MAШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ MECHANICAL ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCE

https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-98-108

УДК 621.891;621.894

Влияние магнитного поля на структуру полимерных медьсодержащих композитов для узлов стационарного трения

Докт. физ.-мат. наук, проф. А. Г. Анисович¹⁾, канд. техн. наук, доц. С. Н. Бухаров²⁾, В. К. Меринов²⁾, канд. техн. наук, доц. В. П. Сергиенко²⁾

¹⁾Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики

Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем

имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси» (Гомель, Республика Беларусь)

Реферат. Исследовано влияние предварительной обработки импульсным магнитным полем на композиционную смесь порошков (политетрафторэтилен, порошок медный стабилизированный, базальтовое волокно, дисперсная неорганическая фрикционная добавка) для получения прессованных полимерных фрикционных материалов. Для обработки использовался экспериментальный прибор ИМИ-И. Варьировались напряженность магнитного поля, количество импульсов и их полярность. Методом оптической микроскопии исследовано изменение структуры поверхности композиционного материала после прессования, разрезки, а также поверхности после испытаний на трение. Установлено существенное влияние магнитного поля на структуру образцов. Повышается однородность свободной поверхности, снижается пористость, существенно изменяется морфология и повышается возможность визуализации фаз. Отмечено изменение поверхности среза, сформированной инструментом при разрезке кольцевой заготовки на отдельные образцы. Обработка в магнитном поле приводит к формированию менее развитого рельефа поверхности; эффект интенсифицируется при увеличении количества импульсов от двух до четырех, а также при увеличении напряженности поля. Значительно изменяется морфология поверхности трения: обработка способствует снижению различий между периферийной областью и центром образца. Пленки переноса формируются существенно менее интенсивно. Полимерная фаза не демонстрирует наличия вязких участков. Рентгеноструктурным анализом исследован фазовый состав и изменение статических смещений атомов из положений равновесия. Установлено, что фазовый состав материала под влиянием магнитной обработки не изменяется. Показано, что предварительная обработка композиционной смеси магнитным полем влияет на статические смещения атомов из положений равновесия в медной фазе. Обработка в магнитном поле способствует формированию равновесной структуры меди за счет совершенствования кристаллической решетки. Установлено, что эффект воздействия в наибольшей степени зависит от количества импульсов и их полярности. Наиболее эффективным является применение однополярного импульса.

Для цитирования: Влияние магнитного поля на структуру полимерных медьсодержащих композитов для узлов стационарного трения / А. Г. Анисович [и др.] // Наука и техника. 2025. Т. 24, № 2. С. 98–108. https://doi.org/10.21122/ 2227-1031-2025-24-2-98-108

Ключевые слова: фрикционные композиционные материалы, медь, морфология поверхности, микроструктура, магнитное поле, статические смещения атомов

Адрес для переписки Анисович Анна Геннадиевна Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси» ул. Академическая, 16, 220072, г. Минск, Республика Беларусь Тел.: +375 29 664-65-56 anna-anisovich@yandex.ru Address for correspondence Anisovich Anna G. State Scientific Institution "Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus" 16, Academic str., 220072, Minsk, Republic of Belarus Tel.: +375 29 664-65-56 anna-anisovich@yandex.ru

Effect of Magnetic Field on Structure of Copper-Containing Polymer Composites for Stationary Friction Units

A. G. Anisovich¹, S. N. Bukharov², V. K. Merinov², V. P. Sergienko²

¹⁾State Scientific Institution "Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus" (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾State Scientific Institution "Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems named after V. A. Bely of the National Academy of Sciences of Belarus" (Comel, Penublic of Belarus)

of the National Academy of Sciences of Belarus" (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The effect of preliminary treatment with a pulsed magnetic field on a composite mixture of powders (polytetrafluoroethylene, stabilized copper powder, basalt fiber, dispersed inorganic friction additive) for obtaining pressed polymer friction materials is investigated. An experimental device IMI-I was used for processing. The magnetic field strength, number of pulses and their polarity were varied. The change in the surface structure of a composite material after pressing, cutting, as well as the surface after friction tests was studied using the method of optical microscopy. A significant effect of the magnetic field on the structure of the samples was found. The homogeneity of the free surface increases, porosity decreases, the morphology changes significantly and the ability of phase visualization increases. A change in the cut surface formed by the tool when cutting a ring blank into individual samples is noted. Treatment in a magnetic field leads to the formation of a less developed surface relief; the effect is intensified with an increase in the number of pulses from two to four, as well as with an increase in the field strength. The morphology of the friction surface changes significantly: the treatment helps to reduce the differences between the peripheral region and the center of the sample. Transfer films are formed much less intensively. The polymer phase does not demonstrate the presence of viscous areas. The phase composition and change in static displacements of atoms from equilibrium positions were studied by X-ray structural analysis. It was found that the phase composition of the material does not change under the influence of magnetic treatment. It is shown that preliminary treatment of the composite mixture with a magnetic field affects the static displacements of atoms from equilibrium positions in the copper phase. Treatment in a magnetic field helps to form an equilibrium structure of copper due to improvement of the crystal lattice. It was found that the effect of exposure depends to the greatest extent on the number of pulses and their polarity. The use of a unipolar pulse is the most effective.

