

## ОЦЕНКА МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО ИЗМЕНЕНИЯ ТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТИ ТРИБОУЗЛА ИЗ МАГНИТОПЛАСТА

О.О. НОВИКОВА, канд. техн. наук, А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук,  
В.В. НОВИКОВ, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: vnvkv@yandex.ru

© Новикова О.О., Болотов А.Н., Новиков В.В., 2024

В работе выявлен и изучен эффект магнитострикционного изменения топографии поверхности полимерного композиционного материала под действием магнитного поля. Установлено, что при использовании в качестве магнитного наполнителя порошка магнитострикционного материала  $\text{TeFe}_2$  с линейной магнитострикцией  $\lambda_s = 2 \cdot 10^3$  изменение среднего арифметического отклонения профиля составляет 5...20 %. Показано, что изменение высоты сглаживания профиля равняется  $5 \cdot 10^{-8}$  мкм. В абсолютных значениях изменение микрогеометрии поверхности составляет десятки нанометров. Проведена оценка интегрального изменения топографии на значительной по площади поверхности магнитопласта путем измерения скорости протечки газа через контакт магнитопласта с контртелом. Подтверждена магнитострикционная природа изменения топографии поверхности в магнитном поле. Подчеркнуто, что величина эффекта возрастает с увеличением поля и зависит от магнитной структуры материала, т.е. определяется его составом, концентрацией, размерами и ориентацией микродисперсного магнитного наполнителя.

*Ключевые слова:* магнитопласты, магнитные узлы трения, магнитострикционный эффект, линейная магнитострикция, управление трением, трение, шероховатость поверхности.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-3-12-21**

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее интересных задач при разработке современной техники является возможность влиять на фрикционные характеристики узлов трения, изменяя их в зависимости от эксплуатационных требований. Исследователи отмечают, что магнитное поле оказывает существенное влияние на характеристики трения и изнашивания [1–6]. Если учесть, что конструкционные возможности создания магнитного поля в трибоузлах достаточно просто реализуемы, применение магнитных полей для управления трением представляются весьма перспективным [7, 8]. В современной технике имеется опыт использования магнитных трибосистем [4–8], однако потенциал концепции управления трением не реализован. Во многом это обусловлено многофакторностью влияния магнитного поля на физико-химические процессы, протекающие при трении, и различными конструкциями магнитных трибоузлов.

В трибосистемах элементом, обладающим магнитными свойствами, могут быть такие детали конструкции, как поверхности трения из магнитных материалов, встроенные в конструкцию постоянные магниты в магнитопассивных узлах и обмотки с переменным током в активных магнитных бесконтактных устройствах [7–10]. Большой практический интерес представляют современные узлы трения с магнитной

смазкой, которые перспективны для применения в условиях низких температур, в агрессивных газовых средах и вакууме [11–16]. Оценка влияния магнитного поля на трение в различных по конструкциям и составу материалов трибоузлах при различных условиях на контактирующих поверхностях для каждого конкретного случая – это сложная задача, требующая синергетического подхода к учету изменения физико-химических свойств материалов и геометрии контакта.

Магнитопассивные трибоузлы имеют низкое и прогнозируемое трение, являются практически безызносными системами [7]. Поскольку управление непосредственно величиной магнитного поля с обратной связью в их конструкции отсутствует, то изменять фрикционные характеристики в стационарном режиме работы таких устройств невозможно. Однако в трибоузлах, испытывающих вибрационное воздействие, применение постоянных магнитов существенно снижает ударные нагрузки, выравнивает контактное давление за счет тормозящего воздействия вихревых индуцированных токов. Фактически магнитопассивный подшипник в процессе колебаний превращается в самоорганизующуюся систему. В работе [7] рассматривается контроль вибрации корабельных валов с помощью композитного водосмазываемого подшипника с постоянным магнитом, показано улучшение его трибологических, динамических характеристик при сохранении стабильности кормового вала. Установлено, что магнитная разгрузка существенно улучшает смазку подшипника.

