

УДК 621.2.082.18

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

**А.А. Лисенков**, д-р техн. наук, лауреат государственной премии РФ в области науки и техники, ИПМАШ РАН (Санкт-Петербург) (e-mail: lisran@yandex.ru)

**М.А. Данилова**, аспирант, СПбПУ Петра Великого (Санкт-Петербург)  
(e-mail: marina.rakovskay@yandex.ru)

**О.В. Толочко**, д-р техн. наук, профессор, СПбПУ Петра Великого (Санкт-Петербург)  
(e-mail: albreki@yandex.ru)

**Ю.А. Фадин**, д-р техн. наук, ИПМАШ РАН (Санкт-Петербург) (e-mail: fadinspb@yandex.ru)

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

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

**А.Н. Сергеев**, д-р техн. наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого (e-mail: technology@tspu.tula.ru)

**Е.В. Агеева**, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: ageeva-ev@yandex.ru)

**О.Ф. Киреенко**, канд. физ.-мат. наук, ИПМАШ РАН (Санкт-Петербург)  
(e-mail: olfkir@gmail.com)

**Д.В. Малий**, ФГБОУ ВПО «ТГПУ им. Л.Н. Толстого» (Тула)  
(e-mail: maliydmiriy@yandex.ru)

**В.В. Данковцев**, магистрант, СПбПУ Петра Великого (Санкт-Петербург)  
(e-mail: albreki@yandex.ru)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕНИЯ ВЕРЧЕНИЯ СТАЛИ ШХ15 ПО ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТОГО ПОКРЫТИЯ (AL,TI)N, НАНЕСЁННОГО НА ПОДЛОЖКУ ИЗ CoCrMo, ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТВЁРДОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ИЗ НАНОЧАСТИЦ ДИСЕЛЕНИДА ВОЛЬФРАМА**

*Для исследования были взяты образцы из CoCrMo, с нанесенным на них покрытием из (Al, Ti)N. Толщина нанесенных пористых покрытий была соответственно 3, 7 и 10 мкм. В качестве вращающегося контртела использовался цилиндрический образец (ролик) из подшипниковой стали марки ШХ-15, диаметром 10 мм. Выбранный твёрдый смазочный материал – наноразмерный порошкообразный диселенид вольфрама пластинчатой формы с размерами частиц 60x5нм.*

*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 моменте трения и действующей нагрузке. В процессе всех опытов нагрузка на пару трения составляла 334Н, а частота вращения вала, в котором был зажат стальной ролик, составляла 500 об/мин.*

*На основании проведённого исследования установлено, что покрытия (Al,Ti)N толщиной 3,7 и 10 мкм на CoCrMo способствуют снижению момента трения верчения на 18, 40 и 67% (в три раза) соответственно, относительно подложки. При использовании на фрикционном контакте порошка из наночастиц диселенида вольфрама 60x5 нм момент трения верчения относительно покрытия (Al,Ti)N толщиной 3 мкм снижается в 6,5 раз. При использовании на фрикционном контакте порошка из наночастиц диселенида вольфрама 60x5 нм момент трения верчения относительно покрытия (Al,Ti)N толщиной 7 мкм снижается в 18 раз. При использовании на фрикционном контакте порошка из наночастиц диселенида вольфрама 60x5нм момент трения верчения относительно покрытия (Al,Ti)N толщиной 10мкм снижается в 6 раз. Зависимость момента трения верчения от толщины покрытия при*

использовании диселенида вольфрама хорошо согласуется с зависимостью коэффициента трения от толщины металлических плёнок по Боудену и Тейбору.

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

\*\*\*

Известно [1, 2], что твёрдые смазочные материалы используются для решения проблем смазывания в экстремальных условиях. В авиационной и ракетной технике смазочные материалы должны работать в широком диапазоне температур (от  $-240$  до  $900$  °C). В узлах трения ядерных реакторов смазочные материалы должны иметь высокую радиационную стойкость, а в узлах трения космических объектов они должны иметь минимальную летучесть в вакууме. Твёрдые смазочные материалы применяют для смазывания узлов трения качения и скольжения (также верчения, сложного варианта скольжения) при жестких условиях функционирования трибосистем. Также они применяются для смазывания электропроводящих контактов и высокоточных механических приборов, которые требуют очень низких коэффициентов трения при пуске и для которых недопустимо использование смазочных масел и пластичных смазок. Вместе с тем, использование твердых высокодисперсных смазочных материалов в виде добавок в смазочные масла в узлах трения, где реализуется жидкая смазка, дало ряд положительных результатов [4-16].

Представляет практический интерес влияние высокодисперсных твёрдых смазочных материалов на трение в парах трения «сталь-пористое покрытие» для увеличения антифрикционных свойств покрытий триботехнического назначения.

Известно [1, 2], например, что ещё с советского времени такие распространённые твёрдые смазочные материалы, как дисульфид молибдена и графит в по-

рошкообразном виде, втирались в чистые обезжиренные поверхности трения вручную с помощью тканей, кожи, жестких кистей. Для нанесения использовались также шлифовальные круги и полировка в барабане. Отмечалось, что чем интенсивнее втирание, тем лучше была адгезия к поверхности металла.

В настоящее время получили развитие нанотехнологии, посредством которых появилась возможность получения наноразмерных порошков твёрдых смазочных материалов, вместе с тем ещё недостаточно изучено их влияние на фрикционное взаимодействие при втирании в пористые поверхности трения.

В границах данной работы приведены результаты исследований трения верчения стали марки ШХ15 по поверхности пористого покрытия  $(Al,Ti)N$ , нанесённого на подложку из  $CoCrMo$ , при использовании твёрдого смазочного материала из наночастиц диселенида вольфрама, впервые полученного методом газофазного синтеза.

Предполагается, что частицы диселенида не только будут образовывать новую поверхность на покрытии, но и плотно заполнять его поры в поверхностных слоях.

Для исследования были взяты образцы из  $CoCrMo$ , с нанесённым на них покрытием из  $(Al,Ti)N$ . Толщина нанесённых пористых покрытий была соответственно 3, 7 и 10 мкм. В качестве вращающегося контртела использовался цилиндрический образец (ролик) из подшипниковой стали марки ШХ-15, диаметром 10 мм. Выбранный твёрдый сма-

зочный материал – наноразмерный порошкообразный диселенид вольфрама пластинчатой формы с размерами частиц 60x5 нм. Исследования проводились на машине торцового трения по схеме, приведённой на рис.1.