Keywords: friction composite materials, copper, surface morphology, microstructure, magnetic field, static displacements of atoms

For citation: Anisovich A. G., Bukharov S. N., Merinov V. K., Sergienko V. P. (2025) T Effect of Magnetic Field on Structure of Copper-Containing Polymer Composites for Stationary Friction Units. *Science and Technique*. 24 (2), 98–108. https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-98-108 (in Russian)

Введение

В настоящее время для модифицирования структуры материалов (диэлектриков, металлов, полимеров) с целью оптимизации свойств и улучшения эксплуатационных показателей активно применяются воздействия переменным и постоянным магнитным полем [1-4]. Имеется достаточно много публикаций по исследованию влияния магнитных полей на свойства углеводородов [5] и полимеров [6]. В частности, показано, что воздействие постоянным магнитным полем на полимерную композицию «эпоксидная смола ЭДП - полиэтиленполиамин дибутилфталат с железным порошком» сопровождается ростом коэффициента теплопроводности и микротвердости. Эффект связывают с упорядоченной перестройкой структуры полимера. В [7] приведены результаты исследования влияния внешнего магнитного поля на физико-механические свойства и структуру наполненных полимерных покрытий. Механическая и адгезионная прочность композиционных покрытий, полученных на основе эпоксидного олигомера, резко изменяется при обработке в магнитном поле в зависимости от вида наполнителя и напряженности внешнего магнитного поля. Установлено значительное улучшение эффективной теплопроводности и коэффициента линейного теплового расширения в процессе кристаллизации во вращающемся неоднородном магнитном поле [8]. Исследовано влияние постоянного магнитного поля на структуру и теплоемкость композитов на основе ацетобутирата целлюлозы и сегментированного полиуретана [9]. Показано, что воздействие ПМП напряженностью 2×10⁵ А/м позволяет ослабить процессы микрофазного разделения компонентов и, таким образом, достичь нового уровня модификации структуры и теплоемкости композитов. Применение магнитного поля эффективно для улучшения эксплуатационных характеристик металлических покрытий [10]. Ранее авторами было установлено, что импульсное магнитное поле (при воздействии на прессованные образцы) существенно улучшает вибродемпфирующие и акустические характеристики наполненных фторполимерных композитов [11, 12]. Магнитное поле в качестве предварительной обработки композиционной смеси (медный порошок, политетрафторэтилен, базальтовое волокно) перед операцией компактирования оказало существенное влияние на механические динамические характеристики [13]. Изменение свойств фторполимерных композитов может быть связано с изменением структуры и свойств каждого из компонентов фрикционной смеси.

Цель работы – исследование влияния магнитной обработки исходных смесей полимерных композитов на структуру прессованных фрикционных материалов.

Материалы и методики эксперимента

В качестве объектов исследования выбраны полимерные фрикционные композиты марки BMZD (ТУ ВҮ 400084698.322–2022), используемые в узлах стационарного трения технологического оборудования. Композиты изготавливались на основе политетрафторэтилена (ГОСТ 10007–80). В качестве наполнителей использовали порошок медный стабилизированный марки ПМС-1 (ГОСТ 4960–2017), измельченное базальтовое волокно диаметром 3 мкм (СТБ 1908–2008), поверхностно модифицированное 1,3-фенилен-бисмалеинимидом марки GP-204, и дисперсную неорганическую фрикционную добавку.

Исходная композиционная смесь обрабатывалась в импульсном магнитном поле на приборе ИМИ-И [14] одно- и двухполярными импульсами в количестве 2 и 4 с напряженностью магнитного поля 20, 40 и 60 кА/м (рис. 1).

После магнитной обработки из композиционной смеси формировали образцы для испытаний и исследования структуры. Образцы изготавливали методом прямого прессования при комнатной температуре и давлении 50–60 МПа. Термообработку отпрессованных образцов осуществляли при температуре 380 ± 5 °C. Время выдержки составляло 5 мин на 1 мм толщины образца. Для испытаний на трение изготавливали образцы в виде сегментов шириной 0,012 м и длиной по дуге 0,020 м (рис. 2).

Микроструктурные исследования проводили на инвертированном металлографическом микроскопе МИ-1 с использованием оптического контрастирования по методу темного поля [15]. Микроструктуру материала образцов исследовали на поверхности трения, поверхности среза, и на боковой поверхности, сформированной при прессовании и не подвергавшейся в дальнейшем какому-либо воздействию (рис. 2).

Рентгеноструктурный анализ выполнен в излучении Cu_{*K*_a} на установке ДРОН-3, оснащенной аппаратно-программным комплексом для управления дифрактометром и обработки результатов измерений.