Возможность управления процессами трения с помощью воздействия активного магнитного поля исследовалась в статье [8] при изучении работы фрикционно-магнитного композитного дискового тормоза. Установлено, что переменное магнитное поле обладает механизмом стабилизации трения и снижения шума, улучшения смазки. Отмечено влияние магнитострикции на фрикционные характеристики магнитных материалов.

Преимущества активных магнитных подшипников, если сравнивать их с обычными, при управлении трением рассмотрены в работе [9]. В ней показано, что данные узлы обладают высокой эффективностью, у них практически отсутствует трение, а также для них характерно низкое потребление. В статье подчеркивается актуальность применения активных магнитных трибоузлов, рассмотрены тенденции развития исследований в области технологий активного управления магнитными подшипниками. Повышенный интерес к проблеме влияния магнитного поля на процессы, протекающие при контактном взаимодействии, можно объяснить тем, что на практике начинают использовать магнитожидкостные узлы трения, в которых магнитное поле служит для управления движением магнитного смазочного материала через зону фрикционного контакта [11–14]. Был проведен анализ роли магнитного поля в магнитожидкостных трибосистемах при трении [12] и установлен магнитотрибологический эффект, который заключается в изменении смазочных свойств масла в присутствии однородного магнитного поля. Величина магнитного поля влияет на агрегативную устойчивость магнитного масла, образующиеся агломераты феррочастиц вызывают абразивный износ поверхностей.

В статье [14] исследовали управление магнитным полем с учетом градиента температуры для удержания феррожидкости в зоне трения в целях достижения стабильного трения.

В статье [5] было изучено образование и развитие трещин в образце из ферромагнитного материала, находящегося в намагниченном состоянии. Авторы показали, что магнитное состояние материала поверхности трения наиболее существенно влияет на процесс его хрупкого или квазихрупкого разрушения, если трещины раскрываются перпендикулярно вектору намагниченности.

Статья [6] посвящена изучению влияния магнитного поля на процесс образования частиц адгезионного износа. Было установлено, что магнитоэлектростатические силы могут значительно затруднить отделение частиц износа и привести к уменьшению интенсивности адгезионного износа. Это происходит в результате возрастания в магнитном поле механических напряжений, необходимых для удаления частицы поверхности в месте схватывания микронеровностей.

При всем многообразии работ, посвященных исследованию влияния магнитного поля на физико-механические свойства материалов в процессе трения, в настоящее время потенциальные возможности управления трением за счет магнитных полей не раскрыты полностью, в связи с чем необходимо проводить дополнительные исследования. Наиболее интересной нам представляется возможность воздействовать полем непосредственно на материалы поверхностей трения, меняя их физико-химические свойства в процессе работы трибоузла. Это возможно, если детали устройства обладают магнитными свойствами. Исследований, посвященных данной теме, имеется немного [6, 7].

В статье [17] изучено влияние магнитного поля на шероховатость поверхности магнитореологического эластомера и проанализировано воздействие контролируемых характеристик поверхности эластомера на его фрикционные свойства. Установлено, что с увеличением магнитного поля поверхность магнитореологического эластомера существенно изменяется: шероховатость поверхности уменьшается, коэффициент трения снижается (на 24,7 %). Авторы подчеркивают, что изменение морфологии поверхности под действием магнитного поля является важным фактором управления фрикционными свойствами.

Во многих отраслях техники (например, автомобильной, аэрокосмической, медицинской) в узлах трения применяют детали из магнитопластов. Данные материалы представляют собой композит из магнитоэлектрических порошков и связующего магнитного компонента, который удерживает порошки вместе. Детали из магнитоэлектрических магнитопластов будут изменять свою форму и размеры в магнитном поле. Магнитоэлектрическими свойствами в той или иной мере обладают все материалы, имеющие в составе магнетик [18]. Для прогнозирования работы узла трения важно оценить порядок величины изменения размеров зоны трибоконтакта. Линейная  $\lambda_s$  и объемная  $\lambda_v$  магнитоэлектрики в процентах показывают, как сильно изменяются длина и объем магнитной детали под действием магнитного поля. Значение линейной магнитоэлектрики  $\lambda_s$  изменяется в широких пределах (от  $10^{-6}$  для основных ферромагнетиков до  $10^{-3}$  для специальных сплавов) [18]. Объемная магнитоэлектрика существенно меньше линейной.