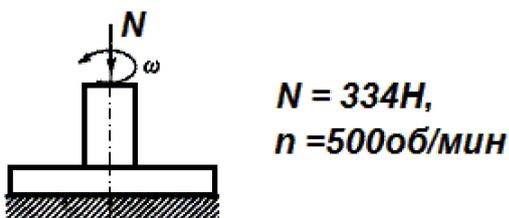


Рис.1. Схема торцового трения вращения по схеме «плоскость-плоскость»

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 моменте трения и действующей нагрузке. В процессе всех опытов нагрузка на пару трения составляла 334Н, а частота вращения вала, в котором был зажат стальной ролик, составляла 500 об/мин.

Вначале исследовали трение ролика из стали ШХ15 по поверхности СоСrМо без нанесённого на него покрытия (рис. 2).

Наблюдались колебания момента трения, связанные с параметрами качества поверхностей пар трения. Увеличение амплитуды колебаний может быть связано с усилением адгезионного взаимодействия поверхностей трения в связи с интенсивным разрушением окисных плёнок (вторичных структур) при повы-

шенной нагрузке. Средний установившийся момент трения оказался равным  $\approx 0,45$ Нм.

Далее исследовали трение ролика из стали ШХ15 по поверхности покрытия из (Al,Ti)N толщиной 3мкм, нанесённого на СоСrМо (рис.3).

Из рисунка видно, что вначале опыта имел место установившийся момент трения  $\approx 0,37$  Нм. После небольшого интервала времени при повышенной нагрузке покрытие изнашивалось и начался нестабильный режим трения, связанный со схватыванием поверхностей трения образца и подложки СоСrМо.

В результате исследования трения ролика из стали ШХ15 по поверхности покрытия из (Al,Ti)N толщиной 7 мкм, нанесённого на СоСrМо, была получена осциллограмма, показанная на рис.4.

В результате опыта установлено, что установившийся момент трения при той же нагрузке и скорости  $\approx 0,27$  Нм. Колебания момента могут быть связаны с пористостью, в связи с колебаниями площади фактического контакта поверхностей.

Далее установили зависимость момента трения от времени при испытании покрытия толщиной 10 мкм (рис.5).

В случае с покрытием (Al,Ti)N толщиной 10 мкм наблюдался наименьший установившийся момент трения  $\approx 0,15$ Нм. С течением времени заметны небольшие приращения момента трения, связанные, по-видимому, с уменьшением толщины покрытия вследствие изнашивания.

Широко известен эксперимент Ф. Боудена и Д. Тейбора по установлению зависимости коэффициента трения от толщины мягкого покрытия на более твёрдой подложке [3] (рис.6).