Рис. 1. Форма электромагнитного импульса: а – двухполярный; b – однополярный

Fig. 1. Shape of electromagnetic pulse: a - bipolar; b - unipolar

Наука			
итехника. Т.	24,	Nº 2	: (2025)
Science and Techniqu	ie. V.	24. No	o 2 (2025)



Рис. 2. Образцы после испытаний на трение (образец из композиционной смеси, обработанной магнитным полем, – справа)

Fig. 2. Samples after friction tests (sample from a composite mixture treated with a magnetic field is on the right)

Фазовый анализ проведен по общепринятой методике. Статические смещения атомов из положения равновесия определяли по соотношению [16]

$$\overline{u}_{\rm cr} = \frac{3a^2 \ln \left[\frac{(I)_{_{\rm уталона}}}{(I)_{_{\rm образиа}}} \right]}{4\pi^2 \left[(h^2 + l^2 + k^2) \right]},\tag{1}$$

где $I_{\text{образца}}$ – интегральная интенсивность линии образца; $I_{\text{эталона}}$ – интегральная интенсивность линии эталона; h, k, l – индексы Миллера; a – параметр кристаллической решетки.

Определение смещений проведено для линии (111) Си. В качестве эталона принимали образец, не подвергавшийся воздействию магнитного поля.

Результаты и их обсуждение

На поверхности образца, отпрессованного из необработанной магнитным полем смеси, наблюдается полимерное связующее и отдельные включения базальтового волокна; медный наполнитель практически не определяется (рис. 3а). После обработки композиционной смеси двумя импульсами магнитного поля напряженностью 20 кА/м (биполярный импульс) более контрастно проявляются фрагменты базальтового волокна, а также частицы медного порошка (рис. 3b). Следует также отметить изменение цвета композиции. После увеличения количества импульсов до четырех структура прессованного образца проявляется более отчетливо (рис. 3с). Полимерная фаза становится более однородной, хорошо видны базальтовые волокна. Частицы медного порошка наблюдаются в своем естественном цвете. При повышении напряженности поля до 40 кА/м для формирования структуры, аналогичной представленной на рис. 3с, достаточно двух биполярных импульсов (рис. 4а). После увеличения количества импульсов до четырех структура поверхности не изменяется (рис. 4b). При обработке двумя однополярными импульсами напряженностью 20 кА/м формируется аналогичная структура (рис. 4с). При напряженности магнитного поля до 60 кА/м структура формируется аналогично таковой при напряженности 40 кА/м.

Обработка импульсным магнитным полем влияет также и на морфологию поверхности среза, сформированную инструментом при разрезке кольцевой заготовки на отдельные образцы (рис. 5). Обработка приводит к формированию менее развитого рельефа поверхности; эффект интенсифицируется при увеличении количества импульсов от двух до четырех (рис. 5с), а также при увеличении напряженности поля (рис. 6а). Применение однополярного импульса способствует повышению однородности структуры материала поверхности среза при четырех импульсах магнитного поля напряженностью 40 кА/м (рис. 6b, с).



Рис. 3. Структура поверхности прессованного образца композита: а – без воздействия поля; b, с – обработка магнитным полем напряженностью 20 кА/м, 2 и 4 импульса соответственно, двухполярный импульс

Fig. 3. Surface structure of a pressed composite sample: a - without field exposure; b, c - treatment with a magnetic field of 20 kA/m, 2 and 4 pulses, respectively, bipolar pulse

Наука			
итехника. Т.	24, №	2 2 (20)25)
Science and Te	chnique	. V. 24,	No 2 (2025



Puc. 4. Структура поверхности прессованного образца: a, b – обработка магнитным полем напряженностью 40 кА/м, 2 и 4 импульса соответственно; c – 20 кА/м, 2 импульса; a, b – двухполярный импульс; c – однополярный импульс
 Fig. 4. Surface structure of the pressed sample: a, b — treatment with a magnetic field of 40 kA/m, 2 and 4 pulses, respectively; c – 20 kA/m, 2 pulses; a, b – bipolar pulse; c – unipolar pulse



Рис. 5. Структура поверхности среза: а – без воздействия поля; b, с – обработка магнитным полем напряженностью 20 кА/м, 2 и 4 импульса соответственно; двухполярный импульс

Fig. 5. Structure of the cut surface: a – without field effect; b, c – treatment with a magnetic field of 20 kA/m, 2 and 4 pulses, respectively; bipolar pulse



Puc. 6. Структура поверхности среза: а – 40 кА/м, 4 импульса, двухполярный импульс;
 b, c – 20 кА/м, 2 и 4 импульса соответственно, однополярный импульс
 Fig. 6. Structure of the cut surface: a – 40 кА/m, 4 pulses, bipolar pulse;
 b, c – 20 кА/m, 2 and 4 pulses respectively, unipolar pulse

Магнитная обработка существенно влияет на морфологию поверхности трения. На образцах, не обработанных магнитным полем, наблюдается картина вязкопластического течения материала. Интенсивно формируется «третье» тело в виде пленок переноса. Образовавшиеся пленки ориентированы в направлении трения и имеют высокую прочность адгезионного сцепления с материалом образца (рис. 7а, b). Медная фаза декорируется продуктами износа, в особенности в центре образца.