Учитывая порядок линейной  $\lambda_s$  и объемной  $\lambda_v$  магнитоэлектрик, можно предположить, что изменяться будет шероховатость поверхности, а это сильно повлияет на сближение контактирующих поверхностей и, соответственно, скажется на трибопараметрах. В научной литературе нет данных об исследованиях целенаправленного изменения шероховатости поверхности детали из магнитоэлектрического магнитопласта под воздействием магнитного поля. Если эффект будет иметь значимое воздействие на топографию магнитопласта, то магнитное поле можно будет применять для регулирования фрикционных параметров трибоузлов. Кроме того, плавно регулируемая величина контактного зазора позволит осуществлять прецизионное изменение герметичности или подачи газа в вакуумной и медицинской технике.

Цель настоящей работы заключается в выявлении и изучении эффекта магнитоэлектрического изменения топографии поверхности полимерного композиционного материала под действием магнитного поля.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Большинство практически значимых для триботехники магнитных материалов имеют поликристаллическую структуру и состоят из отдельных блоков с разориентированными относительно друг друга кристаллографическими осями. В магнитном поле образующие поверхность трения блоки будут испытывать магнитострикционное изменение формы и размеров. Величина магнитострикции нелинейно зависит от напряженности и направления поля по отношению к оси легкого намагничивания. Из-за разориентации блоков отдельные участки поверхности будут по-разному упруго деформироваться, в связи с чем может произойти изменение топографии поверхности на микроуровне. Для материалов на основе железа относительная линейная магнитострикция имеет порядок  $10^{-4} \dots 10^{-5}$ , а объемная – менее  $10^{-5}$  [18]. Полагая размеры блоков порядка  $10^{-3} \dots 10^{-5}$  м, можно ожидать изменения топографии поверхности на уровне субмикрощероховатости.

Очевидно, что на образце из композиционного материала, содержащего в относительно мягкой матрице твердые частицы с магнитострикционными свойствами, эффект варьирования шероховатости может быть выше, чем на монолитном поликристаллическом образце. Тогда, если образец не текстурирован с целью создания определенной кристаллографической ориентации частиц, среднее изменение  $\Delta R$  некоторого параметра топографии поверхности  $R$  в зависимости от величины поля может оцениваться неравенством

$$0 \leq \Delta R \leq \left( \frac{2}{3} \lambda_{100} + \frac{3}{5} \lambda_{111} \right) d, \quad (1)$$

где  $\lambda_{100}$  и  $\lambda_{111}$  – константы магнитострикции вдоль кристаллографических направлений [100] и [111] соответственно;  $d$  – средний размер частиц по направлению нормали к поверхности.

Формула (1) справедлива для материалов из сплавов группы железа с кристаллографической структурой кубической формы. Если частицы монокристаллические и сориентированы к поверхности осью [100] или [111], то, прикладывая поле по нормали к поверхности, можно изменить шероховатость в следующих пределах:

$$0 \leq \Delta R \leq \lambda_{100} d;$$

$$0 \leq \Delta R \leq \lambda_{111} d.$$

В композиционных магнитострикционных материалах обычно используют частицы дисперсностью  $10^{-3} \dots 10^{-6}$  м из сплава на основе  $Co - Fe - V$  (пермендюра), у которого  $\lambda_s = 7 \cdot 10^{-5}$ . Можно ожидать изменения параметров топографии поверхности только на наноуровне. Если использовать частицы такого же размера из материалов с гигантской магнитострикцией (интерметаллические соединения), то изменение некоторых характеристик топографии может составить десятки или сотни нанометров, что вполне существенно для многих технических применений.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы из магнитопласта представляли собой композиционный материал с матрицей из эпоксидной смолы ЭД-20, в которую диспергировали порошок магнитострикционного материала  $TeFe_2$ . Содержание порошка составляло 70 об. %, средний диаметр частиц  $d$  был равен приблизительно 140 мкм. Частицы не обладали

явно выраженной анизотропией формы. Для отверждения в смолу добавлялся отвердитель триэтилентетрамин в соотношении «1 часть отвердителя к 6 частям смолы».