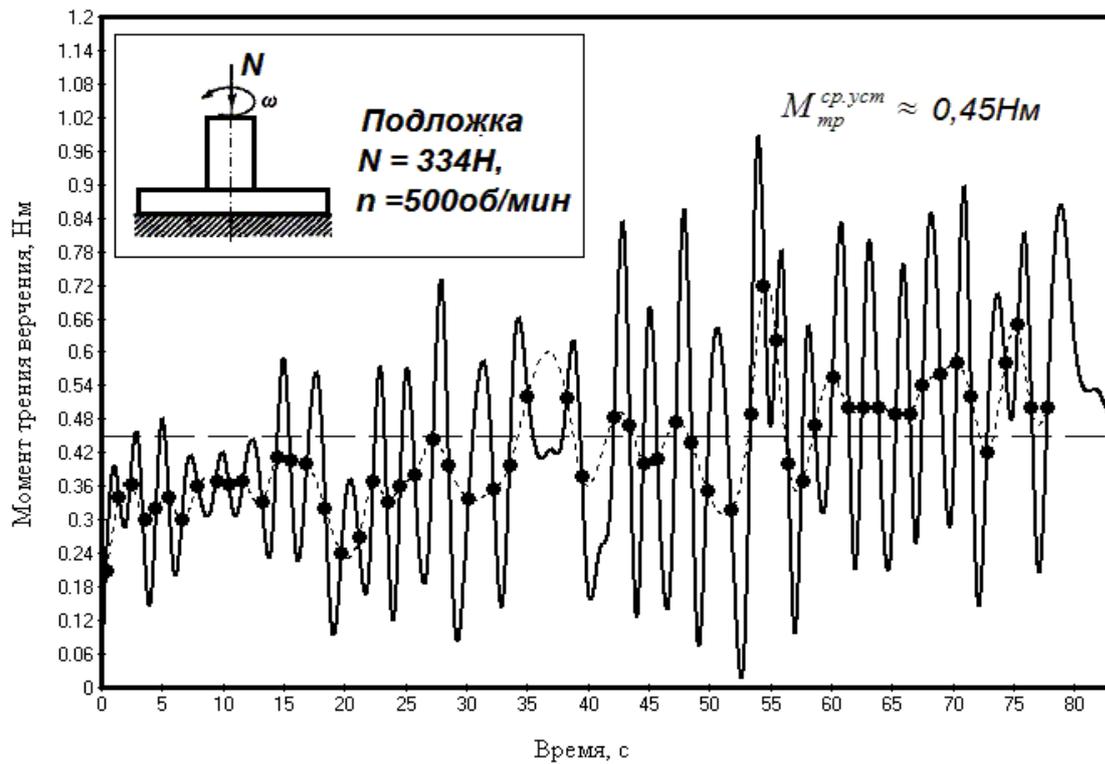


Рис. 2. Оциллограмма момента трения вращения при трении по подложке

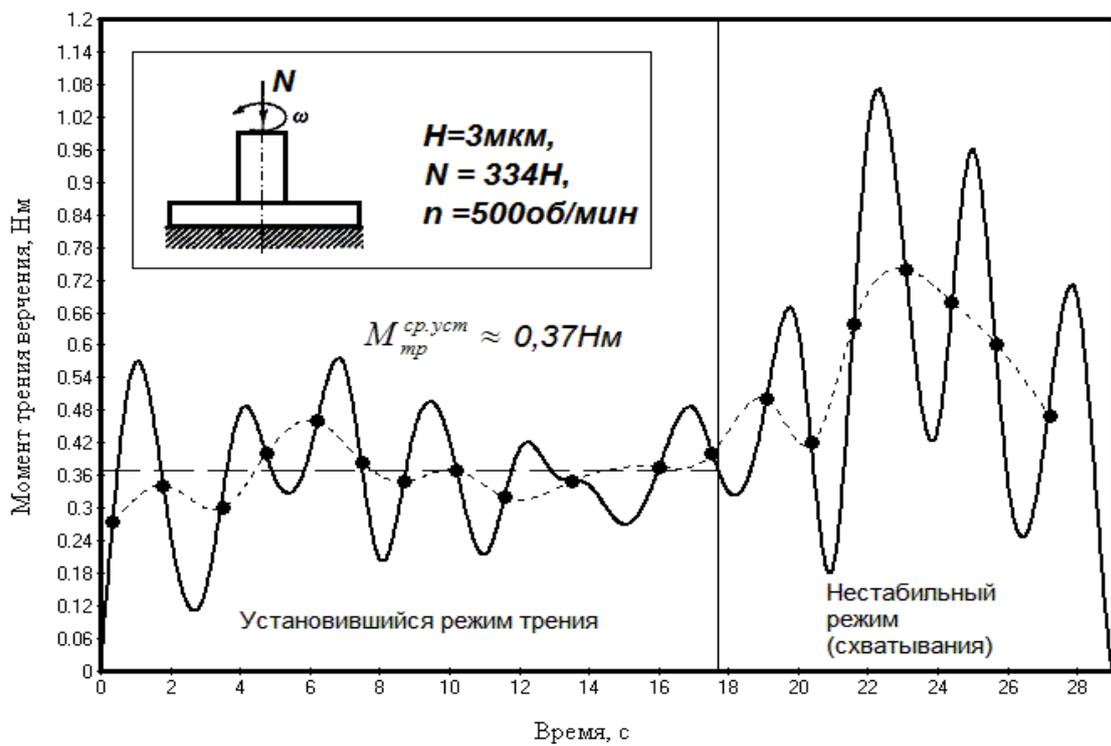


Рис.3. Оциллограмма момента трения вращения при трении по покрытию (Al,Ti)N толщиной 3 мкм

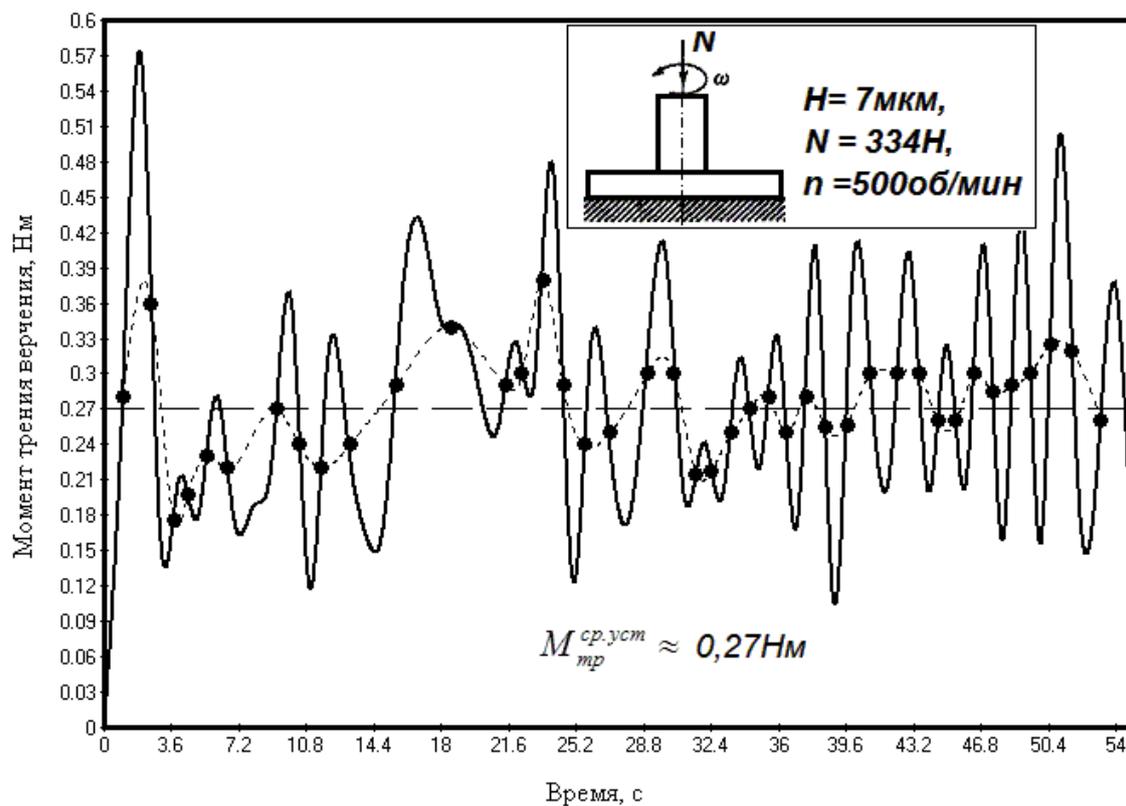


Рис. 4. Осциллограмма момента трения верчения при трении по покрытию (Al,Ti)N толщиной 7 мкм

