

УДК 621.2.082.18

**А.Д. Бреки**, канд. техн. наук, доцент, СПбПУ Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия)  
(e-mail: albreki@yandex.ru)

**С.Е. Александров**, д-р хим. наук, профессор, СПбПУ Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия) (e-mail: sevgalexandrov@gmail.com)

**К.С. Тюриков**, аспирант, СПбПУ Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия)  
(e-mail: tmet@ftim.spbstu.ru)

**А.Е. Гвоздев**, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВПО «ТГПУ им. Л.Н Толстого» (Тула, Россия)  
(e-mail: technology@tspu.tula.ru)

**Е.В. Агеев**, д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: ageev\_ev@mail.ru)

**Д.А. Провоторов**, канд. техн. наук, ведущий инженер-конструктор, ООО НПП «Вулкан-ТМ» (Тула, Россия) (e-mail: prodmyt@rambler.ru)

**В.В. Куц**, д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: kuc-vadim@yandex.ru)

### **ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕНИЯ СТАЛИ ШХ15 ПО ПОКРЫТИЮ НА ОСНОВЕ $\text{SiO}_2$ , СОДЕРЖАЩЕМУ НАНОЧАСТИЦЫ $\text{MoS}_2$ СО СРЕДНИМ РАЗМЕРОМ 64 НМ**

*В настоящее время представляет практический интерес выявление закономерностей влияния наночастиц дисульфида молибдена на трение в парах трения «сталь – беспористое нанокпозиционное покрытие» для увеличения антифрикционных свойств покрытий триботехнического назначения.*

*В границах данной работы приведены результаты исследований трения верчения стали марки ШХ15 по поверхности беспористого покрытия с матрицей из диоксида кремния, наполненного наночастицами дисульфида молибдена размером 64 нм в концентрации 73%, нанесённого на подложку из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т.*

*Для исследования были взяты образцы из стали 12Х18Н10Т, с нанесёнными на них покрытиями из  $\text{SiO}_2$  и  $\text{SiO}_2+73\%\text{MoS}_2$  (64нм). Толщина нанесённых беспористых покрытий составляла около 1мкм. В качестве вращающегося контртела использовался цилиндрический образец (ролик) из подшипниковой стали марки ШХ-15, диаметром 10мм. Выбранный твёрдый смазочный материал – наноразмерный порошкообразный дисульфид молибдена шарообразной формы.*

*В процессе испытаний вращающийся стальной образец своей плоской частью прижимался к плоскости зажатого в струбцине образца. Струбцина, зафиксированная на подшипниковом узле, с помощью тросика и тензобалки в процессе опыта удерживалась от поворота, сообщаемого подвижным роликом. С тензобалки на компьютер передавались данные о силе трения и действующей нагрузке. В процессе всех опытов нагрузка на пару трения составляла 250 Н, а частота вращения вала, в котором был зажат стальной ролик, составляла 450 об/мин, время трения составляло 600 с.*

*Экспериментально установлено, что в результате трения верчения по схеме «плоскость-плоскость» образца из подшипниковой стали ШХ15 по нанокпозиционному покрытию наблюдаются антифрикционные эффекты относительно аналогичных испытаний покрытия из ненаполненного наночастицами диоксида кремния. Показано стабилизирующее действие наночастиц на процесс фрикционного взаимодействия в режиме трения верчения.*

**Ключевые слова:** трение, наночастицы, твёрдый смазочный материал, антифрикционное покрытие, смазочный слой.

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2017-21-4-52-67

**Ссылка для цитирования:** Лабораторные исследования трения стали ШХ15 по покрытию на основе  $\text{SiO}_2$ , содержащему наночастицы  $\text{MoS}_2$  со средним размером 64 нм / А.Д. Бреки, С.Е. Александров, К.С. Тюриков, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев, Д.А. Провоторов, В.В. Куц // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 4(73). С. 52-67.

\*\*\*

Известно, что в продолжении большого интервала времени на частицы сфе-

рической формы из дисульфида молибдена не обращали существенного внима-

ния как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. Данные частицы наблюдали в случае неполного сульфирования оксидных наночастиц в катализаторах с высоким содержанием молибдена или в катализаторах из дисульфида молибдена без носителей. Частицы имеют многослойную структуру типа луковицы и нерегулярную гранёную форму [1]. После открытия таких систем, как фуллерены и нанотрубки эта область получила развитие в основном благодаря работам Р. Тенне и его коллег [2-9].

В условиях интенсификации нагрузок и скоростей в современных механизмах и машинах проблемы снижения трения и износа встают особенно остро. Одним из большого количества технических решений снижения трения и износа является создание покрытий на поверхностях трения. В связи с этим, авторами проводятся фундаментальные научные исследования и поисковые научные исследования в направлении формирования беспористых покрытий из нанокпозиционных материалов типа «износостойкая матрица – наночастицы дисульфида молибдена», методом химического осаждения из газовой фазы и исследования их трибологических свойств. Слоистые наночастицы потенциально могут быть использованы для смазывания электропроводящих контактов и механических приборов, которые требуют очень низких коэффициентов трения при пуске и для которых недопустимо использование жидких и консистентных смазочных материалов. Вместе с тем, использование твердых нанодисперсных смазочных материалов в виде добавок в смазочные масла в узлах трения где реализуется жидкая смазка дало ряд положительных результатов [10-18].

Представляет практический интерес выявление закономерностей влияния наночастиц дисульфида молибдена на трение в парах трения «сталь - беспористое нанокпозиционное покрытие» для увеличения антифрикционных свойств покрытий триботехнического назначения.

В настоящее время особый интерес представляют нанотехнологии, обеспечивающие формирование нанокпозиционных материалов в одном цикле, то есть когда в едином реакторе происходит синтез наночастиц в одной зоне реактора, и осаждение композиционного покрытия в другой зоне, куда подаются дополнительные реагенты и поступают синтезируемые частицы. Несколько месяцев назад нам удалось впервые разработать процесс плазмохимического осаждения при атмосферном давлении нанокпозиционного покрытия, представляющего собой слой диоксида кремния, содержащего наночастицы дисульфида молибдена, состоящие из наноразмерных фрагментов пакетов «S-Mo-S».

В границах данной работы приведены результаты исследований трения верчения стали марки ШХ15 по поверхности беспористого покрытия с матрицей из диоксида кремния, наполненного наночастицами дисульфида молибдена размером 64 нм в концентрации 73%, нанесённого на подложку из нержавеющей стали марки 12X18H10T.

Для исследования были взяты образцы из стали 12X18H10T, с нанесенными на них покрытиями из SiO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub>+73%MoS<sub>2</sub> (64нм). Толщина нанесенных беспористых покрытий составляла около 1мкм. В качестве вращающегося контртела использовался цилиндрический образец (ролик) из подшипниковой стали марки ШХ-15, диаметром 10мм.

Выбранный твёрдый смазочный материал – наноразмерный порошкообразный дисульфид молибдена шарообразной формы.

Исследования проводились на машине торцового трения по схеме, приведённой на рис. 1.