Порошок магнитоотрицательного материала  $\text{TeFe}_2$  имеет уникально высокую линейную магнитоотрицательность  $\lambda_s$ , относительное значение которой при комнатной температуре достигает  $2 \cdot 10^3$  в достаточно высоких магнитных полях напряженностью  $\sim 10^7$  А/м, в которых намагниченность материала находится в состоянии технического насыщения.

Для создания магнитной текстуры в образцах на них в процессе полимеризации воздействовали магнитным полем, вектор напряженности которого был направлен по нормали к исследуемой поверхности. Это позволило сориентировать оси легкого намагничивания магнитных частиц вдоль поля. Заметим, что  $\text{TeFe}_2$  имеет несколько осей легкого намагничивания.

Внешнее магнитное поле создавалось с помощью электромагнита постоянного тока. Напряженность магнитного поля электромагнита изменялась от нуля до  $5,6 \cdot 10^5$  А/м, неоднородность магнитного поля в области исследуемого магнитопласта не превышала 3%. Магнитное поле, действующее на магнитные частицы, будет меньше указанного из-за влияния собственного размагничивающего поля образцов. Максимальное значение магнитоотрицательности  $\lambda_s = 2 \cdot 10^3$  отдельных частиц в нашем случае в несколько раз меньше, чем  $\lambda_s$ , точнее указать затруднительно из-за отсутствия сведений о магнитном состоянии частиц.

Для выявления даже малых эффектов изменения топографии поверхности магнитопласта в магнитном поле необходимо, чтобы ее исходная шероховатость была небольшой. В связи с этим исходный материал помещали для полимеризации в кювету с отполированным металлическим дном ( $Ra \sim 0,25$  мкм). Исследуемая поверхность магнитопласта представляла собой реплику гладкой металлической поверхности. Поскольку исследуемая поверхность не подвергалась механической обработке, магнитные частицы существенно не выступали из нее.

Измерения параметров шероховатости поверхности образцов для оценки локальных изменений топографии производились на приборе Surtronic (фирмы Taylor Hobson Ltd., Великобритания), имеющем пьезоэлектрическую измерительную систему, нечувствительную к магнитным полям. Действие прибора основано на принципе ощупывания неровностей исследуемой поверхности алмазным щупом датчика и преобразования возникающих при этом механических колебаний щупа в изменения напряжения, пропорциональные этим колебаниям, которые усиливаются и преобразуются электронным блоком. Результаты измерения выводятся на жидкокристаллический дисплей. На приборе определяли среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$ . Ошибка измерения параметра  $Ra$  в диапазоне  $\pm 5$  мкм не превышает  $\pm 3$ %. Измерения проводились на базовой длине 0,8 мм и 2,5 мм. Вначале измерялась шероховатость без наложения поля, а затем на той же трассе сканирования уже в присутствии магнитного поля.

На образцы воздействовали магнитным полем с высокой степенью однородности для исключения механической деформации поверхностей. Напряженность магнитного поля, действующего на магнитоотрицательные частицы, составляла около 560 кА/м, поэтому частицы испытывали значительную магнитоотрицательную деформацию растяжения.

Проводилась, кроме определения локальных изменений топографии поверхности в магнитном поле, оценка интегральных изменений, характеризующих поверхность в целом. Схема используемого для этих исследований прецизионного

газового вискозиметра приведена на рисунке. Прибор состоит из испытываемого узла, включающего образец из композиционного магнитопласта 1 и контрообразец 2, баллона с дистиллированной водой 3, датчика низкого давления 4 и устройства для сбора и измерения объема жидкости 5.