Рис. 7. Структура поверхности трения: a, b – без обработки магнитным полем; c, d – после обработки; a, c – периферийная область образца; b, d – центр

Fig. 7. Structure of the friction surface: a, b – without magnetic field treatment; c, d – after treatment; a, c – peripheral region of the sample; b, d – center

После обработки композиционной смеси в магнитном поле картина трения изменяется (рис. 7с, d). Полимерная фаза не демонстрирует наличия вязких участков. Неоднородность структуры материала (различия в периферийной области трения и в центре образца) снижается, проявляется натуральный цвет медной фазы. Пленки переноса формируются менее интенсивно и не перекрывают всю поверхность трения. При используемом увеличении (50 крат) не зафиксировано изменений морфологии поверхности трения в зависимости от режима воздействия магнитного поля.

Фазовый рентгеноструктурный анализ показывает наличие в композиционной смеси полимера (CF_2)_n и меди (табл. 1). Базальтовое волокно не дает отдельных интерференционных линий на рентгенограмме, на ней проявляется гало, характерное для аморфных материалов (рис. 8). Фазовый состав композиционной смеси после воздействия магнитного поля не изменяется.

Таблица 1

Фазовый состав композиционной смеси Phase composition of the composite mixture

№ п/п	Угол 20, град.	Межплоскостное расстояние, Å	Фаза (<i>hkl</i>), интенсивность табл., %
1	18,65	4,754	(CF ₂) _n , 100 %
2	32,18	2,779	$(CF_2)_n$
3	37,37	2,404	$(CF_2)_n$
4	41,86	2,156	$(CF_2)_n$
5	43,40	2,083	Cu, (111), 100 %
6	50,38	1,810	Cu, (200), 46 %
7	74,12	1,278	Cu, (220), 20 %
8	89,60	1,093	Cu, (311), 17 %



Рис. 8. Рентгенограмма базальтового волокна *Fig.* 8. X-ray image of basalt fiber

На рис. 9-11 представлены участки рентгенограмм композиционной смеси после различных режимов обработки магнитным полем. Характерным рентгеновским эффектом является изменение относительной интенсивности интерференционных линий как полимера (CF₂)_n, так и меди. При обработке фрикционной смеси двумя двухполярными импульсами относительное изменение интенсивности линий минимально; эффект изменения повышается для напряженности поля 60 кА/м. В наибольшей степени эффект обработки проявляется для режима четырех импульсов с напряженностью 40 кА/м, что согласуется с изменением структуры (рис. 4).

При использовании однополярного импульса эффект проявляется уже при двух импульсах с напряженностью 20 и 40 кА/м. Другие режимы показывают менее выраженный результат. Рентгенограммы для режимов четырех импульсов с напряженностью 40 кА/м и двух импульсов с напряженностью 20 кА/м практически подобны, что также согласуется с результатами исследования структуры, представленными на рис. 4.



Рис. 9. Фрагмент рентгенограммы образца в исходном состоянии





Рис. 10. Характерный участок рентгенограмм композиционной смеси после воздействия магнитного поля, двухполярный импульс: a, b, c – два импульса с напряженностью поля 20, 40 и 60 кА/м соответственно; d, e, f – четыре импульса с напряженностью поля 20, 40 и 60 кА/м соответственно

Fig. 10. Characteristic section of X-ray diffraction patterns of composite mixture after exposure to magnetic field, bipolar pulse: a, b, c - two pulses with field strength of 20, 40 and 60 kA/m, respectively;

d, e, f - four pulses with field strength of 20, 40 and 60 kA/m, respectively

	лехн	аука ика	a T	24	No	2	(2))25
Scier	ice and	Tech	niau	,	24	No	2 (2	025



Рис. 11. Характерный участок рентгенограмм композиционной смеси после воздействия магнитного поля, однополярный импульс: a, b, c – два импульса с напряженностью поля 20, 40 и 60 кА/м соответственно; d, e, f – четыре импульса с напряженностью поля 20, 40 и 60 кА/м соответственно

Fig. 11. Characteristic section of X-ray diffraction patterns of a composite mixture after exposure to a magnetic field, unipolar pulse: a, b, c — two pulses with a field strength of 20, 40 and 60 kA/m, respectively;
d, e, f – four pulses with a field strength of 20, 40 and 60 kA/m, respectively

Применительно к металлам изменение интенсивности линий рентгенограммы может быть связано с несколькими процессами:

- формированием текстуры;

 изменением величины блоков когерентного рассеяния;

- образованием дефектов упаковки;

 – статическими смещениями атомов из положений равновесия.