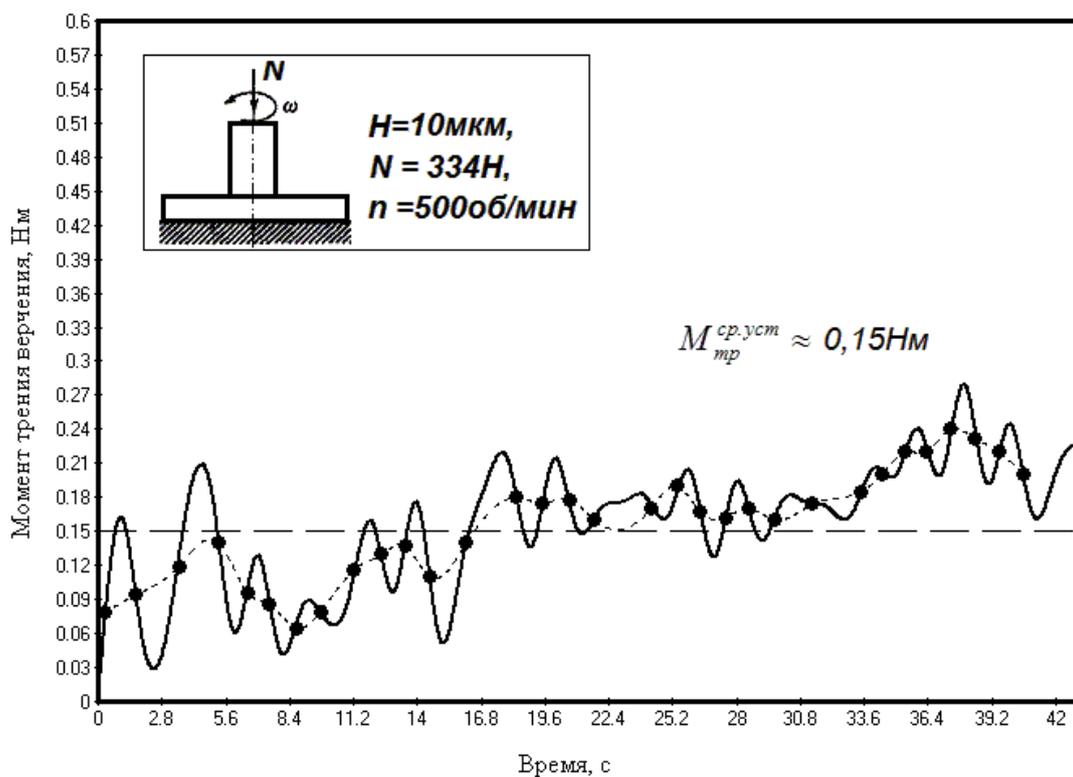


Рис. 5. Осциллограмма момента трения верчения при трении по покрытию (Al,Ti)N толщиной 10 мкм

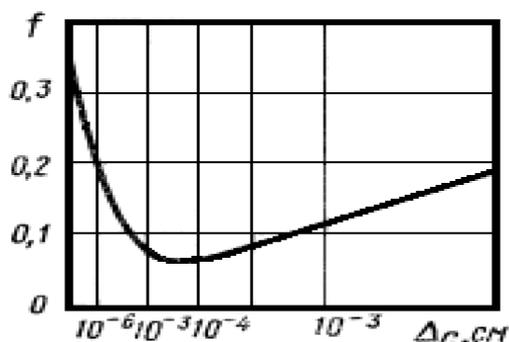


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения от толщины металлических плёнок по Бодену (схема) [3]

На рис.6 приведена такая зависимость, полученная при скольжении сферического индентора радиусом 0,3 мм при нагрузке 4 кгс по поверхности образца из инструментальной стали, покрытие – индий. Толщина плёнки изменялась в пределах 0,01 – 10 мкм. С учетом эффекта возрастания сдвигового сопротивления для тонких плёнок, переход через минимум был объяснен в данной работе на основе молекулярно-механической теории трения.

Полученные результаты для чистых покрытий из (Al,Ti)N согласуются со схемой Бодена и Тора. По-видимому, для достижения минимального момента трения и последующего его возрастания требуется дополнительное приращение толщины покрытия.

Далее были проведены испытания тех же пар трения, но между покрытиями и роликом из стали ШХ15 добавлялся порошок наноразмерного диселенида вольфрама.

Результаты трения ролика из стали ШХ15 по поверхности покрытия из (Al,Ti)N толщиной 3 мкм, при внесении на фрикционный контакт диселенида вольфрама, приведены на рис.7.

Из осциллограммы видно, что вначале наблюдается нестабильный режим трения, связанный с втиранием диселенида вольфрама. Далее наблюдается установившийся момент трения  $\approx 0,057$  Нм, что связано с образованием двуслойного покрытия (Al,Ti)N с нанесённым на него WSe<sub>2</sub> (как на подложку).

Результаты трения ролика из стали ШХ15 по поверхности покрытия из (Al,Ti)N толщиной 7 мкм, при внесении на фрикционный контакт диселенида вольфрама, приведены на рис.8.

Из полученной осциллограммы, также, как и в предыдущем случае, видно, что вначале наблюдается нестабильный режим трения, связанный с втиранием диселенида вольфрама. Далее наблюдается установившийся момент трения  $\approx 0,0149$  Нм, что связано с образованием двуслойного покрытия (Al,Ti)N с нанесённым на него WSe<sub>2</sub> (как на подложку).

Результаты трения ролика из стали ШХ15 по поверхности покрытия из (Al,Ti)N толщиной 10 мкм, при внесении на фрикционный контакт диселенида вольфрама, приведены на рис.9.

В случае с покрытием толщиной 10 мкм, диселенид вольфрама быстрее втёрся в покрытие и образовал антифрикционную поверхность. При этом наблюдался момент трения, приблизительно равный  $\approx 0,025$  Нм.

После постепенного износа диселенидного покрытия при высокой нагрузке момент трения начал увеличиваться, после чего начался процесс локальных разрывов плёнки WSe<sub>2</sub>.

На основании полученных данных установлена зависимость момента трения верчения от толщины покрытия при трении с WSe<sub>2</sub> (рис.10).