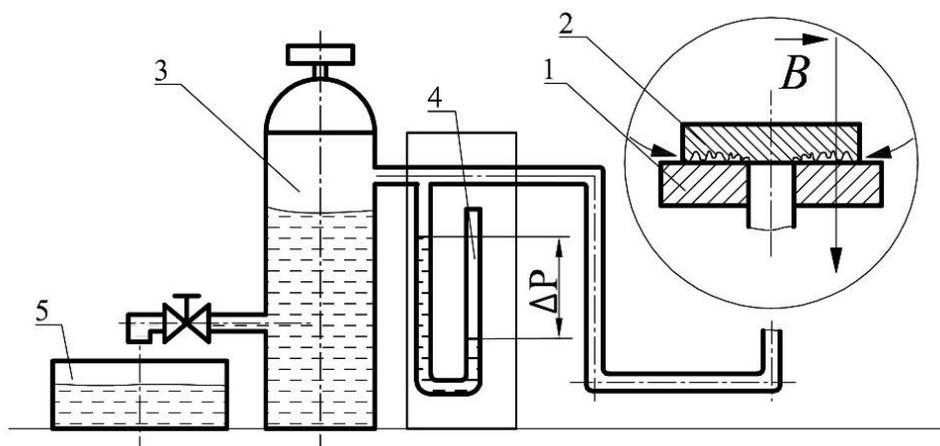


Схема прецизионного газового вискозиметра

Образец из композиционного магнитопласта 1 в виде кольца и контрообразец 2 из немагнитного материала вводились в контакт и помещались во внешнее магнитное поле, создаваемое с помощью электромагнита постоянного тока. Торцевая поверхность кольца имела шероховатость  $Ra = 0,06$  мкм, поэтому можно считать, что изучался контакт шероховатой поверхности (магнитопласт) с гладкой. Интегральные изменения топографии поверхности оценивались путем фиксации объемной скорости протекания газа  $Q$  через шероховатую зону контакта образцов. Зона поступления газа связана посредством трубок с баллоном 3, наполненным дистиллированной водой. Движение газа через трибоконтакт обуславливалось необходимостью заместить расходуемый объем жидкости, фиксированно вытекающей в устройство 5. Вызываемый движением жидкости перепад давлений в контакте магнитопласта с контрообразцом составляет от единиц до десятков паскалей, поэтому был выбран датчик низкого давления на основе U-образной трубки 4. Прибор позволяет точно определить  $Q$  по объему вытекающей из баллона дистиллированной воды при установившемся значении разности давлений  $\Delta P$ .

Теоретически определенная скорость протекания газа  $Q$  следующим образом зависит от эффективного зазора  $h$  между контактирующими поверхностями [19]:

$$Q = ch^3(P_1^2 - P_2^2), \quad (2)$$

где  $c$  – константа прибора, обуславливаемая вязкостью газа при заданной температуре и атмосферном давлении, а также геометрическими размерами контакта;  $P_1$  и  $P_2$  – давление на входе и выходе кольцевой щели ( $P_1$  в наших условиях равно атмосферному давлению; поскольку  $P_1 \cong P_2$ , то  $P_1^2 - P_2^2 \approx 2(P_1 - P_2)P_1 = 2\Delta P P_1$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате опытов установлено, что в магнитном поле топография поверхности несколько изменяется. Величина эффекта возрастает с увеличением поля и зависит от участка сканирования, что вызвано неоднородностью магнитной структуры материала. В максимальном поле напряженностью 560 кА/м при исходной

шероховатости, имеющей среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra = 0,12...0,19$  мкм, ее изменение  $\frac{\Delta Ra}{Ra}$  находилось в диапазоне 5...20 % для разных трасс сканирования. В абсолютных значениях изменение  $Ra$  составляло от 10 до 300 нм. Для гладких поверхностей трения такие изменения могут оказаться существенными, особенно для прецизионных измерительных приборов, устройств с тарированной утечкой герметизируемой среды или для сокращения времени приработки поверхностей. Вполне понятно, что величину  $\Delta Ra$  можно регулировать за счет изменения концентрации и размеров частиц магнитного наполнителя.