Воздействие магнитного поля на медную компоненту смеси не связано с пластической деформацией или с повышением температуры; разогрев смеси в магнитном поле не наблюдался. Давление 50 МПа и температура 380 °С при прессовании композиционной смеси для меди несущественны с точки зрения изменения внутренней структуры. Поэтому первые три процесса в медной фазе представляются маловероятными. Наиболее вероятной причиной изменения относительной интенсивности интерференционных линий меди является изменение статических смещений атомов из положений равновесия (напряжения 3-го рода). Под воздействием импульсного магнитного поля происходят изменения тонкой структуры меди [17], в частности наблюдали начальные стадии формирования ячеистой дислокационной структуры. Как характерный эффект магнитного воздействия было отмечено формирование двойников и ступенчатых высокоугловых границ [17, 18]. Такие изменения структуры связаны с перемещением атомов на расстояния, не кратные межплоскостным.

Представления о напряжениях 3-го рода используются для описания процессов формирования твердых растворов, влияния примесей на структуру и свойства материалов, а также описания фазовых превращений [19–22]. Напряжения 3-го рода возникают при переходах атомов через потенциальные барьеры, то есть при перемещениях атомов на расстояния, не меньшие половины межатомного расстояния [23]. При больших перемещениях атомы соседних слоев могут не попадать полностью в положения минимумов, соответствующих равновесной решетке, и часть атомов занимает промежуточные положения равновесия. Напряжения 3-го рода возникают при переходе через предел упругости и являются метастабильными нарушениями кристаллической структуры, при этом искажения охватывают объем в несколько элементарных ячеек. Этим искажениям соответствуют смещения атомов, нарушающие регулярность структуры. Смещения атомов, связанные с искажениями 3-го рода, носят статический характер и концентрируются в местах наибольших нарушений правильности структуры – на границах зерен и двойников, блоков когерентного рассеяния.

Энергию напряжений 3-го рода можно оценить по формуле, аналогичной формуле для теплоты, идущей на нагревание тела:

$$\Delta U = \frac{1}{2}c\Delta T,$$
 (2)

где c – теплоемкость; ΔT – эффективная температура.

Величина энергии ΔU по порядку совпадает с энергией внутренних напряжений, измеряемой в калориметрических опытах. При пластической деформации на напряжения 3-го рода приходится 98 % общей поглощенной энергии [23].

Возможность изменения структуры меди в магнитном поле подтверждается существованием в диамагнитных металлах магнитокалорического эффекта [24].

В качестве гипотезы о механизмах влияния магнитного поля на структуру политетрафторэтилена (ПТФЭ) можно предположить,



что под воздействием магнитного поля происходит изменение спиральной конформации ПТФЭ. Молекулы в зависимости от режимов обработки скручиваются–раскручиваются подобно тому, как это происходит вблизи температур фазовых переходов, оставаясь при этом в кристаллическом состоянии. Воздействие магнитным полем приводит к изменению жесткости молекулярной цепи ПТФЭ, в результате чего изменяется спиральная конформация ПТФЭ. Конформационный гистерезис для процессов «скрутки-раскрутки» молекул при воздействии магнитного поля способствует изменению структуры и свойств материала.

По рентгеновским данным рассчитаны относительные статические смещения атомов меди из положений равновесия (рис. 12). Полученные результаты коррелируют с изменением структуры (рис. 3, 4) и свойств [13]. Для двухполярного импульса наилучшая структура соответствует режиму четырех импульсов с напряженностью 20 кА/м, для однополярного – двух импульсов с напряженностью 20 кА/м. Этому соответствует максимальное изменение значения атомных смещений. По-видимому, обработка в магнитном поле способствует формированию равновесной структуры за счет совершенствования кристаллической решетки меди.

Описанные структурные изменения определяют результаты динамического механического анализа образцов, отпрессованных из композиционных материалов, обработанных в магнитном поле [13].



Рис. 12. Изменение статических смещений атомов меди в зависимости от количества импульсов и напряженности магнитного поля: а – двухполярный импульс; b – однополярный импульс

Fig. 12. Change in static displacements of copper atoms depending on the number of pulses and magnetic field strength: a – bipolar pulse; b – unipolar pulse

Наука						
итехника. Т.	24,	, Nº	2	(20	25))
Science and Techniq	ue. V	. 24,	No	2 (2	025)	

Сравнение эффектов обработки одно- и двухполярным импульсами показывает, что при обработке двумя импульсами с напряженностью $H_m = 20$ кА/м в области температур до релаксационного α-перехода однополярный режим обработки повышает, а двухполярный - снижает тангенс угла механических потерь (tgб) до 7 % по сравнению с необработанным композитом. Динамический модуль упругости E_d возрастает во всем температурном диапазоне до 12,5 % независимо от полярности режима обработки, при этом с увеличением температуры влияние обработки на Е_d снижается. Повышение напряженности поля до значений 40-60 кА/м не оказывает существенного влияния на структуру и свойства полимерного композита.