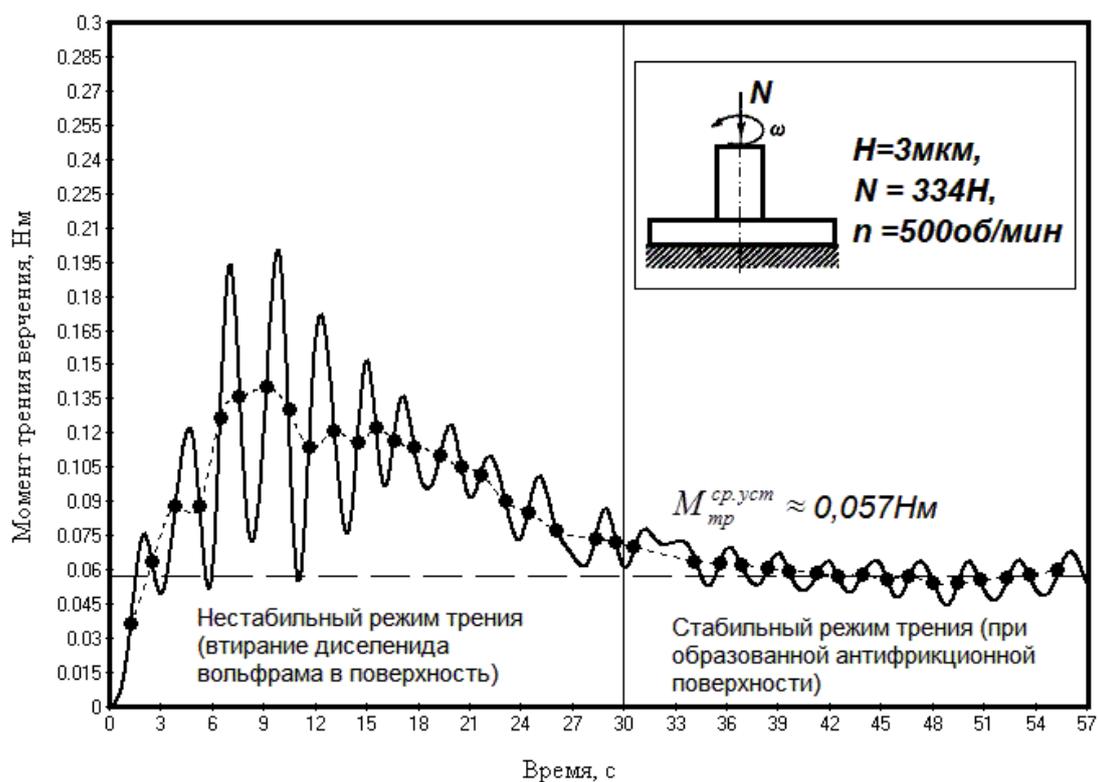


Рис. 7. Оциллограмма момента трения верчения при трении по покрытию (Al,Ti)N толщиной 3 мкм с  $WSe_2$  в зоне трения

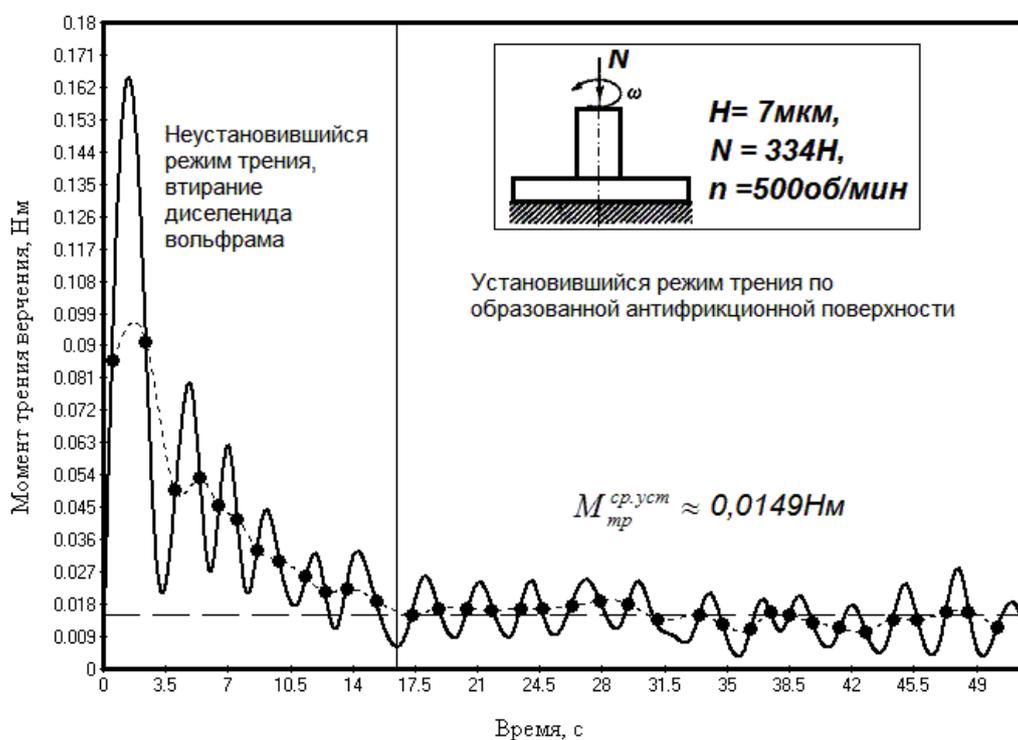


Рис. 8. Оциллограмма момента трения верчения при трении по покрытию (Al,Ti)N толщиной 7 мкм с  $WSe_2$  в зоне трения

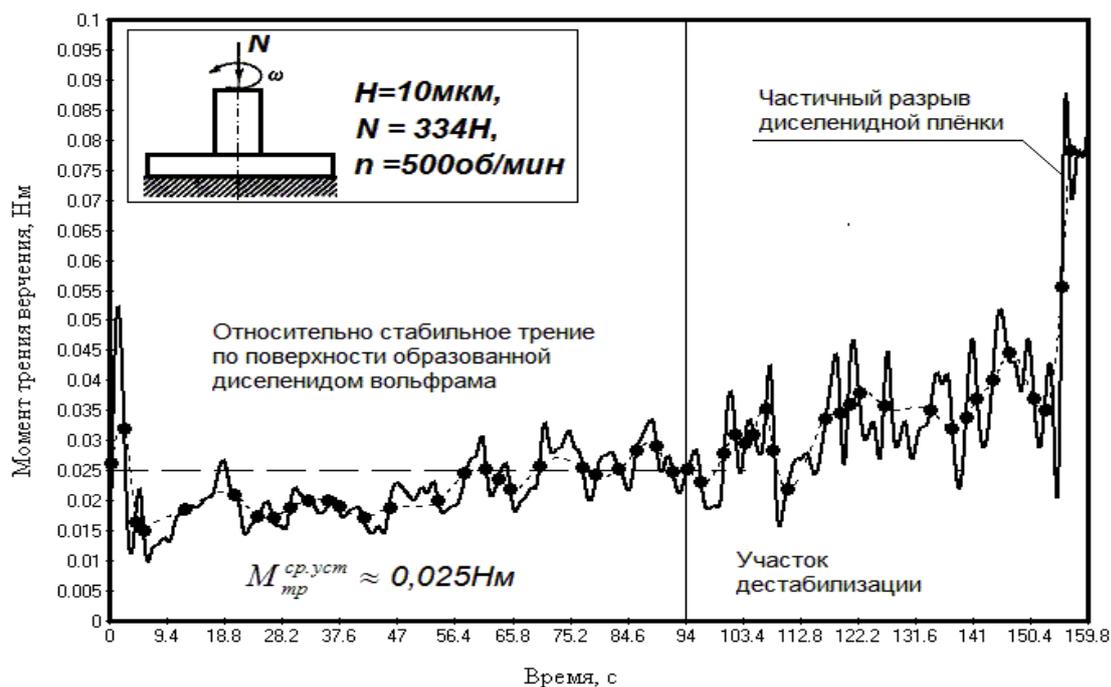


Рис. 9. Осциллограмма момента трения верчения при трении по покрытию (Al, Ti)N толщиной 10 мкм с WSe2 в зоне трения

