

Модифицирование физико-механических свойств фрикционных композитов с полимерной матрицей воздействием модулированного по амплитуде высокочастотного электромагнитного поля

В. В. Ажаронок^а, А. Г. Анисович^б, В. В. Биран^с,
С. Н. Бухаров^с, В. П. Сергиенко^с, И. И. Филатова^а

^а Институт физики НАН Беларуси,
пр. Независимости, 68, г. Минск, 220072, Республика Беларусь, e-mail: azharonok@imaph.bas-net.by

^б Физико-технический институт НАН Беларуси,
ул. Купревича, 10, г. Минск, 220141, Республика Беларусь, e-mail: anna-anisovich@yandex.ru

^с Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси,
ул. Кирова, 32а, г. Гомель, 246050, Республика Беларусь, e-mail: sergienko_vp@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния высокочастотного электромагнитного поля на динамические механические и триботехнические свойства полимерных фрикционных композитов, используемых для автомобильных тормозов. Показано, что обработка электромагнитным полем в ряде случаев приводит к преобразованию надмолекулярной структуры полимерной матрицы композита. В случае обработки исходных для прессования порошковых композиций установлено значимое (до 20%) изменение динамического модуля упругости и трибологических свойств материалов после прессования в изделия. Обсуждаются вероятные механизмы влияния обработки импульсным высокочастотным электромагнитным полем на физико-механические свойства фрикционных материалов, а также их связь с виброакустической активностью узлов трения.

Ключевые слова: высокочастотное электромагнитное поле, фрикционные полимерные композиты, физико-механические свойства, трение, вибрация, шум.

УДК 621.891:621.894

ВВЕДЕНИЕ

Повышенная виброакустическая активность фрикционных узлов трения в тормозных устройствах и трансмиссиях машин является одной из наиболее трудноразрешимых проблем машиностроения [1, 2].

Известны методы, позволяющие существенно снизить вибрации и шум за счет уменьшения коэффициента трения фрикционных пар при введении в состав фрикционного материала модификаторов трения [3–6]. Однако такой подход имеет существенные ограничения для фрикционных устройств, где уменьшение коэффициента трения не возможно. В ряде случаев положительный эффект обеспечивают увеличение модуля упругости и снижение твердости трущихся пар [7], но чаще всего это недопустимо, так как приводит к ухудшению основных эксплуатационных характеристик тормозов машин – износостойкости фрикционного материала и фрикционной эффективности пары трения.

Теоретические исследования, выполненные на основе молекулярной динамики нелинейно-упругой конечно-растяжимой модели полимеров (*Finite Extension Nonlinear Elastic*), свидетельствуют о том, что снижение склонности фрикци-

онного материала к шуму при сохранении высокого и стабильного коэффициента трения может быть достигнуто при использовании в качестве матричной фазы фрикционного материала полимера с набором структурных параметров, оказывающих определяющее влияние на динамические механические свойства композитов [8–10].

В настоящее время не существует универсального подхода при выборе состава композита, обеспечивающего наилучшие показатели по всем характеристикам материала или возможность управления хотя бы одним свойством без изменения других. В связи с этим поиск новых подходов и способов изменения структуры и свойств композиционных материалов – актуальная, практически важная задача.

Одним из перспективных методов модификации структуры и свойств полимерных композиционных материалов для улучшения их эксплуатационных характеристик является применение различных физических воздействий на сами композиты или их компоненты.

Опубликованные литературные данные, включая результаты исследований авторов настоящей статьи, свидетельствуют о возможности трансформации структуры цветных металлов и неметаллических материалов при воздействии

на них импульсного электромагнитного поля. В частности, о повышении пластичности и дисперсности структуры меди и сплавов на ее основе [11, 12], снижение структурной упорядоченности природных полимеров (входящей в состав типографской бумаги целлюлозы) [13]. Установлены влияние магнитного поля на процессы в биологических объектах [14], характеристики водно-электролитных растворов и закристаллизованных расплавов [15]. Обнаружено влияние магнитного поля на оптические характеристики полимеров [16–20]. В частности, наблюдались изменения в поляризационных спектрах возбуждения и люминесценции полидифениленфталада [17], выявлены возникновение оптической активности в тонких пленках из эпоксидной смолы [19] и изменение оптической плотности полиэтиленовой пленки в поляризованном свете [18].