выводы

1. Установлено существенное влияние предварительной обработки магнитным полем фрикционной смеси (медный порошок, политетрафторэтилен, базальтовое волокно) на структуру прессованных образцов, а также поверхность реза и морфологию поверхности трения.

2. Показано, что существенное значение имеют количество импульсов магнитного поля, а также полярность импульсов. Оптимальное значение напряженности магнитного поля составило 20 кА/м; наиболее результативно применение униполярных импульсов.

3. Одним из физических механизмов, ответственных за изменение структуры и свойств материалов на основе ПТФЭ при воздействии магнитного поля, можно считать образование статических смещений атомов меди из положения равновесия, что означает изменение уровня напряжений 3-го рода.

4. В качестве гипотезы высказано предположение, что воздействие магнитным полем приводит к изменению жесткости молекулярной цепи ПТФЭ, в результате чего изменяется спиральная конформация ПТФЭ. Эти изменения влияют на значения структурно-чувствительных показателей свойств композита, в качестве которых в данном исследовании использованы механические динамические характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Моргунов, Р. Б. Спиновая микромеханика в физике пластичности / Р. Б. Моргунов // Успехи физических наук. 2004. Т. 174, № 2. С. 131–153. https://doi.org/10.3367/ufnr. 0174.200402c.0131.
- Волчков, И. С. Влияние слабых магнитных полей на электрические свойства кристаллов *CdT* / И. С. Волчков, В. М. Каневский, М. Д. Павлюк // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т.107. Вып. 4. С. 276–279. https://doi.org/10.7868/S0370 274X18040124.
- Физическая кинетика движения дислокаций в немагнитных кристаллах: взгляд через магнитное окно / В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, М. В. Колдаева [и др.] // Успехи

физических наук. 2017. Т. 187. С. 327–341. https://doi.org/ 10.3367/UFNr.2016.07.037869.

- Головин, Ю. И. Магнитопластичность твердых тел (Обзор) / Ю. И. Головин // Физика твердого тела. 2004. Т. 46. Вып. 5. С. 76–803.
- Improvement of the wear Resistance of Nickel Aluminium Bronze and 2014-T6 Aluminium Alloy by Application of Alternating Magnetic Field Treatment / S. Akrama, A. Babutskyi, A. Chrysanthou [et al.] // Wear. 2021. Vol. 480–481. Art. 203940. https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203940.
- 6. Licai, Fu. Effect of Applied Magnetics Field on Wear Behaviour of Martensitic Steel / Licai Fu, Lingping Zhou // Journal of Materials Research and Technology. 2019. Vol. 8, No 3. P. 2880–2886. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.07.026.
- Икромов, Н. А. Исследование влияния магнитного поля на физико-механические свойства композиционных полимерных покрытий / Н. А. Икромов // Вестник КГУ. 2015. № 3: Сер. Технические науки. Вып. 10. С. 97–99.
- Влияние неоднородного магнитного поля на физические свойства металлосодержащих полимерных композитов / В. Н. Билык, Г. В. Кирик, О. Г. Медведовская [и др.] // Металлофизика и новейшие технологии. 2014. Т. 36, № 12. С. 1641–1650.
- Влияние постоянного магнитного поля на структуру и свойства композитов на основе несовместимых полимеров / В. А. Виленский, Ю. Ю. Керча, Г. Е. Глиевая, В. А. Овсянкина // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2005. Т. 47, № 12. С. 2130–2139.
- Microstructure and Wear Resistance of Electromagnetic Field Assisted Multi Layer Laser Clad Fe901 Coating / Lei Huanga, Jianzhong Zhou, Jiale Xu [et al.] // Surface & Coatings Technology. 2020. No 395. P. 125–876. https://doi.org/ 10.1016/j.surfcoat.2020.125876.
- 11. Влияние обработки высокочастотным электромагнитным полем на динамические механические и триботехнические характеристики фрикционных композитов с термореактивной полимерной матрицей / В. П. Сергиенко, С. Н. Бухаров, А. Г. Анисович [и др.] // Трение и износ. 2021. Т. 42, № 6. С. 619–628. https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-6-619-628.
- 12. Модифицирование физико-механических свойств фрикционных композитов с полимерной матрицей воздействием модулированного по амплитуде высокочастотного электромагнитного поля / В. В. Ажаронок, А. Г. Анисович, В. В. Биран [и др.] // Электронная обработка материалов. 2014. Т. 50, № 3. С. 16–22.
- 13. Влияние обработки в магнитном поле на трибоакустические характеристики медьсодержащих полимерных фрикционных композитов / В. П. Сергиенко, С. Н. Бухаров, А. Г. Анисович [и др.] // Трение и износ. 2024. Т. 45, № 3.С. 187–198. https://doi.org/10.32864/0202-4977-2024-45-3-187-198.
- 14. Прибор для измерения магнитной индукции ферромагнитных стержней в процессе импульсного намагничивания перемагничивания / З. М. Короткевич, В. Ф. Матюк, В. Л. Цукерман, А. А. Осипов // Приборостроение 2013: материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 20–22 нояб. 2013 / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. Минск: БНТУ, 2013. С. 70–72.
- 15. Анисович, А. Г. Искусство металлографии: использование методов оптического контрастирования / А. Г. Анисович // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фізіка-тэхнічных навук. 2016. № 1. С. 36–42.
- 16. Миркин, М. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов / М. И. Миркин. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1961. 862 с.
- Структурообразование в меди под воздействием импульсного магнитного поля / Г. Н. Здор, Р. Л. Тофпенец, А. Г. Анисович, И. А. Зарецкий // Известия Российской академии наук. Сер. физическая. 1995. Т. 59, № 10. С. 65–71.