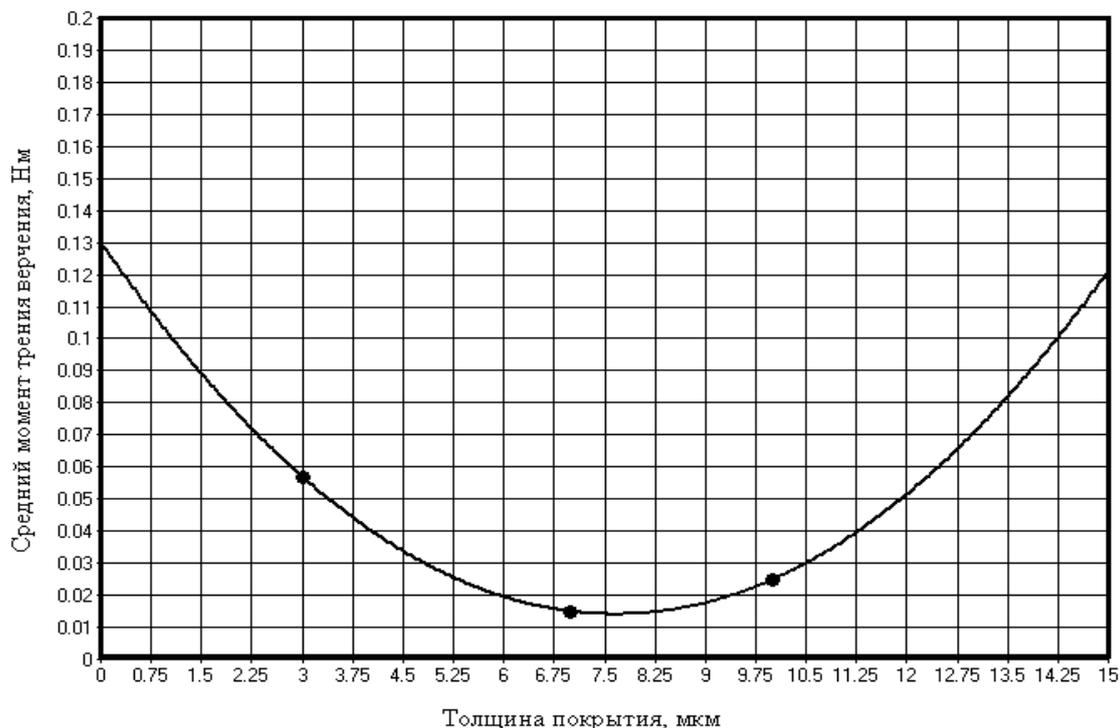


Рис. 10. Зависимость среднего момента трения верчения от толщины покрытия при использовании нанодисперсного WSe2

Полученная зависимость хорошо согласуется с зависимостью коэффициента трения от толщины металлических плёнок по Бодену и Тейбору (см. рис.6), это

может быть связано с общим увеличением толщины покрытия на CoCrMo, за счёт образования антифрикционной плёнки. В случае с трением по покрытиям без

диселенида вольфрама экстремума обнаружено не было (значения моментов на рис.2 – 5). Можно предположить, что с дальнейшим увеличением толщины покрытия (Al,Ti)N трение, согласно Боудену и Тейбору, будет увеличиваться.

### Выводы

На основании проведённого исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. Покрытия (Al,Ti)N толщиной 3,7 и 10 мкм на CoCrMo способствуют снижению момента трения вращения на 18, 40 и 67% (в три раза) соответственно, относительно подложки.

2. При использовании на фрикционном контакте порошка из наночастиц диселенида вольфрама 60x5 нм момент трения вращения относительно покрытия (Al,Ti)N толщиной 3 мкм снижается в 6,5 раз.

3. При использовании на фрикционном контакте порошка из наночастиц диселенида вольфрама 60x5 нм момент трения вращения относительно покрытия (Al,Ti)N толщиной 7 мкм снижается в 18 раз.

4. При использовании на фрикционном контакте порошка из наночастиц диселенида вольфрама 60x5 нм момент трения вращения относительно покрытия (Al,Ti)N толщиной 10 мкм снижается в 6 раз.

5. Зависимость момента трения вращения от толщины покрытия при использовании диселенида вольфрама хорошо согласуется с зависимостью коэффициента трения от толщины металлических плёнок по Боудену и Тейбору.

Результаты полученных исследований могут быть использованы при разработке ресурсосберегающих технологий обработки материалов [17-22].

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда по приоритетному направлению деятельности Российского научного фонда «Прове-*

*дение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований по приоритетным тематическим направлениям исследований» научному проекту: "Формирование беспористых покрытий из нанокпозиционных материалов типа «износостойкая матрица - наночастицы дисульфида молибдена (вольфрама)», обладающих низким коэффициентом трения, методом химического осаждения из газовой фазы", № 15-13-00045.*

### Список литературы

1. Брейтуэйт Е.Р. Твёрдые смазочные материалы и антифрикционные покрытия: [пер. с англ.]. – М.: Химия, 1967.– 320 с.

2. Кламанн Д. Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты / пер. с англ. под ред. Ю.С. Заславского. – М.: Химия, 1988. – 488 с.

3. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчётов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526с.

4. Основы технологической подготовки: учеб. пособие / А.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, А.Д. Бреки [и др.]; под ред. проф. А.Е. Гвоздева. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Тула: Издательство ТулГУ, 2015. – 187с.

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

6. Триботехнические характеристики жидких смазочных и полиимидных композиционных материалов, содержащих антифрикционные наночастицы диалкогенидов вольфрама: монография / под ред. А.Д. Бреки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. – 276 с.

7. Комплексный подход к исследованию экстремальных эффектов в металлических, композиционных и нанокристал-

лических материалах: монография / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, В.И. Золотухин, А.Д. Бреки [и др.]; под ред. д-ра техн. наук, проф. А.Е. Гвоздева. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – 128 с.