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования влияния воздействия модулированного по амплитуде высокочастотного электромагнитного поля (ВЧЭМП) на динамические механические и триботехнические свойства используемых при производстве тормозных устройств полимерных композиционных материалов, определяющих уровень излучаемого узлами трения акустического шума.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследований служили высоконаполненные фрикционные композиционные материалы на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), предназначенные для работы в узлах стационарного трения тормозных устройств. Матричную фазу модифицировали введением модификатора МФБМ (С14Н8О4N2). В качестве армирующих и дисперсных наполнителей использовали базальтовые волокна (БСТВ) диаметром 1–3 мкм, коллоидный графит (ГК-1), порошок диоксида титана, никеля (ПНЭ-1), бронзы (ПБ) и цинка (ПЦ). Содержание дисперсных наполнителей составляло 10 мас. %.

Тестируемые металлополимерные образцы изготавливали методом прессования с их последующей термической и механической обработкой. Прессование осуществляли при давлении 35 МПа, термообработку проводили в течение восьми часов при температуре $380 \pm 5^\circ\text{C}$. Композиты различались по составу и содержанию связующего и наполнителей, а также имели различия в технологических режимах формообразования. Испытаниям подлежали образцы из обработанных электромагнитным полем исходных для прессования порошковых композиций.

Исследования проводили на экспериментальном стенде, детализированное описание кото-

рого дается в [21]. Фрагмент стенда для исследований воздействия на материалы высокочастотного электромагнитного поля с частотой $f = 5,28$ МГц приведен на рис. 1.

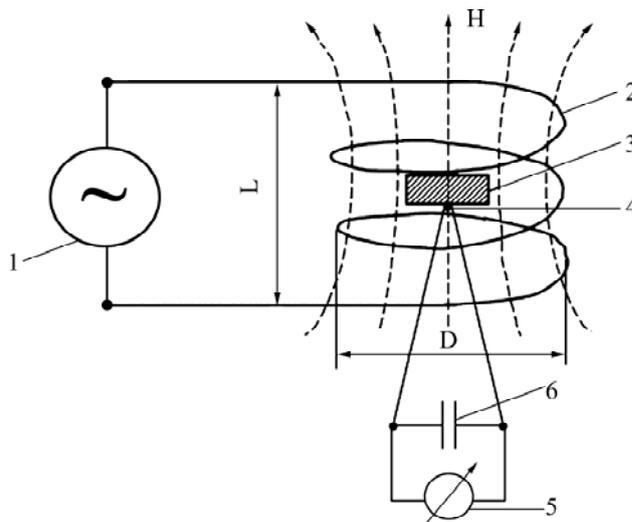


Рис. 1. Фрагмент схемы экспериментального стенда для воздействия ВЧЭМП на материалы: 1 – высокочастотный генератор; 2 – индуктор; 3 – обрабатываемый образец; 4 – термопара; 5 – вольтметр для измерения ЭДС термопары; 6 – конденсатор для защиты вольтметра 5.

Образцы помещались в осевую зону спиралеобразного индуктора 2 (высота $L = 90$ мм, диаметр $D = 80$ мм). Среднеквадратичные величины напряженности магнитной H и электрической E составляющих электромагнитного поля на оси индуктора контролировали с помощью измерителя напряженности высокочастотного поля ПЗ-15 с индикатором Я6П-110. Измеренные значения H и E составляли 590 А/м ($B \approx 0,74$ мТл, погрешность порядка 6%) и 12700 В/м (погрешность не превышала 4%) соответственно. Амплитудные значения $H^* = \sqrt{2}H$ и $E^* = \sqrt{2}E$ достигали 835 А/м ($B \approx 1$ мТл) и 17960 В/м соответственно. Воспроизводимость режимов работы генератора была не ниже 0,5%, вследствие чего суммарная погрешность определения величины электромагнитного поля, действующего на образец, не превышала 10%. С учетом конфигурации индуктора и геометрии расположения в нем образцов можно считать, что последние подвергались воздействию электромагнитного поля с соотношением и взаимной ориентацией магнитной и электрической компонент, характерной для «ближней зоны», формирующейся на расстояниях от источника излучения, значительно меньших длины волны электромагнитного поля. Проявление эффектов, связанных с возникновением микроразрядов между частицами наполнителя, при измеренных значениях напряженности электрического поля, по нашему мнению, было маловероятным.