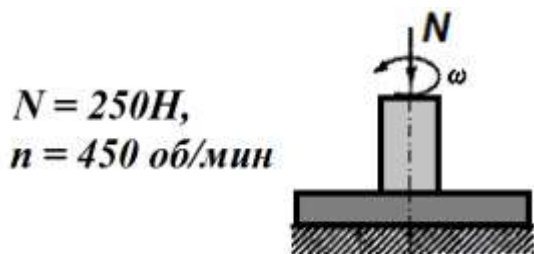


Рис. 1. Схема торцового трения вращения по схеме «плоскость-плоскость»

В процессе испытаний вращающийся стальной образец своей плоской частью

прижимался к плоскости зажатого в струбцине образца. Струбцина, зафиксированная на подшипниковом узле, с помощью тросика и тензобалки в процессе опыта удерживалась от поворота, сообщаемого подвижным роликом. С тензобалки на компьютер передавались данные о силе трения и действующей нагрузке. В процессе всех опытов нагрузка на пару трения составляла 250 Н, а частота вращения вала, в котором был зажат стальной ролик, составляла 450 об/мин, время трения составляло 600 с.

Вначале исследовали трение ролика из стали ШХ15 по поверхности покрытия из  $\text{SiO}_2$  без добавления наночастиц (рис.2).

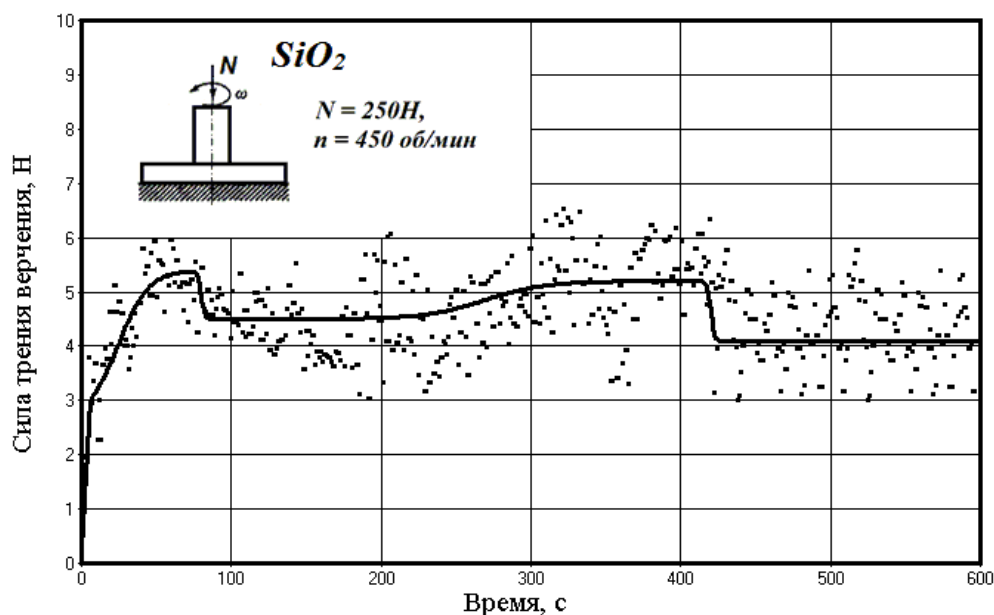


Рис. 2. Зависимость силы трения вращения от времени при трении по чистому  $\text{SiO}_2$

Наблюдались колебания силы трения, связанные с параметрами качества поверхностей пар трения. Изменение амплитуды колебаний может быть связано с колебанием силы адгезионного взаимодействия поверхностей трения в связи с интенсивным разрушением окисных плёнок (вторичных структур) при повышенной нагрузке. На

графике (рис. 2) можно выделить как участки скачкообразного перехода, так и установившиеся значения силы трения. Переходы означают изменение условий фрикционного взаимодействия, а участки стабильности означают наступление квазистационарных режимов с постепенным накоплением дефектов и вторичных струк-

тур, приводящих в итоге к новому скачку. На рисунке 2 можно выделить 3 квазистационарных участка: 1) сегмент  $t_1 \in [85; 200]$ , на котором сила трения составляла  $\approx 4,5$  Н; 2) сегмент  $t_2 \in [340; 415]$ , на котором сила трения составляла  $\approx 5,2$  Н; 3) сег-

мент  $t_3 \in [425; 600]$ , на котором сила трения составляла  $\approx 4,1$  Н.

Зависимость мгновенной скорости изменения силы трения вращения от времени при трении по чистому SiO<sub>2</sub> показана на рис. 3.

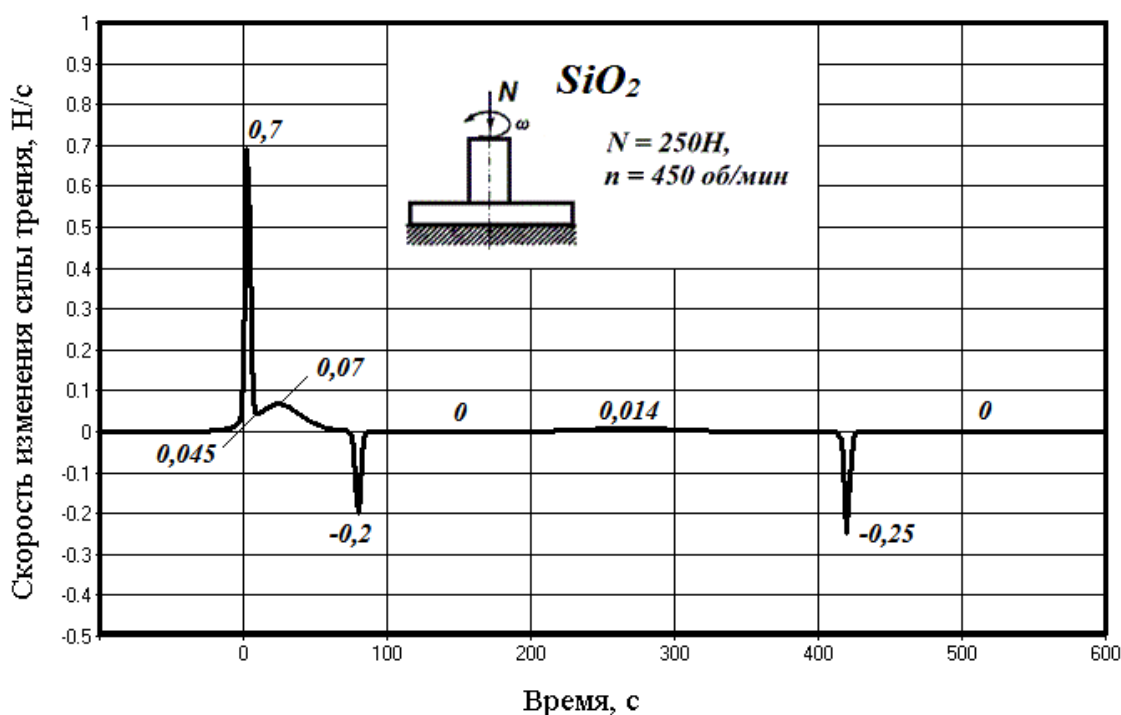


Рис. 3. Зависимость мгновенной скорости изменения силы трения вращения от времени при трении по чистому SiO<sub>2</sub>

Из рисунка 3 видно, что вначале опыта имело место, скачкообразное приращение скорости изменения силы трения до значения  $\approx 0,7$  Н/с, затем, также скачкообразно она снизилась до значения  $\approx 0,045$  Н/с. Далее последовало плавное увеличение скорости до значения  $\approx 0,07$  Н/с, после чего наблюдалось еще более плавное снижение скорости до 0 Н/с. Затем вектор скорости изменил направление и скорость скачкообразно уменьшилась до значения  $\approx -0,2$  Н/с, после чего также скачкообразно обратилась в 0 и начался первый квазистационарный режим трения. Далее произошёл очень плавный

рост скорости до значения  $\approx 0,014$  Н/с, после чего также плавно скорость обратилась в 0 и начался второй квазистационарный режим трения. По завершении установившегося режима скорость скачкообразно уменьшилась до значения  $\approx -0,25$  Н/с, после чего также скачкообразно обратилась в 0 и начался итоговый квазистационарный режим трения.