8. Жидкие смазочные композиционные материалы, содержащие высокодисперсные наполнители, для подшипниковых узлов управляемых систем: монография / Е.С. Васильева, О.В. Толочко, Н.Н. Сергеев [и др.]. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – 144 с.

9. Бреки А.Д. Триботехнические свойства модифицированных смазочных масел: дис. ... канд. техн. наук / Институт проблем машиноведения Российской академии наук. – СПб., 2011. – 161 с.

10. Триботехнические свойства композиционных покрытий с полиимидными матрицами и наполнителями из наночастиц дихалькогенидов вольфрама для узлов трения машин: монография / В.В. Кудрявцев, А.Л. Диденко, Е.С. Васильева [и др.]; под ред. А.Д. Бреки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. – 128с.

11. Синтез и триботехнические свойства композиционных покрытий с матрицей из полиимида ПМ-ДАДФЭ и наполнителями из наночастиц дихалькогенидов вольфрама при сухом трении скольжения / А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, Е.С. Васильева [и др.] // *Материаловедение*. – 2015. – № 12. – С. 36-40.

12. Определение основных трибологических характеристик жидких смазочных композиций, содержащих мелкодисперсные частицы дихалькогенидов вольфрама / О.В. Толочко, А.Д. Бреки, Е.С. Васильева, М.Ю. Максимов // *Вопросы материаловедения*. – 2011. – №1(65). – С.143 – 149.

13. 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 // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2015. – № 5-2. – С. 136-144.

14. Влияние смазочного композиционного материала с наночастицами диселенида вольфрама на трение в подшипниках качения / В.В. Медведева, Ю.А. Фадин, О.В. Толочко [и др.] // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2015. – № 11-1. – С. 171-180.

15. Взаимодействие дисперсных компонентов смазочного композиционного материала, содержащего наночастицы дихалькогенидов вольфрама / О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев [и др.] // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2015. – № 7-1. – С. 197-205.

16. Выбор дисперсности наполнителя из частиц дихалькогенидов вольфрама для создания смазочного композиционного материала / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев [и др.] // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2015. – № 7-1. – С. 235-243.

17. 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 [и др.] // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2015. – № 11-1. – С. 78-86.

18. 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. – № 7-2. – С. 8-14.

19. Макаров Э.С., Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М. Теория пластичности дилатирующих сред: монография / под ред. А.Е. Гвоздева. – 2-е издание, перер. и доп. – Тула, 2015. – 337 с.

20. Разработка прогрессивных технологий получения и обработки металлов, сплавов, порошковых и композиционных наноматериалов: монография / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, А. Д. Бреки, Н.Н. Сергеев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, Д.В. Малий. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. – 235 с.

21. Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е. Обработка сталей и сплавов в интервале температур фазовых превращений: монография. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. – 320 с.

22. Противоизносные свойства консистентного смазочного композиционного материала, содержащего смесь гидросиликатов магния / В. В. Медведева, А. Д. Бреки, Н. А. Крылов, С. Е. Александров, А. Е. Гвоздев, Н. Е. Стариков, Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, Д. В. Малий // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2016. – №. 2 (19). – С. 30–40.

*Получено 18.08.16*

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

**A.A. Lisenkov**, Doctor of Technical Sciences, Laureate of the State Prize of Russia in Science and Technology, IPMASH RAS (St. Petersburg) (e-mail: lisran@yandex.ru)

**M.A. Danilov**, Postgraduate Student, St. Petersburg Polytechnic University Peter the Great (e-mail: marina.rakovskay@yandex.ru)

**O.V. Tolochko**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, St. Petersburg Polytechnic University Peter the Great (e-mail: albreki@yandex.ru)

**Yu. A. Fadin**, Doctor of Engineering Sciences, IPMASH RAS (St. Petersburg) (e-mail: fadinspb@yandex.ru)

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

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

**A.N. Sergeev**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula) (e-mail: ansergueev@mail.ru)

**E.V. Ageeva**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk) (e-mail: ageeva-ev@yandex.ru)

**F.O. Kiriyyenko**, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, IPMASH RAS (St. Petersburg) (e-mail: olfkir@gmail.com)

**D.V. Maliy**, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula) (e-mail: maliydmiriy@yandex.ru)

**V.V. Dankivtsi**, Postgraduate Student, St. Petersburg Polytechnic University Peter the Great (e-mail: albreki@yandex.ru)

#### **THE STUDY OF SPINNING FRICTION OF STEEL SKH-15 ON THE SURFACE OF (AL, TI)N POROUS COATING ON THE COCRMOSUBSTRATE WHEN USING NANOPARTICLE TUNGSTEN DISELENIDESOLID LUBRICANT**

*The samples of CoCrMo coated with (Al, Ti)N were taken for the study. The thickness of the applied porous coatings was 3, 7 and 10 microns, respectively. A cylindrical sample (roller) with a diameter of 10mm made of ball bearing steel SKh-15 was used as a rotating counterface. Nanoscale powdered plate-like tungsten diselenide with particles sizes of 60x5nm was selected as solid lubricant.*

During the tests, a rotating steel sample was pressed by its flat side to the surface of the fixed in the clamp sample. During the experiment, the clamp fixed on the bearing assembly by means of the cable and the strain gauge was gripped to prevent rotation imparted by the moving roller. Obtained data of friction torque and actual load were transmitted to the computer by means of the strain gauge. During all the experiments, the load on the friction pair was 334 N and shaft speed, in which steel roller was clamped, was 500 r/min.

Based on the conducted study, it was found that the (Al, Ti)N coatings, whose thickness is 3.7 microns and 10 microns, on the CoCrMo substrate help reduce spinning friction torque on the substrate by 18, 40 and 67% (three times), respectively. When using the powder from tungsten diselenide nanoparticles of 60x5 nm in size on the frictional contact, the spinning friction torque on the (Al, Ti)N coating with thickness of 3 microns reduces by 6.5 times. When using the powder from tungsten diselenide nanoparticles of 60x5 nm in size on the frictional contact, the spinning friction torque on the (Al, Ti)N coating with thickness of 7 microns reduces by 18 times. When using the powder from tungsten diselenide nanoparticles of 60x5 nm in size on the frictional contact, the spinning friction torque on the (Al, Ti)N coating with thickness of 10 microns reduces by 6 times. The dependence of spinning friction torque on the coating thickness when using tungsten diselenide is in good agreement with the dependence of the friction factor on the thickness of metal films according to Bowden and Tabor.