- Давыдов, С. В. Эффективность магнитно-импульсной обработки / С. В. Давыдов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2007. № 3. С. 89.
- Gurskii, Z. The Role of Atomic Static Displacements in Binary-Alloy Formation / Z. Gurskii, J. Krawczyk // Physica B: Condensed Matter. 2003. Vol. 337, No 1–4. P. 255–265. https://doi.org/10.1016/S0921-4526(03)00412-5.
- Cayron, C. Continuous Atomic Displacements and Lattice Distortion During Fcc-Bcc Martensitic Transformation / C. Cayron // Acta Materialia. 2015. Vol. 96. P. 189–202. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.010.
- Feng, Peng. Modulated Fluctuation of Atomic Displacement in a Crystal with a Single Impurity / Feng Peng // Physica B: Condensed Matter. 2006. Vol. 373, No 3. P. 194–197. https://doi.org/10.1016/j.physb.2005.11.166.
- Михайлов, Ю. Н. Длинноволновые статические смещения атомов в сплавах γ – FeNi / Ю. Н. Михайлов, С. Ф. Дубинин // Физика твердого тела. 2004. Т. 46. Вып. 12. С. 2113–2118.
- Жданов, Г. С. Физика твердого тела / Г. С. Жданов. М.: МГУ, 1961. 502 с.
- 24. Анисович, А. Г. Изменение теплового состояния диамагнитных металлов под воздействием магнитного поля / А. Г. Анисович, Е. И. Марукович, Т. Н. Абраменко // Металлы. 2003. № 6. С. 108–110.

Поступила 31.10.2024 Подписана в печать 09.01.2025 Опубликована онлайн 31.03.2025

REFERENCES

- Morgunov R. B. (2004) Spin Micromechanics in Plasticity Physics. *Physics-Uspekhi*, 47 (2), 125–147. https://doi.org/10. 1070/pu2004v047n02abeh001683.
- Volchkov I. S., Kanevsky V. M., Pavlyuk M. D. (2018) Effect of Weak Magnetic Fields on the Electrical Properties of *CdT* Crystals. *JETP Letters*, 107 (4), 269–272. https://doi. org/10.1134/s0021364018040136.
- Alshits V. I., Darinskaya E. V., Koldaeva M. V., Kotowski R. K., Petrzhik E. A., Tronczyk P. (2017) Physical Kinetics of Dislocation Motion in Non-Magnetic Crystals: A View Through A Magnetic Window. *Physics-Uspekhi*, 60 (3), P. 305–318. https://doi.org/10.3367/ufne.2016.07.037869.
- Golovin Yu. I. (2004) Magneplasticity of Solids (Review). *Physics of the Solid State*, 46 (5), 76–803 (in Russian).
- Akrama Š., Babutskyi A., Chrysanthou A., Montalv D., Whiting M. J, Pizurova N. (2021) Improvement of the Wear Resistance of Nickel Aluminium Bronze and 2014-T6 Aluminium Alloy by Application of Alternating Magnetic Field Treatment. *Wear*, 480–481, 203940. https://doi.org/10.1016/j. wear.2021.203940.
- Licai Fu, Lingping Zhou (2019) Effect of Applied Magnetics Field on wear Behaviour of Martensitic Steel. *Journal* of Materials Research and Technology, 8 (3), 2880–2886. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.07.026.
- Ikromov N. A. (2015) Study of the Influence of A Magnetic Field on the Physical and Mechanical Properties of Composite Polymer Coatings. *Vestnik KGU. Ser. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Kurgan State University. Technical Science Series], (3), 97–99 (in Russian).
- Bilyk V. N., Kirik G. V., Medvedovskaya O. G., Stadnik A. D., Chepurnykh G. K., Sokolov S. V. (2014) The Influence of A Non-Uniform Magnetic Field on the Physical Properties of Metal-Containing Polymer Composites. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 36 (12), 1641–1650 (in Russian).
 Vilenskii V. A., Kercha Yu. Yu., Glievaya G. E., Ov-
- Vilenskii V. A., Kercha Yu. Yu., Glievaya G. E., Ovsyankina V. A. (2005) The Influence of A Constant Magnetic Field on the Structure and Properties of Composites Based on Incompatible Polymers. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya* = *Polymer Science, Series A*, 47 (12), 2130–2139 (in Russian).
- Huang L., Zhou J., Xu J., Huo K., He W., Meng X., Huang S. (2020). Microstructure and Wear Resistance of Electromagnetic Field Assisted Multi Layer Laser Clad Fe901 Coating.