Далее исследовали трение ролика из стали ШХ15 по поверхности покрытия из SiO<sub>2</sub>, содержащего 73% по массе наночастиц дисульфида молибдена размером 64 нм (рис.4).

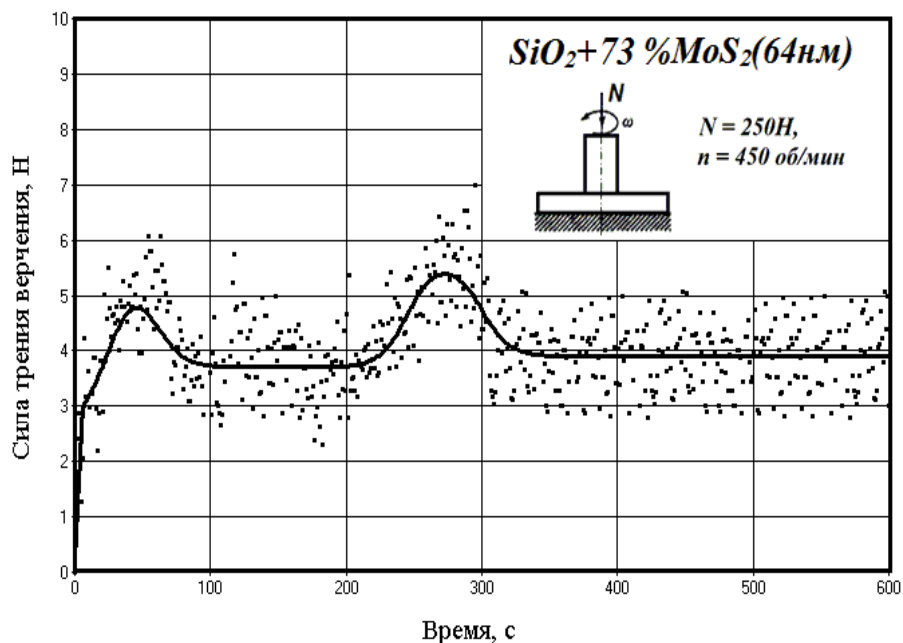


Рис.4. Зависимость силы трения вращеия от времени при трении по покрытию  $\text{SiO}_2 + 73\% \text{MoS}_2 (64 \text{ нм})$

На графике (рис.4) также можно выделить как участки скачкообразного (либо «плавного») перехода, так и установившиеся значения силы трения. На рисунке 4 можно выделить 2 квазистационарных участка: 1) сегмент  $t_1 \in [100; 200]$ , на котором сила трения составляла  $\approx 3,7 \text{ Н}$ ;

2) сегмент  $t_2 \in [345; 600]$ , на котором сила трения составляла  $\approx 3,9 \text{ Н}$ .

Зависимость мгновенной скорости изменения силы трения вращеия от времени при трении по нанокпозиционному покрытию  $\text{SiO}_2 + 73\% \text{MoS}_2 (64 \text{ нм})$  показана на рис.5.

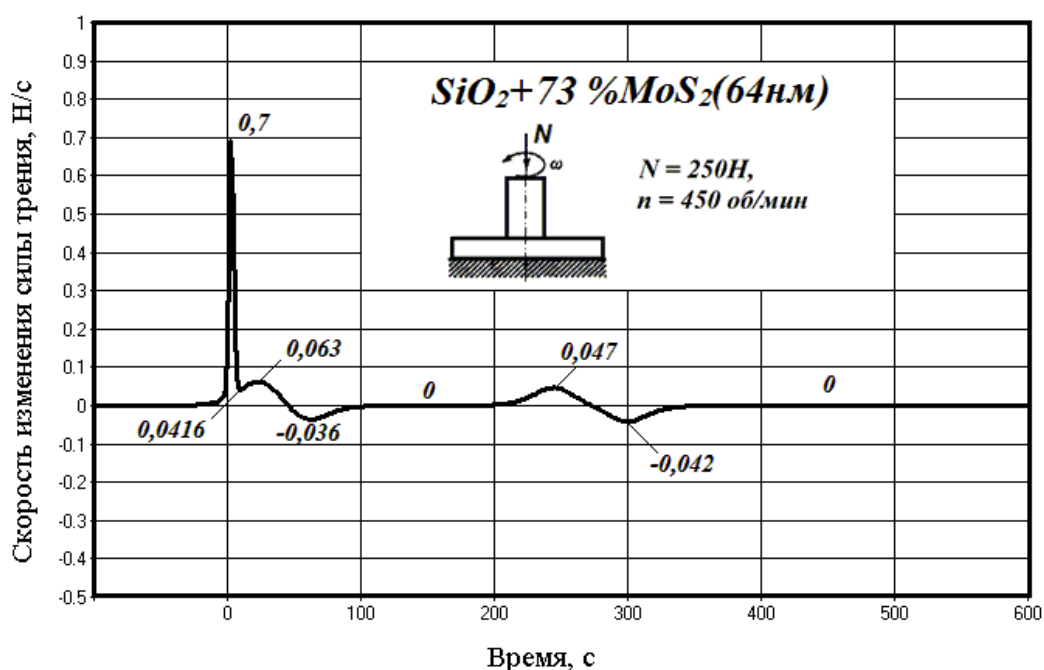


Рис.5. Зависимость мгновенной скорости изменения силы трения вращеия от времени при трении по нанокпозиционному покрытию  $\text{SiO}_2 + 73\% \text{MoS}_2 (64 \text{ нм})$

Из рисунка 5 видно, что вначале опыта, так же, как и в предыдущем случае, имело место скачкообразное приращение скорости изменения силы трения до значения  $\approx 0,7$  Н/с, затем, также скачкообразно она снизилась до значения  $\approx 0,0416$  Н/с, а затем плавно повысилась до  $\approx 0,063$  Н/с.

Далее последовало плавное изменение скорости до значения  $\approx -0,036$  Н/с, после чего наблюдалось плавное приращение скорости до обращения в 0 Н/с и начался первый квазистационарный уча-

сток. Затем после интервала  $t_1 \in [100; 200]$  скорость плавно изменилась до значения  $\approx 0,047$  Н/с, после чего также плавно изменилась до значения  $\approx -0,042$  Н/с, а далее постепенно обратилась в 0 и начался итоговый (второй) квазистационарный режим трения.

Разность зависимостей силы трения от времени между матрицей SiO<sub>2</sub> (рис.2) и нанокпозиционным покрытием SiO<sub>2</sub> + 73%MoS<sub>2</sub> (64 нм) (рис.4) показана на рисунке 6.