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

\*\*\*

## Reference

1. Brejtujajt E.R. Tvjordye smazochnye materialy i antifrikcionnye pokrytija: [per. s angl.]. – M.: Himija, 1967. – 320 s.

2. Klamann D. Smazki i rodstvennye produkty. Sintez. Svojtva. Primenenie. Mezhdunarodnye standarty / per. s angl. pod red. Ju.S. Zaslavskogo. – M.: Himija, 1988. – 488 s.

3. Kragel'skij I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Osnovy raschjotov na trenie i iznos. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 526 s.

4. Osnovy tehnologicheskoy podgotovki: ucheb. posobie / A.N. Sergeev, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, A.D. Breki [i dr.]; pod red. prof. A.E. Gvozdeva. – Izd. 2-e, ispr. i dop. – Tula: Izdatel'stvo TulGU, 2015. – 187 s.

5. 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 s.

6. Tribotekhnicheskie karakteristiki zhidkih smazochnyh i poliimidnyh kompozicionnyh materialov, sodержashhih antifrikcionnye nanochasticy dihal'kogenidov vol'frama: monografija / pod red. A.D. Breki. – Tula: Izd-vo TulGU, 2015. – 276 s.

7. Kompleksnyj podhod k issledovaniju jekstremal'nyh jeffektov v metallicheskih, kompozicionnyh i nanokristallicheskih materialah: monografija / N.N. Sergeev, A.N. Sergeev, D.A. Provotorov, V.I. Zolotuhin, A.D. Breki [i dr.]; pod red. d-ra tehn. nauk, prof. A.E. Gvozdeva. – Tula: Izd-vo TulGU, 2014. – 128 s.

8. Zhidkie smazochnye kompozicionnye materialy, sodержashhie vysokodispersnye napolniteli, dlja podshipnikovyh uzlov upravljaemyh sistem: monografija / E.S. Vasil'eva, O.V. Tolochko, N.N. Sergeev [i dr.]. – Tula: Izd-vo TulGU, 2014. – 144 s.

9. Breki A.D. Tribotekhnicheskie svojtva modifirovannyh smazochnyh masel: dis. ... kand. tehn. nauk / Institut problem mashinovedenija Rossijskoj akademii nauk. – SPb., 2011. – 161 s.

10. Tribotekhnicheskie svojtva kompozicionnyh pokrytij s poliimidnymi matricami i napolniteljami iz nanochastic dihal'kogenidov vol'frama dlja uzlov trenija mashin: monografija / V.V. Kudrjavcev, A.L. Didenko, E.S. Vasil'eva [i dr.]; pod red. A.D. Breki. Tula: Izd-vo TulGU, 2015. – 128 s.

11. Sintez i tribotekhnicheskie svojtva kompozicionnyh pokrytij s matricej iz poliimida PM-DADFJe i napolniteljami iz nanochastic dihal'kogenidov vol'frama pri suhom trenii skol'zhenija / A.L. Didenko, V.V.

Kudrjavcev, E.S. Vasil'eva [i dr.] // Materialovedenie. – 2015. – № 12. – S. 36-40.

12. Opredelenie osnovnyh tribologicheskikh karakteristik zhidkih smazochnyh kompozicij, sodержashhih melkodispersnye chasticy dihal'kogenidov vol'frama / O.V. Tolochko, A.D. Breki, E.S. Vasil'eva, M.Ju. Maksimov // Voprosy materialovedenija. – 2011. – №1(65). – S.143 – 149.

13. 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. Tehnicheskie nauki. – 2015. – № 5-2. – S. 136-144.

14. Vlijanie smazochnogo kompozicionnogo materiala s nanochasticami diselenida vol'frama na trenie v podshipnikah kachenija / V.V. Medvedeva, Ju.A. Fadin, O.V. Tolochko [i dr.] // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – 2015. – № 11-1. – S. 171-180.

15. Vzaimodejstvie dispersnyh komponentov smazochnogo kompozicionnogo materiala, sodержashhego nanochasticy dihal'kogenidov vol'frama / O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.E. Gvozdev [i dr.] // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – 2015. – № 7-1. – S. 197-205.

16. Vybor dispersnosti napolnitelja iz chastic dihal'kogenidov vol'frama dlja sozdanija smazochnogo kompozicionnogo materiala / A.D. Breki, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.E. Gvozdev [i dr.] // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – 2015. – № 7-1. – S. 235-243.

17. Vlijanie smazochnogo kompozicionnogo materiala s nanochasticami disul-

'fida vol'frama na trenie v podshipnikah kachenija / A.D. Breki, V.V. Medvedeva, Ju.A. Fadin, O.V. Tolochko [i dr.] // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – 2015. – № 11-1. – S. 78-86.

18. Ocenka vzaimodejstvija mezhdunarochasticami dihal'kogenidov vol'frama v srede zhidkogo smazochnogo materiala / A.D. Breki, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, D.A. Provotorov // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – 2015. – № 7-2. – S. 8-14.

19. Makarov Je.S., Gvozdev A.E., Zhuravlev G.M. Teorija plastichnosti dilatirujushhih sred: monografija / pod red. A.E. Gvozdeva. – 2-e izdanie, perer. i dop. – Tula, 2015. – 337 s.

20. Razrabotka progressivnyh tehnologij poluchenija i obrabotki metallov, splavov, poroshkovykh i kompozicionnyh nanomaterialov: monografija / M.H. Shorshorov, A.E. Gvozdev, V.I. Zolotuhin, A.N. Sergeev, A.A. Kalinin, A. D. Breki, N.N. Sergeev, O.V. Kuzovleva, N.E. Starikov, D.V. Malij. – Tula: Izd-vo TulGU, 2016. – 235 s.

21. Zhuravlev G.M., Gvozdev A.E. Obrabotka stalej i splavov v intervale temperatur fazovykh prevrashhenij: monografija. – Tula: Izd-vo TulGU, 2016. – 320 s.

22. Protivoiznosnye svojstva konsistentnogo smazochnogo kompozicionnogo materiala, sodержashhego smes' gidrosilikatov magnija / V.V. Medvedeva, A. D. Breki, N. A. Krylov, S. E. Aleksandrov, A. E. Gvozdev, N. E. Starikov, N. N. Sergeev, A. N. Sergeev, D. V. Malij // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii. – 2016. – №. 2 (19). – S. 30–40.