Наряду с непосредственным определением локального изменения шероховатости проводилось косвенное измерение интегрального изменения топографии на значительной по площади поверхности магнитопласта. Для этого измерялась утечка газа (воздуха) через кольцевой зазор, образованный при контакте магнестрикционного образца с цилиндрическим контртелом. Давление в контакте создавалось только весом немагнитного цилиндра. Методика эксперимента позволяет исключить влияние магнитных сил на контактное давление.

Наложение магнитного поля на магнестрикционный образец приводило к увеличению утечки газа через контакт на 15...18 % ( $\Delta P \approx const$ ), что, несомненно, является результатом увеличения зазора между контактирующими поверхностями из-за возрастания шероховатости поверхности магнестрикционного образца.

Из формулы (2) следует, что относительное изменение эффективного зазора  $h_m$  в магнитном поле можно найти следующим образом:

$$\frac{h_m}{h} = \left( \frac{Q_m \Delta P}{Q \Delta P_m} \right)^{1/3},$$

где нижний индекс  $m$  показан у параметров, полученных при воздействии магнитного поля.

Установлено что, эффективный зазор изменился в магнитном поле приблизительно на 5 %.

В работе [20] было показано, что скорость протечки газа через щель, аналогичную рассматриваемой, линейно зависит от параметра шероховатости  $Rp$ , который определяется расстоянием от линии выступов шероховатой поверхности до линии впадин. По данным, приведенным в этой же работе,  $Rp \approx 3Ra$ , а это значит, что абсолютное изменение  $Rp$  будет следующим:  $\Delta Rp \approx 5 \cdot 10^{-8}$  мкм. Вполне обоснованно можно предположить, что гладкое контртело опирается на магнитные частицы и изменение  $Rp$  происходит в результате магнестрикционного увеличения их размеров. Отсюда магнестрикционное изменение  $Rp_m$  должно быть порядка  $10^{-7}...10^{-8}$  мкм. Совпадение по порядку величины значений  $\Delta Rp$  и  $\Delta Rp_m$  свидетельствует в пользу магнестрикционной природы изменения топографии поверхности в магнитном поле.

Гипотетически можно допустить, что установленное изменение топографии поверхности является результатом каких-либо трудно учитываемых магнитных взаимодействий, приводящих к деформации поверхности. Поэтому, чтобы исключить влияние на топографию поверхности эффектов, отличных от магнестрикционных, провели вышеописанные опыты на магнитопластах, в которых слабомагнитный магнестрикционный порошок  $TeFe_2$  был заменена сильномагнитным порошком железа. Топография поверхности магнитопласта с дисперсным железом не изменялась в магнитном поле.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований было подтверждено явление магнотриксционного изменения микрошероховатости магнитоласта. Установлено, что величина эффекта возрастает с увеличением поля и зависит от магнитной структуры материала, т.е. определяется его составом, концентрацией, размерами и ориентацией микродисперсного магнитного наполнителя. Наиболее значительное проявление эффекта наблюдалось для относительно гладких поверхностей. Механизм эффекта магнотриксционного изменения микрошероховатости поверхности магнитных композиционных материалов требует дальнейшего изучения. Необходимо учесть влияние физико-механических свойств матрицы на величину изменения высотности профиля.

В случае испытываемых материалов с магнитными частицами, имеющими уникально высокую линейную магнотриксию, изменение среднего арифметического отклонения профиля составляет 5...20 %. В абсолютных значениях изменение микрогеометрии поверхности – десятки нанометров.