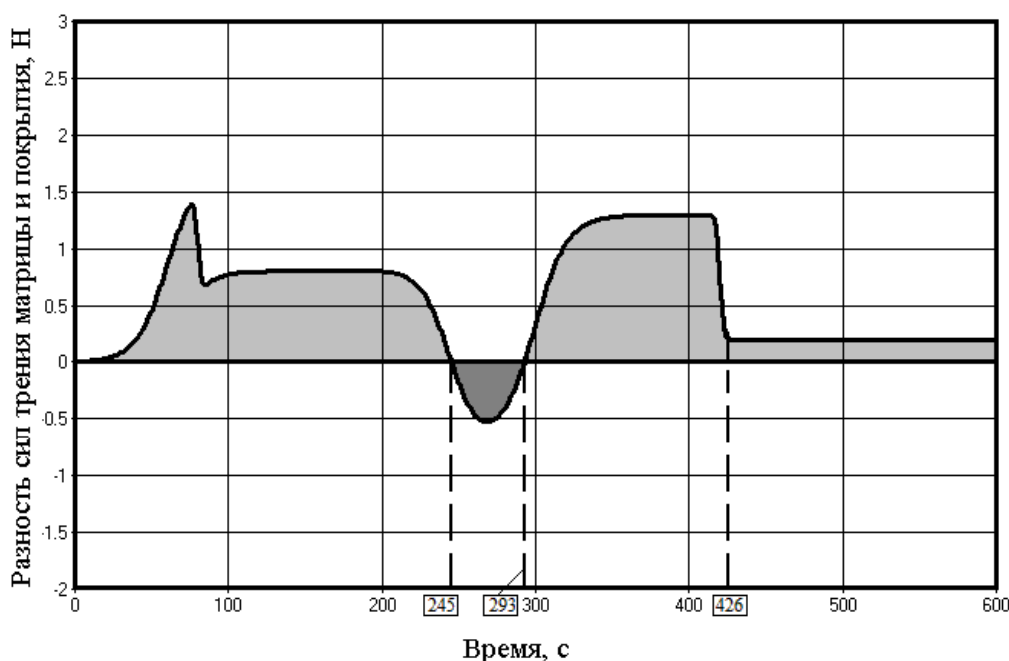


Рис.6. Разность зависимостей сил трения от времени между матрицей и покрытием SiO<sub>2</sub> + 73%MoS<sub>2</sub> (64 нм)

Из рисунка 6 видно, что наибольшие антифрикционные эффекты были проявлены на интервале  $t \in [0; 245] \cup [293; 426]$ , на интервале  $t \in (245; 293)$  сила трения у матрицы оказалась меньше, чем у покрытия. На интервале  $t \in (426; 600]$  разность постоянна, мала и составляет всего 0,2 Н, что говорит о преобразовании как свойств наночастиц, так и покрытия в целом в условиях жёсткого фрикционного термомеханического воздействия.

На основании проведённого лабораторного исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. В интервале времени  $t \in [0; 245]$  сила трения (коэффициент трения), при введении в матрицу наночастиц дисульфида молибдена размером 64 нм в концентрации 73% по массе, снижается до 26% относительно SiO<sub>2</sub>.

2. В интервале времени  $t \in [293; 426]$  сила трения (коэффициент трения), при

введении в матрицу наночастиц дисульфида молибдена размером 64 нм в концентрации 73% по массе, снижается до 25% относительно  $\text{SiO}_2$ .

3. В результате испытания нанокomпозиционного покрытия было обнаружено меньше резких скачков мгновенной скорости изменения силы трения, а переходы были более плавные, чем у  $\text{SiO}_2$ , что говорит о сглаживающем антифрикционном действии наночастиц.

Полученные результаты могут быть рационально использованы при создании ресурсосберегающих технологий обработки материалов с применением новых нанокomпозиционных покрытий и смазок [19-51].

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда по приоритетному направлению деятельности Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований по приоритетным тематическим направлениям исследований» научному проекту: «Формирование беспористых покрытий из нанокomпозиционных материалов типа «износостойкая матрица – наночастицы дисульфида молибдена (вольфрама)», обладающих низким коэффициентом трения, методом химического осаждения из газовой фазы», № 15-13-00045.*

#### Список литературы

1. Коротеев В.О. Синтез и физико-химические характеристики низкоразмерных сульфидов молибдена на носителях из терморасширенного графита и углеродных нанотрубок: дис. ... канд. хим. наук 02.00.04. Новосибирск, 2012. 137с.

2. Rapoport L., Fleischer N., Tenne R. Applications of  $\text{WS}_2$  ( $\text{MoS}_2$ ) inorganic nanotubes and fullerene-like nanoparticles for

solid lubrication and for structural nanocomposites, Journal of Materials Chemistry, 2005, vol.15. pp. 1782-1788.

3. Feldman Y., Wasserman E., Srolovitz D.J., Tenne R. High-Rate, Gas-Phase Growth of  $\text{MoS}_2$  Nested Inorganic Fullerenes and Nanotubes. Science, 1995, vol. 267, pp. 222-225.

4. Feldman Y., Frey G.L., Homyonfer M., Lyakhovitskaya V., Margulis L., Cohen H., Hodes G., Hutchison J.L., Tenne R. Bulk Synthesis of Inorganic Fullerene-like  $\text{MS}_2$  ( $\text{M} = \text{Mo}, \text{W}$ ) from the Respective Trioxides and the Reaction Mechanism. Journal of the American Chemical Society, 1996, vol. 118, pp. 5362-5367.

5. Margulis L., Dluzewski P., Feldman Y., Tenne R. TEM study of chirality in  $\text{MoS}_2$  nanotubes. Journal of Microscopy, 1996. vol. 181, pp. 68-71.

6. Frey G., Tenne R., Matthews M., Dresselhaus M., Dresselhaus G. Optical properties of  $\text{MS}_2$  ( $\text{M} = \text{Mo}, \text{W}$ ) inorganic fullerene-like and nanotube material: Optical absorption and resonance Raman measurements. Journal of Materials Research, 1998, vol. 13, pp. 2412-2417.

7. Frey G.L., Elani S., Homyonfer M., Feldman Y., Tenne R. Optical-absorption spectra of inorganic fullerene-like  $\text{MS}_2$  ( $\text{M} = \text{Mo}, \text{W}$ ). Phys. Rev. B, 1998, vol. 57, pp. 6666-6671.

8. Frey G.L., Tenne R., Matthews M.J., Dresselhaus M.S., Dresselhaus G. Raman and resonance Raman investigation of  $\text{MoS}_2$  nanoparticles. Phys. Rev. B, 1999, vol. 60, pp. 2883-2892

9. Zak A., Feldman Y., Alperovich V., Rosentsveig R., Tenne R. Growth Mechanism of  $\text{MoS}_2$  Fullerene-like Nanoparticles by Gas-Phase Synthesis. Journal of the American Chemical Society, 2000, vol. 122, pp. 11108-11116.

10. Составляющие технологического процесса создания смазочных композиционных материалов, содержащих высокодисперсные частицы слоистого модификатора трения / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2015. № 4 (61). С. 19-25.
11. О диспергировании в маслах дисперсных наполнителей при приготовлении смазочных композиционных материалов и в процессе функционирования узлов трения / А.Д. Бреки, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2015. № 4 (61). С. 51-54.
12. О расчёте седиментации высокодисперсного наполнителя при хранении жидкого смазочного композиционного материала / А.Д. Бреки, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2015. № 5 (62). С. 27-31.
13. О качении шара и цилиндра по криволинейной поверхности с вязкой прослойкой из жидкого смазочного композиционного материала / А.Д. Бреки, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2015. № 4 (17). С. 8-12.
14. Состояние нефтяных смазочных композиционных материалов в подшипниковых узлах в процессе теплообмена / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 12-1. С. 117-124.
15. Общие свойства и особенности взаимодействия дисперсных компонентов смазочного материала / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков // Современное машиностроение. Наука и образование. 2014. № 4. С. 319-326.
16. Влияние антифрикционных дисперсных материалов на относительную опорную длину профиля поверхностей трения деталей / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков // Современное машиностроение. Наука и образование. 2014. № 4. С. 327-334.
17. Исследование нагрузочной способности смазочных композиций с наночастицами WS<sub>2</sub> и WSe<sub>2</sub> для железнодорожных втулок / А.Д. Бреки, Е.С. Васильева, М.Ю. Максимов, С.Г. Чулкин // Вопросы материаловедения. 2012. № 2 (70). С. 109-113.
18. Взаимодействие дисперсных компонентов смазочного композиционного материала, содержащего наночастицы диалкогенидов вольфрама / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 5-2. С. 136-144.
19. Технология конструкционных и эксплуатационных материалов: учебник / А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, В.И. Золотухин, Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, А.Д. Бреки; под. ред. проф. А.Е. Гвоздева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 351 с.
20. Макаров Э.С., Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М. Теория пластичности дилатирующих сред: монография / под ред. проф. А.Е. Гвоздева, 2-е изд., перераб. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 337 с.
21. Триботехнические свойства композиционных покрытий с полиимидными матрицами и наполнителями из наночастиц диалкогенидов вольфрама для узлов



трения машин: монография / А.Д. Бреки, В.В. Кудрявцев, А.Л. Диденко, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, Н.Н. Сергеев, Н.Е. Стариков, А.Е. Гвоздев; под ред. А.Д. Бреки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 128 с.

21. Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт автомобиля: учебное пособие / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, К.Г. Мирза, Ю.С. Дорохин, Д. М. Хонелидзе. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 174 с.

22. Основы технологической подготовки: учебное пособие / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, А.Д. Бреки, Д.А. Провоторов, В.И. Золотухин Н.Е. Стариков, П.Н. Медведев, Д.В. Малий, Ю.С. Дорохин, Д.Н. Боголюбова, А.А. Калинин, О.В. Кузовлева, К.Н. Старикова, С.Н. Кутепов, Д.М. Хонелидзе, В.В. Новикова; под ред. проф. А.Е. Гвоздева. Изд. 2-е, испр. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 187 с.

23. Материаловедение: учебник для вузов / Ф.К. Малыгин, Н.Е. Стариков, А.Е. Гвоздев, В.И. Золотухин, Н.Н. Сергеев, А.Д. Бреки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 268 с.

24. Триботехнические характеристики жидких смазочных и полиамидных композиционных материалов, содержащих антифрикционные наночастицы дихалькогенидов вольфрама / А.Д. Бреки, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, Н.Е. Стариков, Н.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, А.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев; под ред. А.Д. Бреки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 276 с.

25. Многопараметрическая оптимизация параметров лазерной резки стальных листов / А.Е. Гвоздев, И.В. Голышев., И.В. Минаев, А.Н. Сергеев, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, Д.М. Хонелидзе, А.Г. Колмаков // Материаловедение. 2015. № 2. С. 31-36.

26. Синтез и триботехнические свойства композиционных покрытий с матрицей из полиамида ПМ-ДАДФЭ и наполнителями из наночастиц дихалькогенидов вольфрама при сухом трении скольжения / А.Д. Бреки, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, А.Г. Колмаков, Ю.А. Фадин, Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов // Материаловедение. 2015. № 12. С. 36-40.

27. Постановка задачи расчета деформационной повреждаемости металлов и сплавов / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, В.И. Золотухин, Д.А. Провоторов // Производство проката. 2015. № 10. С. 18-26.

28. Триботехнические свойства композиционных покрытий на основе полигетероарилена «Р-ОДФО» с наполнителем из наночастиц диселенида вольфрама / А.Д. Бреки, Ю.А. Фадин, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов // Известия ТулГУ. Серия: Технические науки. 2015. Вып.11. Ч.1. С. 133-139.

29. Влияние смазочного композиционного материала с наночастицами диселенида вольфрама на трение в подшипниках качения / А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Ю.А. Фадин, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Ю.Е. Титова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып.11. Ч.1. С. 171-180.

30. Триботехнические свойства композиционных покрытий на основе полигетероарилена «ДАИ» с наполнителем из наночастиц дихалькогенидов вольфрама / А.Д. Бреки, Ю.А. Фадин, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, А.А. Калинин, Д.А. Провоторов // Известия Туль-

ского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып.8. Ч.2. С. 148-155.

31. Триботехнические свойства композиционных покрытий на основе полигетероарилена «Р-ОООД» с наполнителем из наночастиц диселенида вольфрама / А.Д. Бреки, Ю.А. Фадин, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып.8. Ч.2. С. 181-188.

32. Взаимодействие дисперсных компонентов смазочного композиционного материала, содержащего наночастицы дихалькогенидов вольфрама / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып.7. Ч.1. С. 197-205.

33. Выбор дисперсности наполнителя из частиц дихалькогенидов вольфрама для создания смазочного композиционного материала / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, А.А. Калинин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып.7. Ч.1. С. 235-243.

34. Оценка влияния размера частиц и концентрации порошков горных пород на противоизносные свойства жидких смазочных композиций / В.В. Медведева, М.А. Скотникова, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов, Ю.А. Фадин, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып.11. Ч.1. С. 57-65.

35. Влияние смазочного композиционного материала с наночастицами дисульфида вольфрама на трение в подшипниках

качения / А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Ю.А. Фадин, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Н.Сергеев, Д.А. Провоторов, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып.11. Ч.1. С. 78-86.

36. Оценка взаимодействия между наночастицами дихалькогенидов вольфрама в среде жидкого смазочного материала / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып.7. Ч.2. С. 8-14.

37. Оценка влияния жидкого смазочного композиционного материала с наночастицами геомодификатора на трение в подшипниковом узле / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2015. № 3 (16). С. 17-23.

38. Комплексный подход к исследованию экстремальных эффектов в металлических, композиционных и нанокристаллических материалах: коллективная монография / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, В.И. Золотухин, А.Д. Бреки, П.Н. Медведев, М.Н. Гаврилин, Г.М. Журавлев, Д.В. Малий, Ю.С. Дорохин, Д.Н. Боголюбова, А.А. Калинин, Д.Н. Романенко, И.В. Минаев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Проскуряков, А.С. Пустовгар, Ю.Е. Титова, И.В. Тихонова. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 128 с.

39. Триботехнические свойства жидких смазочных композиционных материалов, содержащих полученные методом газофазного синтеза высокодисперсные дисульфид и диселенид вольфрама: монография / А.Д. Бреки, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев.; под ред. А.Д. Бреки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 152 с.

40. Жидкие смазочные композиционные материалы, содержащие высокодисперсные наполнители, для подшипниковых узлов управляемых систем: монография / А.Д. Бреки, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 144 с.

41. Механические свойства конструкционных и инструментальных сталей в состоянии предпревращения при термомеханическом воздействии / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, О.В. Кузовлева, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Деформация и разрушение материалов. 2013. № 11. С. 39-42.

42. Гвоздев А.Е., Афанаскин А.В., Гвоздев Е.А. Закономерности проявления сверхпластичности сталей Р6М5 и 10Р6М5-МП // Металловедение и термическая обработка материалов. 2002. № 6. С. 32-36.

43. Гвоздев А.Е. Производство заготовок быстрорежущего инструмента в условиях сверхпластичности. М.: Машиностроение, 1992. 176 с.

44. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Starikov N.E., Provotorov D.A., Sergeyev N.N., Khonelidze D.M. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon. Inorganic materials: Applied Research, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 126-129.

45. Gvozdev A.E., Sergeyev N.N., Minayev I.V., Kolmakov A.G., Tikhonova I.V., Sergeyev A.N., Provotorov D.A., Khonelidze D.M., Maliy D.V., Golyshev I.V. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting. Inorganic materials: Applied Research. 2017, vol. 8, no. 1, pp. 148-152.

46. Breki A.D., Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V.,

Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Provotorov D.A., Starikov N.E., Fadin Yu.A. Synthesis and dry sliding behavior of composite coating with (R-OOO)FT polyimide matrix and tungsten disulfide nanoparticle filler. Inorganic materials: Applied Research, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 32-36.

47. Breki A.D., Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Gvozdev A.E., Sergeyev N.N., Provotorov D.A., Starikov N.E., Fadin Yu.A., Kolmakov A.G. Composite coatings based on A-OOO polyimide and WS<sub>2</sub> nanoparticle filler. Inorganic materials: Applied Research, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 56-59.

48. Gvozdev A.E., Sergeyev N.N., Minayev I.V., Kolmakov A.G., Tikhonova I.V. Role of nucleation in the of first-order phase transformations. Inorganic Materials: Applied Research. 2015, vol. 6, no. 4, pp. 283-288.

49. Gvozdev A.E., Golyshev I.V., Minayev I.V., Sergeyev A.N., Sergeyev N.N., Tikhonova I.V., Khonelidze D.M., Kolmakov A.G. Multiparametric optimization of laser cutting of steel sheets. Inorganic Materials: Applied Research. 2015, vol. 6, no. 4, pp. 305-310.

50. Gvozdev A.E., Bogolyubova D.N., Sergeev N.N., Kolmakov A.G., Provotorov D.A., Tikhonova I.V. Features of softening processes of aluminum, copper, and their alloys under hot deformation. Inorganic Materials: Applied Research. 2015, vol. 6, no. 1, pp. 32-40.

51. Gvozdev A.E., Minaev I.V., Sergeev N.N., Kolmakov A.G., Provotorov D.A., Tikhonova I.V. Grain size effect of austenite on the kinetics of pearlite transformation in low-and medium-carbon low-alloy steels. Inorganic Materials: Applied Research, 2015, vol. 6, no. 1. pp. 41-44.

*Поступила в редакцию 24.06.17*

UDC 621.2.082.18

**A. D. Breki**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, St. Petersburg State Polytechnic University Peter the Great (St. Petersburg) (e-mail: albreki@yandex.ru)

**S.E. Aleksandrov**, Doctor of Chemical Sciences, Professor, St. Petersburg Polytechnic University Peter the Great (e-mail: sevgalexandrov@gmail.com)

**K.S. Tyurikov**, Graduate Student, St. Petersburg State Polytechnic University Peter the Great (St. Petersburg) (e-mail: tmet@ftim.spbstu.ru)

**A.E. Gvozdev**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula) (e-mail: technology@tspu.tula.ru)

**E.V. Ageev**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk) (e-mail: ageev\_ev@mail.ru)

**D.A. Provotorov**, Candidate of Engineering Sciences, Leading Engineer-Constructor, OOO NPP "Vulkan-TM" (Tula) (e-mail: prodmyt@rambler.ru)

**V.V. Kutc**, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk) (e-mail: kuc-vadim@yandex.ru)

### LABORATORY STUDIES OF THE FRICTION OF SHKH15 STEEL ON THE COATING BASED ON $\text{SiO}_2$ CONTAINING NANOPARTICLES $\text{MoS}_2$ WITH AN AVERAGE SIZE OF 64 NM

*Currently is of practical interest to identify patterns of influence of nanoparticles of molybdenum disulfide friction in friction pairs "steel – non-porous nanocomposite coating" to increase the antifriction properties of the coatings of a tribotechnical purpose.*

*Within this work the results of researches of friction spinning steel grade SHKH15 at the surface non-porous coating with a matrix of silicon dioxide, is filled with nanoparticles of molybdenum disulfide size 64nm at a concentration of 73%, deposited on a substrate of stainless steel 12X18H10T.*

*For the study were taken samples of steel 12KH18N10T, are coated with coatings of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{SiO}_2+73\%\text{MoS}_2$  (64 nm). The thickness of the applied pore-free coating was about 1 mm. As the rotating counterbody was used a cylindrical sample (video) of bearing steel SH-15 with a diameter of 10mm. Selected solid lubricating material – nanosized powder of molybdenum disulfide spherical shape.*

*In the process of testing rotating steel sample its flat part against the plane clamped in the clamp of the sample. The clamp is fixed to a bearing arrangement with a cord and tentacle in the process of experience is restrained from rotation imparted movable roller. With tentacle on the computer transferred the data on the friction force and the current load. In all experiments, the friction load was 250 N, and the frequency of rotation of the shaft, which was clamped steel roller was 450 rpm, the friction time was 600 s.*

*It was established experimentally that as a result of friction spinning according to the scheme "plane-plane" of the specimen of bearing steel SHKH15 at the nanocomposite coating are observed friction effects relative to similar tests of coatings of unfilled nanoparticles of silicon dioxide. Shown stabilizing effect of nanoparticles on the process of friction interaction in the regime of spinning friction.*

**Key words:** friction, nanoparticles, solid lubricant, antifriction coating, lubricant layer.

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2017-21-4-52-67

**For citation:** Breki A. D., Aleksandrov S.E., Tyurikov K.S., Gvozdev A.E., Ageev E.V., Provotorov D. A., Kutc V.V. Laboratory Studies of the Friction of SHKH15 Steel on the Coating Based on  $\text{SiO}_2$  Containing Nanoparticles  $\text{MoS}_2$  with an Average Size of 64 Nm. Proceedings of the Southwest State University, 2017, vol. 21, no. 4(73), pp. 52-67 (in Russ.).

\*\*\*

#### Reference

1. Koroteev V.O. Sintez i fiziko-himicheskie karakteristiki nizkorazmernih sulfidov molibdena na nositeljah iz termorasshirennogo grafita i uglerodnyh na-

notrub: dis. ... kand. him. nauk 02.00.04. Novosibirsk, 2012. 137 p.

2. Rapoport L., Fleischer N., Tenne R. Applications of  $\text{WS}_2$  ( $\text{MoS}_2$ ) inorganic nanotubes and fullerene-like nanoparticles for solid lubrication and for structural nano-

composites, *Journal of Materials Chemistry*, 2005, vol.15. pp. 1782-1788.

3. Feldman Y., Wasserman E., Srolovitz D.J., Tenne R. High-Rate, Gas-Phase Growth of MoS<sub>2</sub> Nested Inorganic Fullerenes and Nanotubes. *Science*, 1995, vol. 267, pp. 222-225.

4. Feldman Y., Frey G.L., Homyonfer M., Lyakhovitskaya V., Margulis L., Cohen H., Hodes G., Hutchison J.L., Tenne R. Bulk Synthesis of Inorganic Fullerene-like MS<sub>2</sub> (M = Mo, W) from the Respective Trioxides and the Reaction Mechanism. *Journal of the American Chemical Society*, 1996, vol. 118, pp. 5362-5367.

5. Margulis L., Dluzewski P., Feldman Y., Tenne R. TEM study of chirality in MoS<sub>2</sub> nanotubes. *Journal of Microscopy*, 1996. vol. 181, pp. 68-71.

6. Frey G., Tenne R., Matthews M., Dresselhaus M., Dresselhaus G. Optical properties of MS<sub>2</sub> (M = Mo, W) inorganic fullerene-like and nanotube material: Optical absorption and resonance Raman measurements. *Journal of Materials Research*, 1998, vol. 13, pp. 2412-2417.

7. Frey G.L., Elani S., Homyonfer M., Feldman Y., Tenne R. Optical-absorption spectra of inorganic fullerenelike MS<sub>2</sub> (M=Mo, W). *Phys. Rev. B*, 1998, vol. 57, pp. 6666-6671.

8. Frey G.L., Tenne R., Matthews M.J., Dresselhaus M.S., Dresselhaus G. Raman and resonance Raman investigation of MoS<sub>2</sub> nanoparticles. *Phys. Rev. B*, 1999, vol. 60, pp. 2883-2892.

9. Zak A., Feldman Y., Alperovich V., Rosentsveig R., Tenne R. Growth Mechanism of MoS<sub>2</sub> Fullerene-like Nanoparticles by Gas-Phase Synthesis. *Journal of the American Chemical Society*, 2000, vol. 122, pp. 11108-11116.

10. Sostavljajushhie tehnologicheskogo processa sozdaniya smazochnykh kompozicionnykh materialov, soderzhashhih vysokodispersnye chasticy sloistogo modifikatora trenija / A.D. Breki, O.V. Tolochko, N.E.

Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeev, E.V. Ageev, A.E. Gvozdev. *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 4 (61), pp. 19-25.

11. O dispergirovanii v maslah disperznykh napolnitelej pri prigotovlenii smazochnykh kompozicionnykh materialov i v processe funkcionirovanija uzlov trenija / A.D. Breki, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, E.V. Ageev, A.E. Gvozdev. *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 4 (61), pp. 51-54.

12. O raschjote sedimentacii vysokodispersnogo napolnitelja pri hranenii zhidkogo smazochnogo kompozicionnogo materiala / A.D. Breki, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, E.V. Ageev, A.E. Gvozdev // *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 5 (62), pp. 27-31.

13. O kachenii shara i cilindra po krivolinejnoj poverhnosti s vjazkoj proslojkoj iz zhidkogo smazochnogo kompozicionnogo materiala / A.D. Breki, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, E.V. Ageev, A.E. Gvozdev. *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii*, 2015, no. 4 (17), pp. 8-12.

14. Costojanie neftjanykh smazochnykh kompozicionnykh materialov v podshipnikovykh uzlah v processe teplomassoobmena / A.D. Breki, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehniceskie nauki*, 2014, no. 12-1, pp. 117-124.

15. Obshhie svojstva i osobennosti vzaimodejstvija dispersnykh komponentov smazochnogo materiala / A.D. Breki, O.V. Tolochko, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*, 2014, no. 4, pp. 319-326.

16. Vlijanie antifrikcionnykh dispersnykh materialov na odnositel'nuju opornuju dlinu profilja poverhnostej trenija detalej / A.D. Breki, O.V. Tolochko, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*, 2014, no. 4, pp. 327-334.

17. Issledovanie nagruzochnoj sposobnosti smazochnyh kompozicij s nanochasticami WS<sub>2</sub> i WSe<sub>2</sub> dlja zheleznodorozhnyh vtulok / A.D. Breki, E.S. Vasil'eva, M.Ju. Maksimov, S.G. Chulkin. Voprosy materialovedenija, 2012, no. 2 (70), pp. 109-113.

18. Vzaimodejstvie dispersnyh komponentov smazochnogo kompozicionnogo materiala, sodержashhego nanochasticy dihal'kogenidov vol'frama / A.D. Breki, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov. Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehniceskie nauki, 2015, no. 5-2, pp. 136-144.

19. Tehnologija konstrukcionnyh i jekspluacionnyh materialov: uchebnik / A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, V.I. Zolotuhin, N.N. Sergeev, A.N. Sergeev, A.D. Breki; pod. red. prof. A.E. Gvozdeva. Tula: Izd-vo TulGU, 2016. 351 p.

20. Makarov Je.S., Gvozdev A.E., Zhuravlev G.M. Teorija plastichnosti dilatirujushhih sred: monografija / pod red. prof. A.E. Gvozdeva, 2-e izd., pererab. i dop. Tula: Izd-vo TulGU, 2015. 337 p.

21. Tribotehniceskie svojstva kompozicionnyh pokrytij s poliimidnymi matricami i napolniteljami iz nanochastic dihal'kogenidov vol'frama dlja uzlov trenija mashin: monografija / A.D. Breki, V.V. Kudrjavcev, A.L. Didenko, E.S. Vasil'eva, O.V. Tolochko, N.N. Sergeev, N.E. Starikov, A.E. Gvozdev; pod red. A.D. Breki. Tula: Izd-vo TulGU, 2015. 128 p.

21. Jekspluacija, tehniceskoe obsluzhivanie i remont avtomobilja: uchebnoe posobie / N.N. Sergeev, A.E. Gvozdev, A.N. Sergeev, K.G. Mirza, Ju.S. Dorohin, D. M. Honelidze. Tula: Izd-vo TulGU, 2015. 174 p.

22. Osnovy tehnologiceskoj podgotovki: uchebnoe posobie / N.N. Sergeev, A.N. Sergeev, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, A.D. Breki, D.A. Provotorov, V.I. Zolotuhin N.E. Starikov, P.N. Medvedev, D.V. Malij, Ju.S. Dorohin, D.N. Bogoljubova, A.A. Kalinin, O.V. Kuzovleva, K.N. Starikova, S.N. Kutepov, D.M.

Honelidze, V.V. Novikova; pod red. prof. A.E. Gvozdeva. Izd. 2-e, ispr. i dop. Tula: Izd-vo TulGU, 2015. 187 p.

23. Materialovedenie: uchebnik dlja vuzov / F.K. Malygin, N.E. Starikov, A.E. Gvozdev, V.I. Zolotuhin, N.N. Sergeev, A.D. Breki. Tula: Izd-vo TulGU, 2015. 268 p.

24. Tribotehniceskie harakteristiki zhidkih smazochnyh i poliamidnyh kompozicionnyh materialov, sodержashhih anti-frikcionnye nanochasticy dihal'kogenidov vol'frama / A.D. Breki, E.S. Vasil'eva, O.V. Tolochko, N.E. Starikov, N.N. Sergeev, D.A. Provotorov, A.N. Sergeev, A.E. Gvozdev; pod red. A.D. Breki. Tula: Izd-vo TulGU, 2015. 276 p.

25. Mnogoparametricheskaja optimizacija parametrov lazernoj rezki stal'nyh listov / A.E. Gvozdev, I.V. Golyshhev., I.V. Minaev, A.N. Sergeev, N.N. Sergeev, I.V. Tihonova, D.M. Honelidze, A.G. Kolmakov. // Materialovedenie, 2015, no. 2, pp. 31-36.

26. Sintez i tribotehniceskie svojstva kompozicionnyh pokrytij s matriciej iz poli-amida PM-DADFJe i napolniteljami iz nanochastic dihal'kogenidov vol'frama pri suhom trenii skol'zhenija / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudrjavcev, E.S. Vasil'eva, O.V. Tolochko, A.G. Kolmakov, Ju.A. Fadin, N.N. Sergeev, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, D.A. Provotorov. Materialovedenie, 2015, no. 12, pp. 36-40.

27. Postanovka zadachi rascheta deformacionnoj povrezhdaemosti metallov i splavov / G.M. Zhuravlev, A.E. Gvozdev, N.N. Sergeev, V.I. Zolotuhin, D.A. Provotorov. Proizvodstvo prokata, 2015, no. 10, pp. 18-26.

28. Tribotehniceskie svojstva kompozicionnyh pokrytij na osnove poli-geteroarilena «RODFO» s napolnitelem iz nanochastic diselenida vol'frama / A.D. Breki, Ju.A. Fadin, A.L. Didenko, V.V. Kudrjavcev, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, D.A. Provotorov. Izvestija TulGU. Serija: Tehniceskie nauki, 2015, vyp.11, ch.1, pp. 133-139.