Surface & Coatings Technology, 395, 125–876. https://doi. org/10.1016/j.surfcoat.2020.125876.

- Sergienko V. P., Bukharov S. N., Anisovich A. G., Abed N. S., Grigoriev A. Ya. (2021) The Influence of High-Frequency Electromagnetic Field Treatment on the Dynamic Mechanical and Tribo-Technical Characteristics of Friction Composites with A Thermosetting Polymer Matrix. *Journal of Friction and Wear*, 42 (6), 401–407. https://doi.org/10.3103/s106836662106009x.
- Azharonok V. V., Anisovich A. G., Biran V. V., Bukharov S. N., Sergienko V. P., Filatova I. I. (2014). Modification of Physicomechanical Properties of Friction Composites with A Polymer Matrix under the Influence of An Amplitude-Modulated High-Frequency Electromagnetic Field. *Surface Engineering* and Applied Electrochemistry, 50 (4), 300–305. https://doi. org/ 10.3103/s1068375514040024.
- Sergienko V. P., Bukharov S. N., Anisovich A. G., Merinov V. K., Abed N. S., Alexiev A. R. (2024) Effect of Treatment in a Magnetic Field on the Triboacoustic Characteristics of Copper-Containing Polymer Friction Composites. *Journal of Friction and Wear*, 45 (3), 123–131. https://doi.org/10.3103/ s1068366624700193.
- 14. Korotkevich Z. M., Matyuk V. F., Tsukerman V. L., Osipov A. A. (2013) A Device for Measuring the Magnetic Induction of Ferromagnetic Rods in the Process of Pulsed Magnetization and Magnetization Reversal. *Priborostroenie 2013: materialy 6-i Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Minsk, 20–22 noyab. 2013* [Instrument Engineering 2013: Proceedings of the 6th International Scientific and Technical Conference, Minsk, 20-22 November 2013]. Minsk, Belarusian National Technical University, 70–72 (in Russian).
- Anisovich A. G. (2016) The Art of Metallography: Using Optical Contrast Technique. Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series, (1), 36–42.
- Mirkin M. I. (1961) Handbook on X-Ray Diffraction Analysis of Polycrystals. Moscow, State Publishing House of Physical and Mathematical Literature. 862 (in Russian).
- 17. Zdor G. N., Tofpenets R. L., Anisovich A. G., Zaretskii I. A. (1995) Structure Formation in Copper under the Influence of A Pulsed Magnetic Field. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 59 (10), 65–71 (in Russian).
- Davydov S. V. (2007) Efficiency of Magnetic Pulse Processing. Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Bulletin of Bryansk State Technical University, (3), 89 (in Russian).
- Gurskii Z., Krawczyk J. (2003) The Role of Atomic Static Displacements in Binary-Alloy Formation. *Physica B: Condensed Matter*, 337 (1–4), 255–265. https://doi.org/10.1016/ s0921-4526(03)00412-5.
- Cayron C. (2015) Continuous Atomic Displacements and Lattice Distortion During Fcc-Bcc Martensitic Transformation. Acta Materialia, 96, 189–202. https://doi.org/10. 1016/j. actamat.2015.06.010.
- Peng F. (2006) Modulated Fluctuation of Atomic Displacement in a Crystal with a Single Impurity. *Physica B: Condensed Matter*, 373 (2), 194–197. https://doi.org/10.1016/j.physb.2005.11.166.
- Mikhailov Yu. N., Dubinin S. F. (2004) Long-Wavelength Static Atomic Displacements in γ-FeNi Alloys. *Physics of the Solid State*, 46 (12), 2185–2190. https://doi.org/10.1134/1.1841377.
- 23. Zhdanov G. S. (1961) *Solid State Physics*. Moscow, Moscow State University. 502 (in Russian).
- 24. Anisovich A. G., Marukovich E. I., Abramenko T. N. (2003) Changes in the Thermal state of Diamagnetic Metals in an Applied Magnetic Field. Russian Metallurgy (Metally), (6), 108–110 (in Russian).

Received: 31.10.2024 Accepted: 09.01.2025 Published online: 31.03.2025

Наука итехника. Т. 24, № 2 (2025) Science and Technique. V. 24, No 2 (2025)