Установлено критическое давление в области трибоконтакта  $E\lambda_s$ , где  $E$  – модуль упругости материала, при котором не проявляется эффект магнотриксционного изменения топографии поверхности. Контактное давление, нивелирующее магнотриксционное деформирование, составляет десятки мегапаскалей.

Предполагается, что выявленный эффект можно использовать в трибоузлах из магнитных материалов для изменения параметров шероховатости в процессе трения и регулирования фрикционных характеристик узла путем наложения магнитного поля. Положительный результат можно получить при контролируемом изменении динамики процессов смачивания твердых поверхностей при трении. Перспективно применение в медицине эффекта магнотриксционного изменения топографии магнитоласта в уплотнительных устройствах для прецизионного изменения малых доз газов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Effect of magnetic field distribution of friction surface on friction and wear properties of 45 steel in DC magnetic field / H. Han [et al.] // *Wear*. 2015. V. 328–329. P. 422–435.
2. The Effect of pulsed magnetic field on friction and wear properties of high speed steel tool materials / Z.Q. Liang [et al.] // *Acta Armamentarii*. 2015. V. 36. Iss. 5. P. 904–910.
3. Влияние магнитного поля на поверхностные эффекты при смазке магнитной жидкостью / А.Н. Болотов [и др.] // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 2 (2). С. 14–22.
4. Understanding the influence of the magnetic field, particle size, and concentration on the tribological performance of superparanolubricants / A.E.D.S. Guedes [et al.] // *Tribology Transactions*. 2021. V. 64 (3). P. 551–561.
5. Болотов А.Н. Механизм фрикционного разрушения поверхностей в магнитном поле // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 14–20.
6. Bolotov A.N., Novikova O.O., Novikov V.V. Adhesive wear in a magnetic field // *Materials Today: Proceedings*. 2021. V. 38. P. 4. P. 1413–1415.
7. Tribological and dynamic performances of composite water lubricated bearing with magnetic support / T. He [et al.] // *Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology*. 2022. V. 43 (3). P. 352–359.
8. Experimental analysis on alternating magnetic field to suppress friction noise of brake / J.S. Bao [et al.] // *Zhendong Gongcheng Xuebao/Journal of Vibration Engineering*. 2021. V. 34 (4). P. 838–848.

9. Huang T., Zheng M., Zhan G. A Review of active magnetic bearing control technology // *Chinese Control and Decision Conference*. 2019. URL: [https://www.researchgate.net/publication/335795257\\_A\\_Review\\_of\\_Active\\_Magnetic\\_Bearing\\_Control\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/335795257_A_Review_of_Active_Magnetic_Bearing_Control_Technology) (дата обращения: 09.04.2024).

10. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Магнитные силоксановые наножидкости, адаптированные для условий граничного трения // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2020. № 12. С. 546–556.

11. Zhang P., Lee K.H., Lee C.H. Fretting friction and wear characteristics of magnetorheological fluid under different magnetic field strengths // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. V. 421. P. 13–18.

12. Влияние магнитного поля на структуру и смазочные свойства наноструктурного магнитного масла / А.Н. Болотов [и др.] // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2015. № 7. С. 137–141.

13. Effects of magnetic ionic liquid as a lubricant on the friction and wear behavior of a steel-steel sliding contact under elevated temperatures / J. Jia [et al.] // *Friction*. 2021. V. 9 (1). P. 61–74.

14. Ke H., Huang W., Wang X. Controlling lubricant migration using ferrofluids // *Tribology International*. 2016. V. 93. P. 318–323.

15. Multifunctional ferrofluid-infused surfaces with reconfigurable multiscale topography / W. Wang [et al.] // *Nature*. 2018. V. 559 (7712). P. 77–82.

16. Zhang Q., Hu X., Meng Y. Understanding of the tribological behaviors of magnetic lubrication particle under magnetic field // *Tribology International*. 2022. V. 176. P. 107931.

17. Experimental and numerical study on surface roughness of magnetorheological elastomer for controllable friction / R. Li [et al.] // *Friction*. 2020. V. 8 (5). P. 917–929.