Обработку проводили в воздухе при атмосферном давлении. Воздействие осуществлялось одним или несколькими пакетами импульсов ВЧЭМП, в каждом из которых амплитуда магнитной и электрической составляющих поля, осциллирующих по синусоидальному закону с периодом $\tau \approx 0,2$ мкс, сначала возрастала от 0 до максимальных значений H^* , E^* , а затем снова уменьшалась до 0 (рис. 2). Длительность отдельного пакета импульсов $\Delta t \approx 3$ с. Количество пакетов ($n = 1, 2, \dots, 6$) выбирали в зависимости от типа обрабатываемого образца.

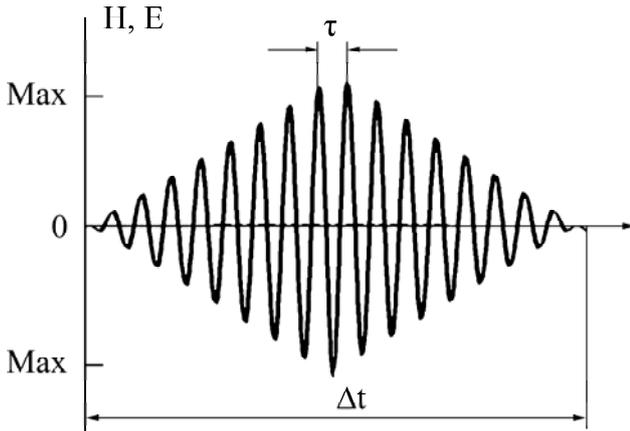


Рис. 2. Циклограмма обработки образцов высокочастотным электромагнитным полем.

Контроль температуры $T_{обр}$ образцов осуществляли с использованием термпары 4 (см. рис. 1) до их обработки ВЧЭМП и сразу после окончания воздействия. Достоверных изменений величины $T_{обр}$ не зарегистрировано.

В качестве критерия оценки уровня шума и склонности пары трения материалов к его возникновению служил показатель демпфирующей способности D , определяемый выражением $D = E_d \cdot \eta$ [2], где E_d и η — динамический модуль упругости и коэффициент потерь соответственно. При выборе критериев основывались на предположении о том, что одним из важнейших факторов, влияющим на возникновение неустойчивости трения на макроуровне, является способность трибосистемы к демпфированию тангенциальных фрикционных микроколебаний [9], а также на данных расчетов [22] и результатах выполненных ранее авторами экспериментальных исследований динамики фрикционного контакта [23], согласно которым повышение значений соответствующих параметров E_d и η позволяет снизить уровень виброакустического шума. Предложенный показатель демпфирующей способности при условии неизменности фрикционных характеристик пары трения позволяет осуществлять экспресс-оценку и прогнозирование виброакустической активности трибосопрежений, а также может использоваться как критерий

оптимизации динамических механических характеристик фрикционных материалов на стадии их проектирования [2].

Фрикционно-износные испытания проводили на лабораторном трибометре СМТ-1 по схеме «вал — частичный вкладыш» при стационарных режимах трения (рис. 3). Давление в узле трения трибометра варьировалось в диапазоне 0,5–2,5 МПа; линейная скорость скольжения 0,5–2,5 м/с. Материал контртела — высокоуглеродистая сталь 65Г (ГОСТ 14959-79) с твердостью HRCэ 35–37 и шероховатостью поверхности $R_a \leq 1,25$ мкм. Испытания осуществляли при температуре окружающего воздуха 295 ± 2 К в условиях трения без смазочного материала. Линейную интенсивность изнашивания I_h при заданных нагрузочно-скоростных режимах стационарного трения определяли по изменению массы Δm изношенного слоя:

$$I_h = \frac{\Delta m}{\rho A_a S}, \quad (1)$$

где ρ — плотность истираемого материала; A_a — номинальная площадь контакта; S — путь трения. Относительная погрешность определения I_h не превышала 20%.

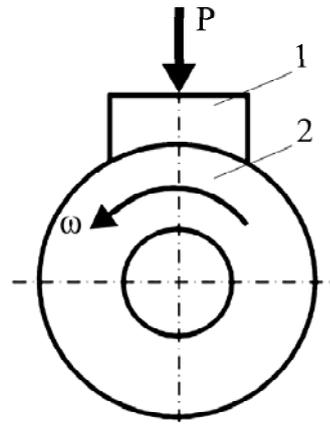


Рис. 3. Схема триботехнических испытаний «вал — частичный вкладыш»; 1 — образец фрикционного материала; 2 — контртело.

Динамические механические характеристики образцов (динамический модуль упругости и коэффициент механических потерь) изучали методом резонансных амплитуд на виброиспытательной системе TV51220 (Tira) в диапазоне статических нагрузок 0,014–1,0 МПа. Метод резонансных амплитуд основан на определении параметров динамической модели вязкоупругого тела (модель Фойхта-Кельвина) при продольных колебаниях образца (рис. 4а). Схема измерительной установки представлена на рис. 4б.

Динамический модуль упругости E_d материала в соответствии с используемой схемой измерений рассчитывали по формуле

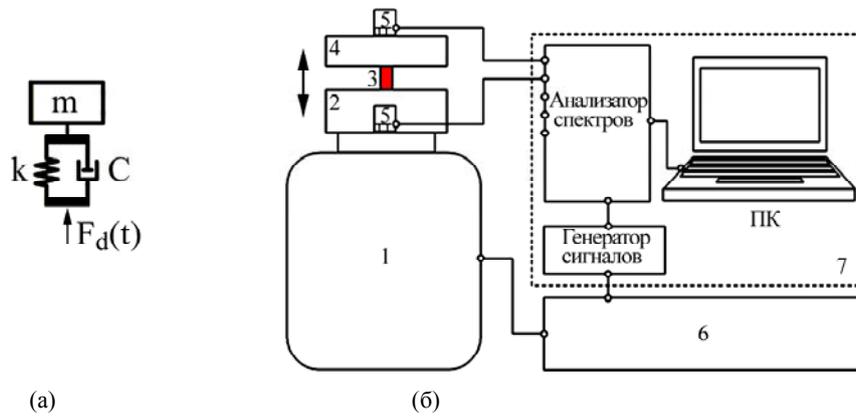


Рис. 4. Определение динамических характеристик образцов методом резонансных амплитуд: колебательная система с одной степенью свободы на основе модели вязкоупругого поведения материалов Фойхта-Кельвина (а); схема измерительной установки (б): 1 – вибростенд; 2 – столик; 3 – образец; 4 – груз; 5 – акселерометр; 6 – усилитель мощности; 7 – система сбора и анализа данных.

Таблица 1. Влияние обработки ВЧЭМП на фрикционно-износные характеристики композитов

Используемый наполнитель	Коэффициент трения			Линейная интенсивность изнашивания, $I_h \cdot 10^{-9}$		
	Без обработки	2 пакета импульсов	4 пакета импульсов	Без обработки	2 пакета импульсов	4 пакета импульсов
Исходный материал (ПТФЭ)	0,29	0,32	0,31	268	281	265
Диоксид титана (TiO ₂)	0,39	0,39	0,38	623	526	487
Графит (ГК-1)	0,23	0,23	0,24	101	84	84
Порошок цинка (ПЦ)	0,30	0,29	0,30	14	17	15
Порошок никеля (ПНЭ-1)	0,35	0,35	0,35	60	34	31
Кокс + малеимид (МФБМ)	0,34	0,34	0,34	7,9	5,7	5,3
Порошок бронзы (БПО)	0,28	0,28	0,28	35,4	31,3	38,4

Таблица 2. Влияние высокочастотной электромагнитной обработки на динамические механические свойства фрикционных композитов

Используемый наполнитель	Коэффициент потерь η			Динамический модуль упругости E_d , ГПа		
	Без обработки	2 пакета	4 пакета	Без обработки	2 пакета	4 пакета
Исходный материал (ПТФЭ)	0,075	0,075	–	0,52	0,57	–
Диоксид титана (TiO ₂)	0,062	0,077	0,076	0,60	0,52	0,56
Графит (ГК-1)	0,073	0,074	0,073	0,68	0,72	0,73
Порошок цинка (ПЦ)	0,065	0,061	0,062	0,83	1,01	0,99
Порошок никеля (ПНЭ-1)	0,070	0,066	0,068	0,88	0,92	0,86
Кокс + малеимид (МФБМ)	0,062	0,060	0,061	0,93	1,01	1,10
Порошок бронзы (БПО)	0,056	0,056	0,056	0,95	0,89	0,80

$$E_d = \frac{4\pi^2 f_p m h}{S}, \quad (2)$$

где m – масса груза, кг; h – высота образца под нагрузкой, м; S – площадь образца, м².

Коэффициент потерь η определяли из выражения

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2 - 1}}, \quad (3)$$

где a_1 и a_2 – среднеквадратические значения виброускорений, м/с², регистрируемые на столе вибровозбудителя и грузе соответственно.

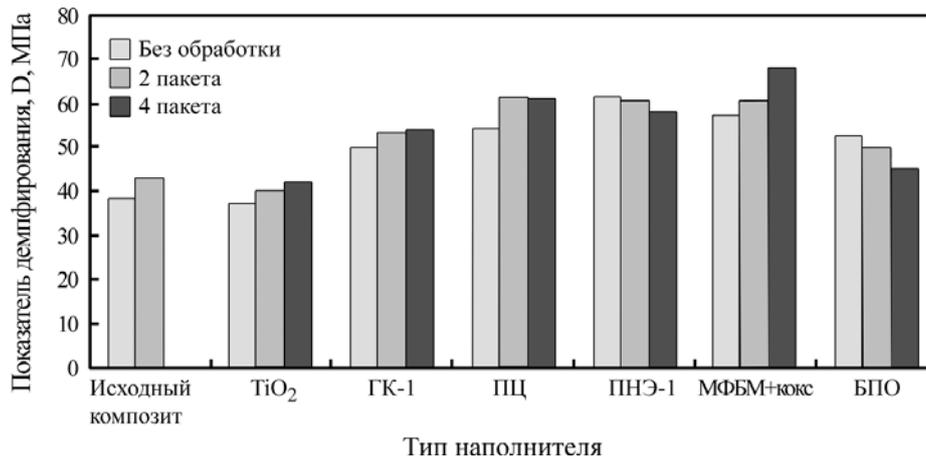


Рис. 5. Влияние обработки ВЧЭМП на показатель демпфирования композитов различного состава.

Испытания материалов проводили при температуре 295 ± 2 К. Время выдержки образцов под нагрузкой составляло 30 с. Одновременно испытывали по одному образцу. Наибольшие оцененные значения неопределенности E_d и η не превышали 10 и 5% соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты фрикционно-износных испытаний образцов полимерных композитов, полученных из обработанных магнитным полем порошковых композиций, отличающихся типом наполнителя, представлены в табл. 1. Приведенные данные получены при контактном давлении 2,0 МПа и линейной скорости скольжения 1,0 м/с.

Из таблицы видно, что значения коэффициента трения для исходных и модифицированных ВЧЭМП образцов существенно не отличаются. В то же время интенсивность изнашивания в результате воздействия электромагнитного поля изменяется и зависит от состава и типа используемых дисперсных наполнителей.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что обработка ВЧЭМП композитов с углеродсодержащими наполнителями, никелем и диоксидом титана повышает износостойкость, а использование переходных металлов и их сплавов не влияет (порошок цинка) или приводит к интенсификации (порошок бронзы) процессов изнашивания.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о возможности увеличения износостойкости металлополимерных композитов и, следовательно, эксплуатационной эффективности изготавливаемых из них фрикционных узлов трения путем их обработки ВЧЭМП.

Результаты экспериментальных исследований влияния ВЧЭМП на динамический модуль упругости E_d и коэффициент потерь η полимерных композиционных материалов (группа II) приведены в табл. 2.

Полученные данные свидетельствуют о том, что обработка ВЧЭМП неотформованных порошковых композиций изменяет (до 20%) динамические механические характеристики исходного материала. Как и при интенсивности изнашивания, влияние ВЧЭМ на динамические механические характеристики композитов неоднозначно: в зависимости от состава и типа дисперсных наполнителей наблюдается как увеличение значений исследуемых показателей, так и их снижение. Показатель демпфирования, рассчитанный на основании экспериментальных данных по динамическим характеристикам, для большинства исследованных материалов находится в прямой зависимости от E_d , поскольку статистически значимое влияние обработки ВЧЭМП на коэффициент потерь установлено только для случая наполнения композита порошковым диоксидом титана (рис. 5).

Предполагаемый механизм изменения величины E_d при воздействии на материалы ВЧЭМП заключается в изменении молекулярной (сегментальной) подвижности макроцепей полимерного компонента, сопровождающегося усилением или ослаблением межмолекулярного и межфазного взаимодействия. Таким образом, влияние обработки ВЧЭМП на уровень акустического излучения узлов трения проявляется через изменение показателя демпфирования фрикционных композитов. Эти данные согласуются с описанным выше механизмом возбуждения высокочастотного (выше 1 кГц) акустического излучения в тормозных системах [9, 23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о возможности повышения износостойкости композиционных материалов с полимерной матрицей, содержащих наполнители с кристаллической структурой, в результате их обработки высокочастотным электромаг-

нитным полем. Предполагается, что при воздействии поля происходит изменение сегментальной подвижности модифицированной полимерной матрицы. При этом возможно частичное разрушение крупных кристаллических образований (фрагментов надмолекулярной структуры) как в структуре наполнителя, так и связующего полимерной матрицы. Модифицированный композит характеризуется повышенной износостойкостью по сравнению с исходным материалом.

Согласно результатам проведенных динамических механических испытаний, воздействие ВЧЭМП может способствовать повышению динамического модуля упругости при неизменных фрикционных характеристиках композита, что представляет особый интерес для развития новых технологий обработки полимерных композитов, позволяющих повышать ресурс фрикционных изделий и снижать уровень высокочастотного тормозного шума.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abendroth H. Worldwide Brake-Friction Material Testing Standards, Challenges, Trends. *Proceedings of the 7th International Symposium of Friction Products and Materials "Yarofri-2008"*. Yaroslavl, 2008, P. 140–150.
2. Sergienko V.P., Bukharov S.N. Material Science Approach to Reduce Vibration and Noise at the Unsteady Friction processes. *Proceedings of the 8th International Symposium of Friction Products and Materials "Yarofri-2010"*, Yaroslavl (2010), P. 81–92, 2010.
3. Lewis T. and Shah P. Analysis and Control of Brake Noise. *SAE Technical Paper 872240*, 1987, doi:10.4271/872240.
4. Ghesquiere H. Brake Squeal Noise Analysis and Prediction. *Proceedings of the XXIV FISITA Congress. 7–11 June 1992, London*, P. 175–181.
5. Schmalfluss C. *Theoretische und Experimentelle Untersuchung von Scheibenbremsen*. Doctoral thesis, VDI Fortschritt-Bericht Reihe 12, Nr. 494, 2002.
6. Ahmed I. On the Analysis of Drum Brake Squeal Using Finite Element Methods Technique. *SAE paper 2006-01-3467*, 2006, doi:10.4271/2006-01-3467.
7. Sergienko V.P., Bukharov S.N., Kupreev A.V. A Study of the Influence of Structure of Composite Materials on the Vibration of Frictional Pairs. *Proceedings of the 10th International Conference on Tribology "SERBIATRIB'07"*, P. 85–88, 2007.
8. Nishiwaki M. et al. A Study on Friction Materials for Brake Squeal Reduction by Nanotechnology. *SAE paper 2008-01-2581*, 2008, doi:10.4271/2008-01-2581.
9. Sergienko V.P., Bukharov S.N. Formula and Structure Effect of Frictional Materials on their Damping Properties and NVH Performance of Friction Joints. *SAE Paper 2009-01-3016*, 2009, doi:10.4271/2009-01-3016.
10. Jang H., Lee J.S., Fash J.W. Compositional Effects of the Brake Friction Material on Creep Groan Phenomena. *Wear 251* (2001) P. 1477–1483, 2001.
11. Анисович А.Г., Марукович Е.И., Абраменко Т.Н. Изменение теплового состояния диамагнитных металлов под воздействием магнитного поля. *Металлы (Известия РАН)*, 2003, (6), 108–110.
12. Anisovich H.G. Method of Nonthermal Changing the Structure of Nonferromagnetic Metals and Non-metallic Phases. *Материалы совместного Корейско-Евразийского семинара (Сеул)*. Ноябрь 2008 г. С. 166–171.
13. Ажаронок В.В., Филатова И.И., Вошула И.В., Длугунович В.А. и др. Изменение оптических свойств бумаги под влиянием магнитной составляющей высокочастотного электромагнитного поля. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2007, 74(4), 421–426.
14. Биологические эффекты электромагнитных полей. Пушино: НЦБИ АН СССР, 1986. 150 с.
15. Кокшаров С.А. Развитие метода магнитно-химической активации процессов красильно-отделочного производства. <http://www.ibiblio.org/textile/jtexchem/koi/1998n1/paper16/paper16.htm>.
16. Персидская А.Ю., Кузеев И.Р., Антипин В.А. О влиянии импульсного магнитного поля на механические свойства волокон. *Химическая физика*. 2002, 21(2), 90.
17. Антипин В.А., Остахов С.С., Персидская А.Ю., Гилева Н.Г., Салазкин С.Н., Казаков В.П. Изменение степени поляризации люминесценции хелатных комплексов Eu(III) в полимерной матрице при ее формировании в постоянном магнитном поле. *Proceedings of the VI Conference "Physics and Chemistry of Elementary Chemical Processes"*, 2002, Novosibirsk. P. 123–127.
18. Белый В.А., Снежков В.В., Безруков С.В. и др. О структурной упорядоченности расплавов полиэтилена в магнитном поле. *ДАН СССР*. 1988, 302(2), 355.
19. Молчанов Ю.М., Родин Ю.П., Кисис Э.Р. Воздействие неоднородного постоянного магнитного поля на свойства полимеров. *Механика полимеров*. 1976, (5), 916.
20. Kimura T., Yamato M., Koshimizu W., Kawai T. Magnetic-field Induced Orientation of Paraffin. *Chemistry Letters*. 1990, (10), 1057.
21. Ажаронок В.В., Кратько Л.Е., Некрашевич Я.И., Филатова И.И., Мельникова Л.А., Дудчик Н.В., Янецкая С.А., Болога М.К. Исследования бактерицидного действия плазмы высокочастотного емкостного и барьерного разрядов на микроорганизмы. *ИФЖ*. 2009, 82(3), 425–432.
22. Ostermeyer G.P. On Tangential Friction Induced Vibrations in Brake Systems. *SAE Paper 2008-01-2850*, 2008, doi:10.4271/2008-01-2850.

23. Sergienko V.P., Bukharov S.N. Effect of Dynamic Mechanical Characteristics of the Frictional Materials on Friction-induced Vibration and Noise of the Tribounits. *J of Research and Development in Mechanical Industry*. 2009, **1**(2), 190–195.

Посмунна 29.07.13

Summary

The paper presents the results of experimental studies of the effect of a high-frequency electromagnetic field on physico-mechanical and tribotechnical properties of polymeric frictional composites used for automotive brakes. It is shown that treatment by an electromagnetic field, in

some cases, results in the transformation of the supramolecular structure of the polymer. In case of the treatment of the initial powder compositions, there is an evident change (up to 20%) of the dynamic modulus of elasticity and tribological properties of the finished materials. Possible mechanisms of the effect of the pulsed high-frequency electromagnetic treatment on the physico-mechanical properties of the friction materials and their relation to the acoustic noise of tribounits are discussed.

Keywords: high-frequency electromagnetic field, friction polymer composites, physico-mechanical properties, friction, vibration, noise.