29. Vlijanie smazochного kompozicionного materiala s nanochasticami diselenida vol'frama na trenie v podshipnikah kachenija / A.D. Breki, V.V. Medvedeva, Ju.A. Fadin, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.N. Sergeev, D.A. Provotorov, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, Ju.E. Titova. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvenного universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2015, vyp.11, ch.1, pp. 171-180.

30. Tribotehnicеские svojtva kompozicionных pokrytij na osnove poligeteroarilena «DAI» s napolnitelem iz nanochastic dihal'kogenidov vol'frama / A.D. Breki, Ju.A. Fadin, A.L. Didenko, V.V. Kudrjavcev, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, A.A. Kalinin, D.A. Provotorov. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvenного universiteta. Tehnicheskie nauki*. 2015, vyp.8, ch. 2, pp. 148-155.

31. Tribotehnicеские svojtva kompozicionных pokrytij na osnove poligeteroarilena «R-OOOD» s napolnitelem iz nanochastic diselenida vol'frama / A.D. Breki, Ju.A. Fadin, A.L. Didenko, V.V. Kudrjavcev, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, D.A. Provotorov. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvenного universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2015, vyp.8, ch.2, pp. 181-188.

32. Vzaimodejstvie dispersnyh komponentov smazochного kompozicionного materiala, soderzhashhego nanochasticy dihal'kogenidov vol'frama / A.D. Breki, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, D.A. Provotorov. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvenного universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2015, vyp.7, ch.1., pp. 197-205.

33. Vybor dispersnosti napolnitelja iz chastic dihal'kogenidov vol'frama dlja sozdanija smazochного kompozicionного materiala / A.D. Breki, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, A.A. Kalinin // *Izvestija Tul'skogo gosudarstvenного universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2015, vyp.7, ch.1, pp. 235-243.

34. Ocenka vlijanija razmera chastic i koncentracii poroshkov gornyh porod na protivoznosnye svojtva zhidkih smazochных kompozicij / V.V. Medvedeva, M.A. Skotnikova, A.D. Breki, N.A. Krylov, Ju.A. Fadin, A.N. Sergeev, D.A. Provotorov, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvenного universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2015, vyp.11, ch.1, pp. 57-65.

35. Vlijanie smazochного kompozicionного materiala s nanochasticami disulfida vol'frama na trenie v podshipnikah kachenija / A.D. Breki, V.V. Medvedeva, Ju.A. Fadin, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.N.Sergeev, D.A. Provotorov, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvenного universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2015, vyp.11, ch. 1, pp. 78-86.

36. Ocenka vzaimodejstvija mezhdu nanochasticami dihal'kogenidov vol'frama v srede zhidkogo smazochного materiala / A.D. Breki, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, D.A. Provotorov. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvenного universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2015, vyp.7, ch.2, pp. 8-14.

37. Ocenka vlijanija zhidkogo smazochного kompozicionного materiala s nanochasticami geomodifikatora na trenie v podshipnikovom uzle / A.D. Breki, O.V. Tolochko, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, E.V. Ageev, A.E. Gvozdev. *Izvestija Jugo-Zapadного gosudarstvenного universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii*, 2015, no. 3 (16), pp. 17-23.

38. Kompleksnyj podhod k issledovaniju jekstremal'nyh jeffektov v metallicheskih, kompozicionных i nanokristallicheskih materialah: kollektivnaja monografija / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeev, A.N. Sergeev, D.A. Provotorov, V.I. Zolotuhin, A.D. Breki, P.N. Medvedev, M.N. Gavrilin, G.M. Zhuravlev, D.V. Malij, Ju.S. Dorohin, D.N. Bogoljubova, A.A. Kalinin, D.N. Romanenko, I.V. Minaev, O.V. Kuzovleva, N.E. Proskurjakov, A.S. Pustovgar, Ju.E. Titova, I.V. Tihonova. Tula: Izd-vo TulGU, 2014, 128 p.

39. Tribotekhnicheskie svoystva zhidkih smazochnykh kompozicionnykh materialov, sodержashhih poluchennye metodom gazofaznogo sinteza vysokodispersnye disulfid i diselenid vol'frama: monografija / A.D. Breki, E.S. Vasil'eva, O.V. Tolochko, N.N. Sergeev, A.E. Gvozdev.; pod red. A.D. Breki. Tula: Izd-vo TulGU, 2014, 152 p.

40. Zhidkie smazochnye kompozicionnye materialy, sodержashhie vysokodispersnye napolniteli, dlja podshipnikovyyh uzlov upravlyaemyh sistem: monografija / A.D. Breki, E.S. Vasil'eva, O.V. Tolochko, N.N. Sergeev, A.E. Gvozdev. Tula: Izd-vo TulGU, 2014, 144 p.

41. Mehanicheskie svoystva konstrukcionnykh i instrumental'nykh stalej v sostojanii predprevrashhenija pri termomehanicheskom vozdejstvii / A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, O.V. Kuzovleva, N.N. Sergeev, I.V. Tikhonova. Deformacija i razrushenie materialov, 2013, no. 11, pp. 39-42.

42. Gvozdev A.E., Afanaskin A.V., Gvozdev E.A. Zakonomernosti proyavlenija sverhplastichnosti stalej R6M5 i 10R6M5-MP. Metallovedenie i termicheskaja obrabotka materialov, 2002, no. 6, pp. 32-36.

43. Gvozdev A.E. Proizvodstvo zagotovok bystrorezhushhego instrumenta v uslovijah sverhplastichnosti. M.: Mashinostroenie, 1992. 176 p.

44. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Starikov N.E., Provotorov D.A., Sergeev N.N., Khonelidze D.M. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon. Inorganic materials: Applied Research, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 126-129.

45. Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Minayev I.V., Kolmakov A.G., Tikhonova I.V., Sergeev A.N., Provotorov D.A., Khonelidze D.M., Maliy D.V., Golyshev I.V. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser

cutting. Inorganic materials: Applied Research, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 148-152.

46. Breki A.D., Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Provotorov D.A., Starikov N.E., Fadin Yu.A. Synthesis and dry sliding behavior of composite coating with (R-OOO)FT polyimide matrix and tungsten disulfide nanoparticle filler. Inorganic materials: Applied Research, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 32-36.

47. Breki A.D., Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Provotorov D.A., Starikov N.E., Fadin Yu.A., Kolmakov A.G. Composite coatings based on A-OOO polyimide and WS<sub>2</sub> nanoparticle filler. Inorganic materials: Applied Research, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 56-59.

48. Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Minayev I.V., Kolmakov A.G., Tikhonova I.V. Role of nucleation in the of first-order phase transformations. Inorganic Materials: Applied Research, 2015, vol. 6, no. 4, pp. 283-288.

49. Gvozdev A.E., Golyshev I.V., Minayev I.V., Sergeev A.N., Sergeev N.N., Tikhonova I.V., Khonelidze D.M., Kolmakov A.G. Multiparametric optimization of laser cutting of steel sheets. Inorganic Materials: Applied Research, 2015, vol. 6, no. 4, pp. 305-310.

50. Gvozdev A.E., Bogolyubova D.N., Sergeev N.N., Kolmakov A.G., Provotorov D.A., Tikhonova I.V. Features of softening processes of aluminum, copper, and their alloys under hot deformation. Inorganic Materials: Applied Research, 2015, vol. 6, no. 1, pp. 32-40.

51. Gvozdev A.E., Minaev I.V., Sergeev N.N., Kolmakov A.G., Provotorov D.A., Tikhonova I.V. Grain size effect of austenite on the kinetics of pearlite transformation in low-and medium-carbon low-alloy steels. Inorganic Materials: Applied Research, 2015, vol. 6, no. 1, pp. 41-44.