18. Белов К.П. Магнитострикционные явления и их технические приложения. М.: Наука. 1987. 160 с.

19. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник / Л.А. Кондаков [и др.]; под. общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. М.: Машиностроение. 1994. 445 с.

20. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение. 1981. 244 с.

**Для цитирования:** Новикова О.О., Болотов А.Н., Новиков В.В. Оценка магнитострикционного изменения топографии поверхности трибоузла из магнитопласта // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 3 (23). С. 12–21.

## ASSESSMENT OF MAGNETOSTRICTIONAL CHANGES IN THE SURFACE OF A TRIBOUNIT FROM MAGNETOPLAST

O.O. NOVIKOVA, Cand. Sc., A.N. BOLOTOV, Dr Sc., V.V. NOVIKOV, Cand. Sc.

Tver State Technical University,  
22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, e-mail: vnvkv@yandex.ru

The effect of magnetostrictive change in the surface topography of polymer composite material under the action of a magnetic field has been revealed and studied in this work. It is established that when powder of magnetostrictive material  $\text{TeFe}_2$  with linear magnetostriction  $\lambda_s = 2 \cdot 10^3$  is used as a magnetic filler, the change in the arithmetic mean deviation of the

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 3 (23), 2024*

profile is 5...20 %. It is shown that the change of the profile smoothing height is equal to  $5 \cdot 10^{-8}$   $\mu\text{m}$ . In absolute values the change of surface microgeometry is tens of nanometers. The integral topography change on a large-area magnetoplast surface was evaluated by measuring the gas leakage rate through the magnetoplast-counterbody contact. The magnetostrictive nature of the surface topography change in a magnetic field was confirmed. It is emphasized that the magnitude of the effect increases with increasing field and depends on the magnetic structure of the material, i.e., it is determined by its composition, concentration, size, and orientation of the microdisperse magnetic filler.

*Keywords:* magnetoplasts, magnetic friction units, magnetostrictive effect, linear magnetostriction, friction control, friction, surface roughness.

Поступила в редакцию/received: 11.03.2024; после рецензирования/revised: 25.03.2024;  
принята/accepted: 01.04.2024

УДК 62-567

## **ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ЖЕСТКОСТИ И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ТРОСОВОГО АМОРТИЗАТОРА С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ВОСПРИЯТИЕМ НАГРУЗОК**

С.В. ДОРОНИН, канд. техн. наук, Е.М. РЕЙЗМУНТ, канд. техн. наук,  
Красноярский филиал Федерального исследовательского центра информационных  
и вычислительных технологий,  
660000, Красноярск, а/я 25515, e-mail: mr.svdoronin@yandex.ru

© Доронин С.В., Рейзмунт Е.М., 2024

Отмечены затруднения, возникающие при аналитическом расчете амортизаторов с нелинейными характеристиками и пространственным восприятием нагрузок. Рассмотрены трудности численного моделирования троса для анализа механического поведения амортизаторов, связанные со структурной сложностью и размерностью задачи. Разработан технически обоснованный подход к построению линеаризованной численной модели тросового амортизатора, базирующийся на экспериментальных оценках жесткости. Данный подход позволяет снизить размерность и требования к вычислительным ресурсам за счет упрощения структуры троса. Подчеркнуто, что адекватность и возможность использования полученной численной модели тросового амортизатора для предварительных упрощенных расчетов систем амортизации с последующей экспериментальной отработкой и уточнением результатов опираются на анализ погрешности численной модели.

*Ключевые слова:* тросовый амортизатор, статический расчет, конечно-элементная модель, паспортные нагрузочные диаграммы, экспериментальные оценки, жесткость, трос, линеаризация.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-3-21-32**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Традиционно статический расчет систем амортизации выполняется на начальном этапе их разработки и предназначен для обеспечения рационального выбора количества и способа размещения амортизаторов в составе системы [1, 2]. Исходные данные для расчета включают в себя величины и направления действия сил инерции,