaminskaya, M. A. Stepovich, A. A. Viryus, and A. I. Tikhonov, "On the Effect of Magnetic Pulsed Treatment on the Surface Structure and Magnetic Properties of Ribbon Amorphous Fe(Ni,Cu)(SiB) Alloys," *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, vol. 17, no. 1, pp. 186–190, 2023, doi: 10.1134/S1027451023010378.

- [16] S. V. Vonsovsky, *Magnetism*. Moscow : Nauka, 1984. (In Russ.).
- [17] N. V. Andreeva, A. V. Filimonov, A. I. Rudskoy, G. S. Burkhanov, I. S. Tereshina, G. A. Politova, and I. A. Pelevin, "Investigation of nanostructured magnetically hard materials of the Nd-Ho-Fe-Co-B system by methods of atomic force and magnetic force microscopy," *Solid State Physics*, vol. 58. no. 9, pp. 1798–1805, 2016. (In Russ.).

Information about the authors

Tatiana P. Kaminskaya, PhD. Sci., Assoc. Prof., Researcher Department of General Physics, Faculty of Physics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation.

Mikhail A. Stepovich, Dr. Sci., Prof., Prof. of the department of physics and mathematics Tsiolkovsky Kaluga State University, Kaluga, Russian Federation.

Mikhail N. Shipko, Dr. Sci., Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation, Prof. of the department of physics Lenin Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation.

Andrey I. Tikhonov, Dr. Sci., Prof., head of the department of physics Lenin Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation.

Vladimir V. Popov, PhD. Sci., Senior Researcher Department of General Physics, Faculty of Physics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation.