

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.891

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-11-4-11

В.П. Тихомиров, А.О. Горленко, С.Г. Волохов, М.А. Измеров

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПАР ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ФРИКЦИОННЫМ ГАСИТЕЛЯМ КОЛЕБАНИЙ

Исследовано влияние магнитного поля на свойства трущихся стальных поверхностей при испытании по схеме «палец-диск». Экспериментально доказано влияние электрического магнитного поля на фрикционный контакт с обоснованием механизма его воздействия, а также выделены результаты, приводящие к положительным эффектам для пар трения.

Методы исследования – проведение лабораторных физических экспериментов на лабораторной установке.

Результаты исследования и новизна - установлено влияние магнитного поля на величину силы трения, коэффициента скольжения и интенсивности изнашивания трущихся поверхностей.

Вывод – представляется возможным управлять процессом трения с помощью воздействия магнитным полем.

Ключевые слова: трение, скольжение, коэффициент, магнитное поле, фрикционный гаситель колебаний, износ.

V.P. Tikhomirov, A.O. Gorlenko, S.G. Volokhov, M.A. Izmerov

MAGNETIC FIELD IMPACT UPON TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF SLIDING FRICTION PAIRS WITH RESPECT TO FRICTION SHOCK ABSORBERS

The purpose of the work is to examine magnetic field impact upon properties of friction steel surfaces at “pin-disc” tests. The magnetic field impact upon a friction contact with the substantiation of the mechanism of its impact is proved experimentally, and also the results bringing to positive effects for friction pairs are emphasized.

The analysis of experiment results has shown that a friction factor can be increased by 88% as compared with the version without magnetic field impact upon friction pair. At that under the magnetic field impact wear intensity becomes less for about half, and also friction surfaces quality becomes better as compared with the tests without a magnetic field as there are no vivid traces of plowing that is explained with the

wear particles elimination from the friction area under the magnetic field impact.

The investigation methods: the fulfillment of laboratory physical experiments with the use of the developed and patented laboratory plant according to the “pin-disc” scheme.

The investigation results and novelty: the magnetic field impact upon a value of friction force, a factor of slip and wear intensity of friction surfaces is determined.

The conclusion: it is possible to control a friction factor and wear intensity through the magnetic field impact upon a friction contact.

Key words: friction, sliding, factor, magnetic field, friction shock absorber, wear.

Введение

Трение скольжения характеризуется преобразованием кинетической энергии в тепловую. Выделение тепла приводит к активизации химических процессов, приводящих к трансформации поверхностных слоев и формированию пленок разной природы. Анализ литературных источников показал, что магнитное поле оказывает существенное влияние на трение и изнашивание, однако это влияние неоднозначно. В одних случаях трение растет, а в дру-

гих – снижается. Четких рекомендаций, позволяющих управлять трением, не существует, что определяется неизвестностью закономерностей влияния магнитного поля на процессы трения. Предполагается, что воздействие магнитного поля на коэффициент трения в зависимости от напряженности магнитного поля и направления вектора магнитной индукции будет либо увеличивать величину коэффициента трения

при прочих равных условиях, либо ее ослаблять.

В технике вообще и в подвижном составе в частности, большое распространение получили гасители колебаний на основе сухого трения – фрикционные. Библиографические исследования показали [1, 5], что для работы фрикционных гасителей обычно характерны повышенный износ деталей, ударные нагрузки, возможные заклинивания и значительная нестабильность коэффициента трения, что является причинами снижения общей надежности

узла. Принципиально новым направлением в совершенствовании динамических показателей работы фрикционных гасителей колебаний является управление силой их сопротивления в зависимости от характеристик колебательных процессов наддрессорного механизма. Такая возможность возникает при введении в конструктивное решение фрикционных гасителей колебаний магнитного поля с воздействием на зону трения и обратной связью по его величине [3-7].

Экспериментальное исследование влияния магнитного поля на трибосистему

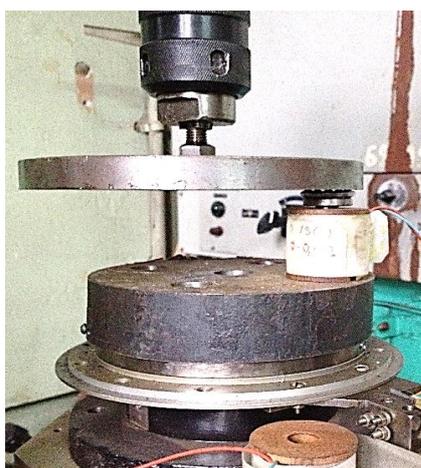
Объектом исследования являются пары трения «сталь – сталь» применительно к парам скольжения фрикционных гасителей колебаний рессорного подвешивания транспортных средств. На рис. 1а представлена лабораторная установка для проведения испытаний фрикционной пары «палец-диск», которая отражает физические условия указанного выше процесса трения, с возможностью воздействия на фрикционный контакт магнитного поля по представленным на рис. 1б схемам: трение без воздействия магнитного поля на фрикционный контакт, с воздействием магнит-

ного поля одной катушки, с установленным дополнительно магнитопроводом и с установленной на дополнительном магнитопроводе дополнительной катушки.

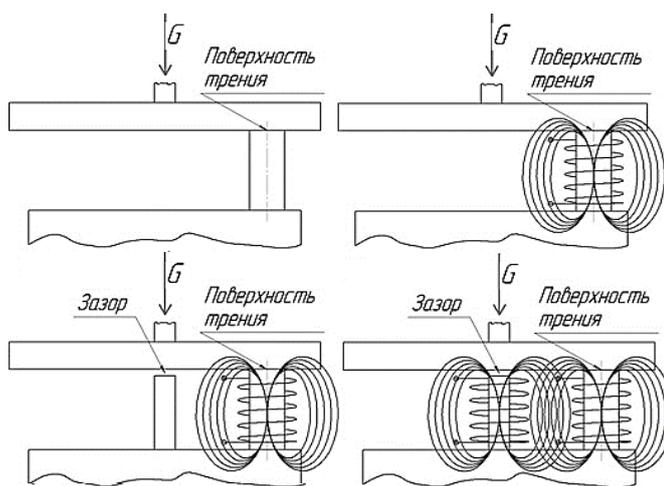
Математическая модель, описывающая связь коэффициента трения от давления при отсутствии магнитного поля для пары трения «палец-диск», может быть приближенно представлена линейной зависимостью:

$$f = a - kp.$$

Здесь p – давление в МПа; коэффициент k зависит от наличия или отсутствия магнитного поля.



а)



б)

Рис. 1. Испытание пары трения «палец-диск»: а – лабораторная установка; б – схемы режимов испытаний

На рис. 2 приведена осциллограмма реализации процесса трения (зависимость силы трения от времени) без воздействия

магнитного поля при разных контактных нагрузках на палец (50, 60, 75 Н, что соответствует давлениям 160, 190, 250 кПа).

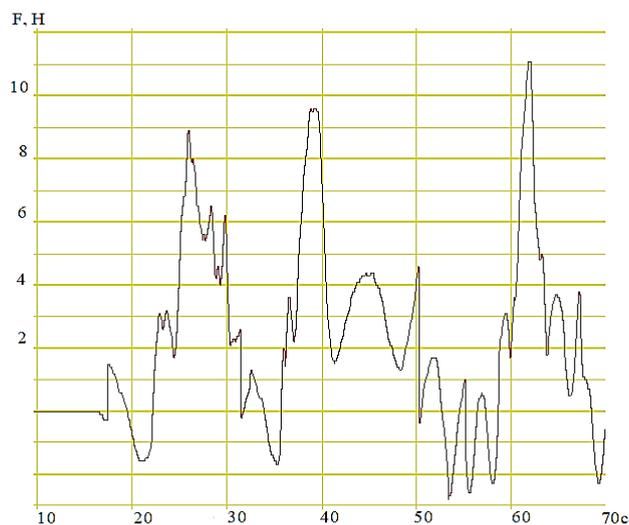


Рис. 2. Осциллограмма изменения во времени силы трения при разных нагрузках и при отсутствии магнитного поля

Так, для представленного на рис. 2 процесса трения зависимость коэффициента трения от давления выражается уравнением

$$f = 0,234 - 0,35p.$$

Коэффициент корреляции составил $r = -0,9181$. При этом видно, что характер изменения силы трения зависит от нагрузки в пределах принятого диапазона ее изменения. При малой нагрузке трение скольжения сопровождается значительной амплитудой изменения силы трения, в то время как при большей нагрузке амплитуда силы трения существенно меньше. Падающая зависимость коэффициента трения от давления характерна для преимуще-

ственно упругого контакта пары «сталь – сталь». Обращает на себя внимание тот факт, установленный в результате проведенного эксперимента, что в пределах диапазона изменения давления от 160 до 250 кПа коэффициент трения снижается с 0,178 до 0,146. При росте давления определяющим в снижении коэффициента трения является вклад первого слагаемого, характеризующего молекулярное взаимодействие элементов пары трения.

На рис. 3а приведены данные эксперимента при дополнительном воздействии магнитного поля одной катушки на палец с током в 1 А.

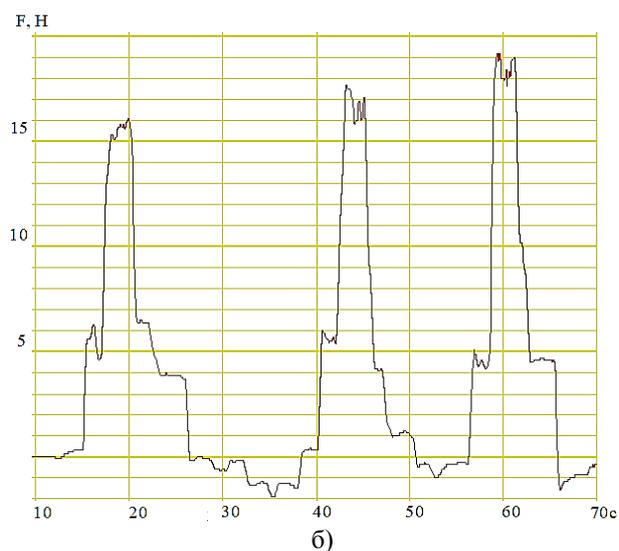
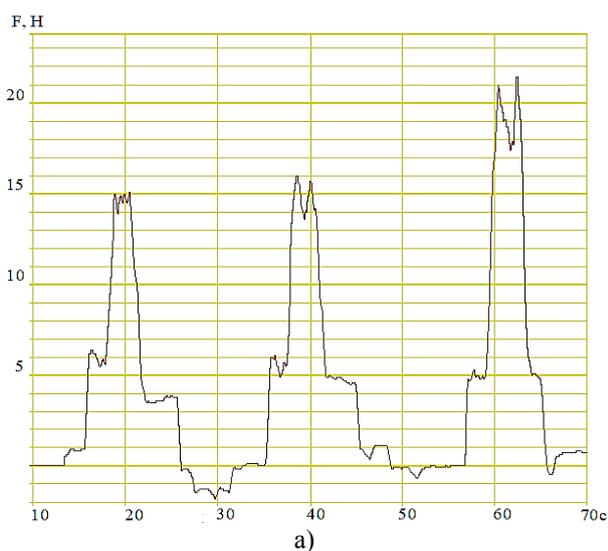


Рис. 3. Осциллограмма изменения во времени силы трения при разных нагрузках на палец:
а – магнитное поле создано постоянным током в катушке 1 А;
б – установлен дополнительный магнитопровод в системе

При этом наблюдаем, что происходит существенное увеличение силы трения. Как и в случае трения без магнитного поля при росте нагрузки эффект трения со скачками амплитуды (*stick – slip effect*) уменьшается. Изменение коэффициента трения для данной схемы подвода магнитного поля также носит падающий характер. В пределах того же диапазона контактного давления коэффициент трения снижается от 0,32 до 0,247, что больше, чем в результате эксперимента без магнитного поля (с 0,178 до 0,146) на 68 %.

Уравнение регрессии (математическая модель) при этом имеет вид

$$f = 0,45 - 0,81p.$$

На рис. 3б показана осциллограмма изменения силы и коэффициента трения во времени при добавлении в схему центрального стержня с малым зазором от поверхности трения (дополнительный магнитопровод в системе). При этом видно, что сила трения немного уменьшилась из-за воздействия магнитного поля на палец, но

коэффициент трения стал еще более стабильным, хотя и немного уменьшается с увеличением нагрузки. Изменение коэффициента трения для данной схемы подвода магнитного поля также носит падающий характер. В пределах того же диапазона контактного давления коэффициент трения снижается от 0,3 до 0,25, что больше, чем результаты эксперимента без магнитного поля (с 0,178 до 0,146) на 36 %.

На рис. 4а представлена осциллограмма изменения во времени силы и коэффициента трения при *последовательном* подключении двух катушек. При этом происходит сложение магнитных полей (создаваемых каждой катушкой) с учетом конструктивного зазора между ними и соответствующего воздействия изменения величины силы трения при стабилизации коэффициента трения.

На рис. 4б представлена осциллограмма изменения во времени силы и коэффициента трения трибосистемы при *параллельном* подключении двух катушек.

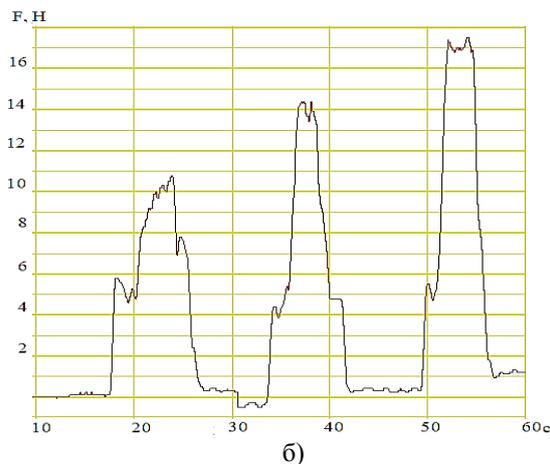
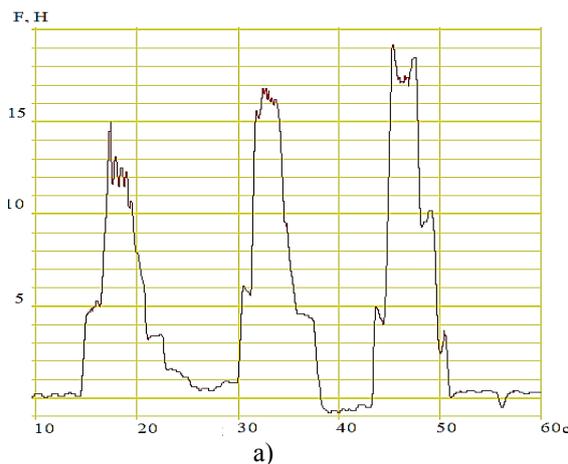


Рис. 4. Осциллограмма изменения во времени силы и коэффициента трения при разных нагрузках на палец, дополнительном магнитопроводе в системе и подключении катушек при токе в них 1 А:
а - последовательное подключение; б - параллельное подключение

При параллельном подключении каждая катушка создает свое магнитное поле, и в этом случае суммарное увеличение общего магнитного потока обратно пропорционально. При этом наблюдается также рост и силы, и коэффициента трения при его лучшей стабилизации. В пределах того же диапазона контактного давления и силы тока при последовательном и параллельном подключении катушек коэффициент трения увеличивается от 0,21 до 0,267, что больше, чем результаты эксперимента

без магнитного поля (с 0,178 до 0,146) на 44 %.

При последовательном подключении две катушки подключаются таким образом, чтобы магнитные потоки в верхней части магнитной цепи (зона контакта) были направлены в одну сторону. Таким образом, концентрация силовых линий магнитного потока в верхней части магнитной цепи больше, чем в нижней.

На рис. 5 представлены осциллограммы изменения силы и коэффициента

трения от величины тока в катушке поэтапно при 1, 1.5, 3, 4.5, 6 и 7.5 ампер. Зависимость коэффициента трения исследовалась при последовательном изменении силы тока в катушке и разных контактных нагрузках на палец (50, 60, 75 Н, что соответствует давлениям 160, 190, 250 кПа), при этом в начале эксперимента проводилась предварительная тренировка образца путем его намагничивания в течение 1 минуты (первый пик).

В среднем по всем испытаниям наблюдается рост коэффициента трения с ростом силы тока в катушках. Коэффициент трения увеличивается по всем опытам от 0,2 до 0,467, что выше, чем результаты эксперимента без магнитного поля (от 0,178 до 0,146) на 88 %. Это указывает на существенное влияние величины силы тока как стабилизирующего фактора для силы и коэффициента трения и возможность

его использования в технических решениях в исследованном диапазоне.

Процессы, протекающие в межконтактной зоне трения (формирование оксидного слоя и его разрушение, дробление частиц износа (диспергирование), вынос частиц из зоны и др.) оказывают существенное влияние на интенсивность изнашивания. Но некоторые исследователи считают, что магнитное поле непосредственно не влияет на трение и изнашивание материалов. Оно оказывает влияние на процессы, связанные с взаимодействием магнитного поля с заряженными частицами, интенсифицируя в данном случае процесс повышенного образования активных центров на поверхности трения, что, в свою очередь, приводит к росту сопротивления относительно движению элементов пары трения.

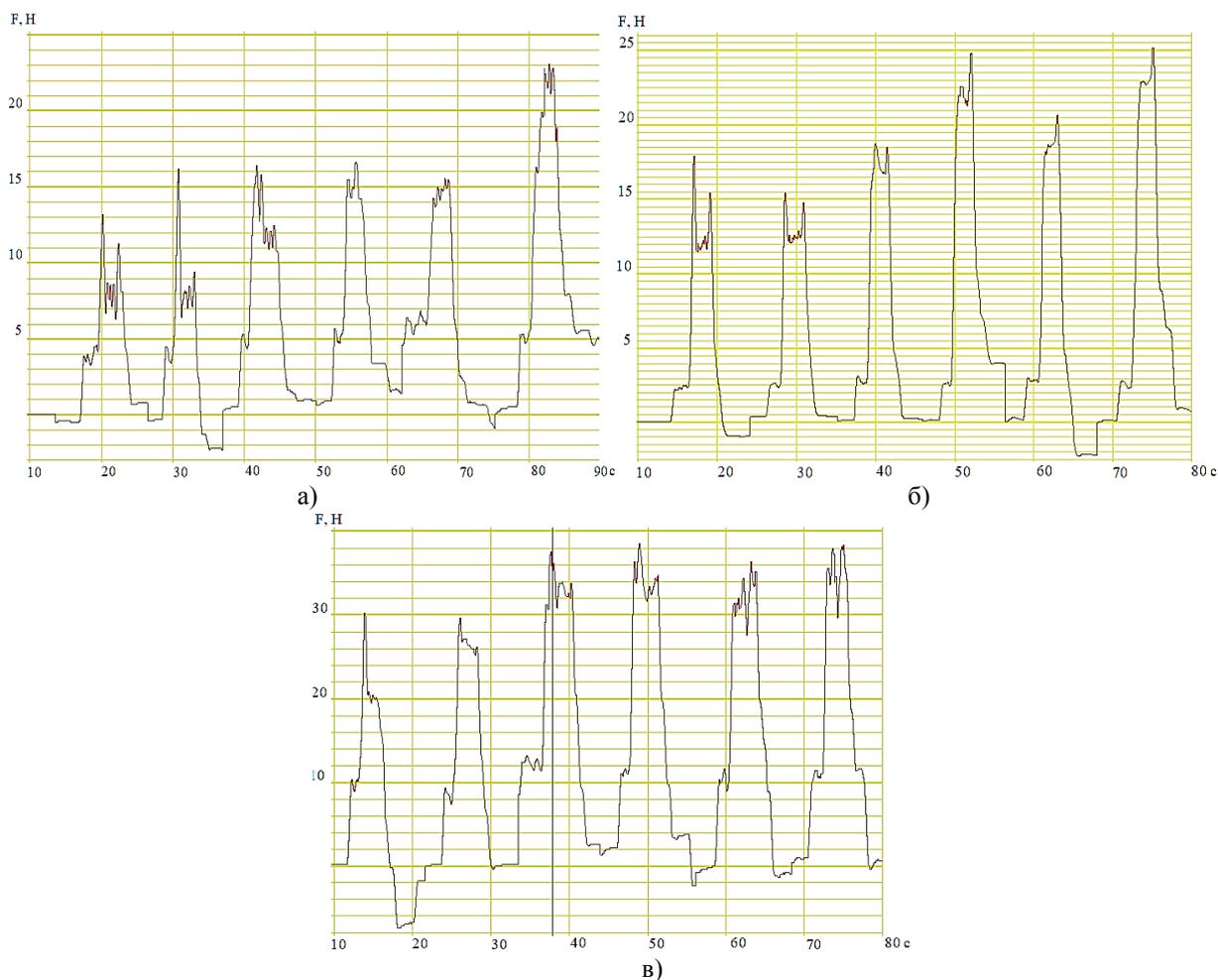


Рис. 5. Осциллограмма изменения во времени силы и коэффициента трения при силе тока соответственно 1, 1.5, 3, 4.5, 6 и 7.5 ампер и при нагрузке на палец: а - 50 Н (давление 160 кПа); б - 60 Н (190 кПа); в - 75 Н (250 кПа)

Процесс образования оксидной пленки не является ведущим, так как её возникновение на поверхности трения компенсируется её износом. К тому же вероятность образования активных центров бу-

дет выше, чем образование оксидов (рис. 6). Продуктами износа являются оксидные частицы черного цвета, которые под действием магнитного поля выносятся из зоны трения.

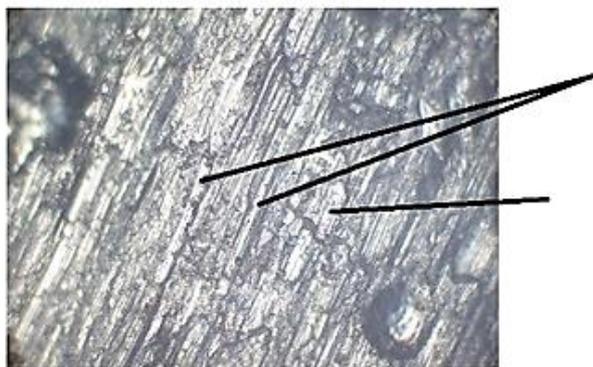


Рис. 6. Продукты износа

Основные результаты испытаний пар трения «палец-диск»

Приведем результаты некоторых исследований влияния магнитного поля на поведение узла трения путем придания образцам новых свойств за счет намагничи-

вания. На рис. 7 представлены микрофотографии стальной поверхности трения при разном увеличении после приработки по схеме «палец – диск».



а)



б)

Рис. 7. Микрофотографии стальной поверхности трения после приработки по схеме «палец – диск» при увеличении $\times 125$:
а - без магнитного поля; б - с магнитным полем

На рис. 7а видны следы пропахивания и намазывания вследствие пластического деформирования микронеровностей и переноса их на контртело при испытании без магнитного поля, а также видно их отсутствие при испытании с воздействием магнитного поля (7б).

Результаты испытаний на изнашивание пальца (схема «палец – диск») пред-

ставлены в таблице. Интенсивность изнашивания при воздействии магнитного поля меньше на 49,7 %, чем при испытаниях без воздействия магнитного поля. Влияние магнитного поля сказывается на интенсификации процесса окисления поверхности и формирования оксидной пленки. Наблюдаемое увеличение коэффициента трения и снижение износа можно объяснить разру-

шением тонкой оксидной пленки и взаимодействием ювенильных поверхностей, при этом частицы износа уносятся из зоны

трения под действием магнитного поля, снижая абразивное воздействие.

Таблица

Износ (весовой) и интенсивность изнашивания I_m как отношение
веса износа к пути трения образцов

	Вес	Износ весовой	Время испытания	Интенсивность изнашивания
Без воздействия магнитного поля	128,75 г. 127,95 г.	0,8 г.	60 мин.	$I_m = 2,65 \cdot 10^{-4}$ г/м
При воздействии магнитного поля	128,51 г. 128,06 г.	0,45 г.	60 мин	$I_m = 1,77 \cdot 10^{-4}$ г/м

Заключение

Анализ результатов показал, что при одних и тех же значениях силы тока при воздействии магнитного поля одной катушки коэффициент трения по сравнению с испытаниями без воздействия магнитного поля увеличивается на 68 %. При добавлении в схему центрального стержня с малым зазором от поверхности трения для замыкания магнитопровода коэффициент трения увеличивается на 36 %, а при последовательном и параллельном подключении сразу двух катушек в среднем коэффициент трения увеличивается на 44 %.

Таким образом, в среднем по всем испытаниям наблюдается рост коэффициента трения с ростом силы тока в катушках до 88 %. Увеличение давления на образец и силы тока в магнитной катушке при скользящем контакте приводит к стабилизации и достижению максимума коэффициента трения в диапазоне режимов проведенных испытаний. Можно обоснованно предположить, что указанные параметры ведут к повышенной диссипации энергии при трении.

Также экспериментально подтверждено, что продукты износа в виде оксидных частиц черного цвета под действием магнитного поля выносятся из зоны трения. Это объясняется тем, что оно оказывает влияние на процессы, связанные с взаимодействием магнитного поля с заряженными частицами, интенсифицируя в данном случае процесс повышенного образования активных центров на поверхно-

сти трения, что приводит не только к увеличению числа дислокаций и их перераспределению, но также изменению расположения и взаимодействия точечных дефектов кристаллической решетки. Интенсификация выхода дислокаций на стальную деформируемую поверхность касания, приводящая к росту количества активных центров, способствует формированию фрикционных молекулярных связей.

Сравнение микроструктуры поверхности после испытаний на изнашивание показывает, что после приработки при воздействии магнитного поля качество поверхности лучше по сравнению с испытаниями без магнитного поля (отсутствуют ярко выраженные следы пропахивания), что объясняется выводом из зоны трения под действием магнитного поля частиц износа. И как показали испытания на изнашивание при скользящем контакте, интенсивность изнашивания при воздействии магнитного поля меньше на 49,7%, чем при испытаниях без воздействия магнитного поля. Уменьшение интенсивности изнашивания связано с удалением частиц износа из зоны трения при воздействии внешнего магнитного поля и снижения интенсивности абразивного изнашивания, а также с увеличением радиусов закругления вершин микровыступов при воздействии магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Войнов, К.Н. Надежность вагонов / К.Н. Войнов. - М.: Транспорт, 1989.

2. Волохов, С.Г. Использование физических эффектов при создании узлов транспортных машин / С.Г. Волохов // Новые горизонты: мате-

- риалы V междунар. науч.-практ. конф. - 2018. - С. 29-31.
3. Гаркунов, Д.Н. О природе повышения износостойкости деталей и инструмента магнитной обработкой / Д.Н. Гаркунов, Г.И. Суранов, Г.Б. Коптяева // Трение и износ. - 1982. - Т. 3. - № 2. - С. 327-330.
 4. Диков, А.Г. Исследование влияния магнитного поля на трение и износ / А.Г. Диков, Е.А. Борисова, В.В. Зелинский // Успехи современного естествознания. - 2012. - № 6. - С. 73-74.
 5. Лукин, В.В. Конструирование и расчет вагонов / В.В. Лукин, Л.А. Шадур, В.Н. Котуранов, А.А. Voinov, K.N. *Car Reliability* / K.N. Voinov. – М.: Transport, 1989.
 2. Volokhov, S.G. Physical effect use at creation of transport machine units / S.G. Volokhov // *New Horizons: Proceedings of the V-th Inter. Scientif.-Pract. Conf.* – 2018. – pp. 29-31.
 3. Garkunov, D.N. On origin of parts and tool wear-resistance increase through magnetic processing/ D.N. Garkunov, G.I. Suranov, G.B. Koptyaeva // *Friction and Wear.* – 1982. – Vol.3. – No.2. – pp. 327-330.
 4. Dikov, A.G. Investigation of magnetic field impact upon friction and wear / A.G. Dikov, E.A. Borisova, V.V. Zelinsky // *Success of Modern Natural Science.* – 2012. – No.6. – pp. 73-74.

- Хохлов, П.С. Анисимов. - М.: УМК МПС России, 2000.
6. Chang, Y.P. Effects of friction on tribomagnetization mechanisms for self-mated iron pairs under dry friction condition / Y.P. Chang, L.M. Chu, H.M. Chou, Y.C. Hwang // *Proc. IMechE.* - 2009. - Vol. 223. - P. 1-12.
 7. Chin, K.J. Tribological behavior and surface analysis of magnetized sliding contact XC 48 steel/XC 48 steel / K.J. Chin, H. Zaidi, M.T. Nguyen, P.O. Renault // *Wear.* - 2001. - P. 470-476.
 5. Lukin, V.V. *Design and Calculation of Cars* / V.V. Lukin, L.A. Shadur, V.N. Koturanov, A.A. Khokhlov, P.S. Anisimov. – М.: УМК МС of Russia, 2000.
 6. Chang, Y.P. Effects of friction on tribomagnetization mechanisms for self-mated iron pairs under dry friction condition / Y.P. Chang, L.M. Chu, H.M. Chou, Y.C. Hwang // *Proc. IMechE.* - 2009. - Vol. 223. - P. 1-12.
 7. Chin, K.J. Tribological behavior and surface analysis of magnetized sliding contact XC 48 steel/XC 48 steel / K.J. Chin, H. Zaidi, M.T. Nguyen, P.O. Renault // *Wear.* - 2001. - P. 470-476.

Ссылка цитирования:

Тихомиров, В.П. Влияние магнитного поля на триботехнические показатели пар трения скольжения применительно к фрикционным гасителям колебаний / В.П. Тихомиров, А.О. Горленко, С.Г. Волохов, М.А. Измеров // *Вестник Брянского государственного технического университета.* – 2020. - № 11. – С. 4-11. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-11-4-11.

Статья поступила в редакцию 15.04.20.

Рецензент: д.т.н., зав. лабораторией

АО «ВНИКТИ» г. Коломна

Овечников М.Н.

Статья принята к публикации 27.10.20.

Сведения об авторах:

Тихомиров Виктор Петрович, д.т.н., профессор кафедры «Трубопроводные транспортные системы» Брянского государственного технического университета, e-mail: dm-bgtu@yandex.ru.

Горленко Александр Олегович, д.т.н., профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Брянского государственного технического университета, e-mail: trt@tu-bryansk.ru.

Tikhomirov Victor Petrovich, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. “Pipeline Transport Systems”, Bryansk State Technical University, e-mail: dm-bgtu@yandex.ru.

Gorlenko Alexander Olegovich, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. “Motor Transport”, Bryansk State Technical University, e-mail: trt@tu-bryansk.ru.

Volokhov Stanislav Grigorievich, Designer-Engineer of JSC “VNIKTI” (Research and Design-

Волохов Станислав Григорьевич, инженер-конструктор АО «ВНИКТИ» («Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава»), e-mail: aivent@mail.ru.

Измеров Михаил Александрович, к.т.н., доцент кафедры «Трубопроводные транспортные системы» Брянского государственного технического университета, e-mail: m.izmerov@yandex.ru.

Technological Institute of Rolling-Stock”), e-mail: aivent@mail.ru.

Izmerov Mikhael Alexandrovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Pipeline Transport Systems”, Bryansk State Technical University, e-mail: m.izmerov@yandex.ru.