

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 620.178.162.42; 620.178.15

<https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-3-280-288>

Механические свойства сервовитных пленок, формирующихся при трении в водных растворах карбоновых кислот*

В. Э. Бурлакова¹, Е. Г. Дроган², А. И. Тюрин³, Т. С. Пирожкова^{4**}

^{1,2} Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

^{3,4} НИИ «Нанотехнологии и наноматериалы» Тамбовского государственного университета им. Г. Р. Державина, Тамбов, Российская Федерация

Mechanical properties of servovite films formed in during friction aqueous solutions of carboxylic acids***

V. E. Burlakova¹, E. G. Droган², A. I. Tyurin³, T. S. Pirozhkova^{4**}

^{1,2} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

^{3,4} Research Institute of Nanotechnologies and Nanomaterials, G.R. Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russian Federation

Введение. В работе показано, каким образом природа органической компоненты в систематическом ряду одноосновных карбоновых кислот влияет на трибологические характеристики пары трения «латунь — сталь» в водных растворах. Изучена зависимость физико-механических свойств антифрикционных пленок, формирующихся при трении, от природы смазочной композиции. Цели работы: изучить возможности использования карбоновых кислот как антифрикционных компонентов смазочного материала; оценить их влияние на механические свойства сервовитной пленки, формирующейся при трении латуни по стали.

Материалы и методы. Проведены трибологические исследования пары трения «латунь — сталь» на машине трения торцевого типа АЕ-5. Параметры шероховатости сервовитной пленки определялись с помощью оптической профилометрии. Микрогеометрия и структура объекта на наномасштабе исследовались с помощью атомно-силовой микроскопии. Механические характеристики антифрикционной пленки изучали с помощью инструментального наномеханического тестирования.

Результаты исследования. Изучены трибологические характеристики трибосоприжения «латунь — сталь» и физико-механические характеристики сервовитной пленки, формирующейся при трении в системе «латунь — водный раствор карбоновой кислоты — сталь». Установлено, что при увеличении длины углеводородного радикала коэффициент трения снижается. Обнаружены размерные эффекты в механических и трибологических свойствах сервовитной пленки, формирующейся на поверхности фрикционного взаимодействия в водных растворах карбоновых кислот.

Обсуждение и заключения. Результаты исследования показывают, что при фрикционном взаимодействии на поверх-

Introduction. The effect of the organic component nature in the systematic series of monocarboxylic acids on the tribological characteristics of the brass-steel friction pair in aqueous solutions is described. Dependence of the mechanical-and-physical properties of the antifriction films formed during friction on the nature of the lubricating composition is investigated. The work objectives are to study the applicability of carboxylic acids as an antifriction lubricant component; to assess their effect on the mechanical properties of the servovite film formed under the brass – steel friction.

Materials and Methods. Tribological studies of the brass-steel friction pair on the AE-5 end-type friction machine are carried out. Roughness parameters of the servovite film were determined through the optical profilometry. The microgeometry and the object structure at the nanoscale were considered using atomic force microscopy. The mechanical characteristics of the antifriction film were investigated using the instrument nanoindentation.

Research Results. Tribological characteristics of the brass-steel tribocoupling and mechanical-and-physical properties of the servovite film formed during friction in the “brass – aqueous solution of carboxylic acid – steel” system were studied. It is established that the friction factor reduces when increasing the hydrocarbon radical length. The dimensional effects are found in the mechanical and tribological properties of the servovite film formed on the surface of the friction interaction in the carboxylic acids.

Discussion and Conclusions. The study results show that the friction interaction on the wearing surface in the aqueous solu-



* Работа выполнена по гранту РФФИ (проект № 17-48-680817) «Исследование физико-механических и трибологических свойств в нано- и микрошкале» на оборудовании ЦКП ТГУ им. Г. Р. Державина.

** E-mail: vburlakova@donstu.ru, ekaterina.drogan@gmail.com, tyurin@tsu.tmb.ru, t-s-pir@ya.ru

*** The research is done on RFFI grant (project no. 17-48-680817) “Investigation of mechanical, physical and tribological properties in nano- and micro-scale “on the equipment of the Shared Knowledge Center of G. R. Derzhavin TSU.

ности трения в водных растворах карбоновых кислот формируется наноструктурная сервовитная пленка, резко снижающая коэффициент трения. Ее физико-механические и трибологические параметры зависят от состава модельной смазочной среды. Определено, что локальные физико-механические свойства зависят от способа получения сервовитного слоя, нагрузки и размера зоны деформирования. Полученные результаты могут быть использованы при разработке смазочных материалов.

Ключевые слова: коэффициент трения, избирательный перенос, сервовитная пленка, размерные эффекты, шероховатость поверхности.

Образец для цитирования: Механические свойства серво-витных пленок, формирующихся при трении в водных рас-творках карбоновых кислот / В. Э. Бурлакова [и др.] // Вест-ник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, № 3. — С. 280–288. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-3-280-288>

Введение. Стремительное развитие современного машиностроения расширяет возможности конструи-рования машин, работающих в экстремальных условиях. Таким образом, возрастает актуальность вопросов по-вышения ресурса узлов трения при растущих требованиях к механическим свойствам материалов.

Условия трения с повышенной плотностью энергии предъявляют к машинам и оборудованию ряд спе-цифических требований в плане трибологических характеристик, надежности и срока службы. Критические условия работы трибосопряженных поверхностей влияют на передачу силы, потерю энергии и в конечном сче-те — на динамическое поведение всего механизма. Пространственные распределения неровностей топографии, как правило, негативно воздействуют на эксплуатационные возможности машин и механизмов. Иными слова-ми, несущая способность узлов трения напрямую зависит от основных параметров состояния поверхности. Они влияют на условия взаимодействия в области контакта, адгезию и деформацию, тем самым генерируют vibra-ции в процессе трения [1] и обуславливают неравномерный износ.

Наибольшую антифрикционную эффективность в данном случае демонстрируют смазочные материалы [2–6], содержащие такие металлические присадки, как медь, алюминий, серебро. Данные материалы в процессе трения формируют на трибосопряженных поверхностях защитные металлоплакирующие пленки. Таким образом обеспечивается низкий коэффициент трения и умеренно низкий износ в широком диапазоне контактных давлений и скоростей скольжения [2, 3]. Металлоплакирование поверхностных слоев в процессе эксплуатации позволяет «залечивать» дефекты поверхности (трещины, поры, накопленные усталостные повре-ждения). Это значительно повышает антифрикционные характеристики и улучшает физико-механические свой-ства, что особо важно для надежной работы узлов трения и увеличения срока эксплуатации оборудования.

Стоит отметить, что формирование пленок переноса возможно при трении в водно-спиртовых средах без заметного суммарного износа контактирующих поверхностей [7, 8]. Применение избирательного переноса в машиностроительной практике открывает реальную возможность для проектирования долговечных и эконо-мичных узлов трения в подвижных сопряжениях деталей и узлов машин и механизмов [8].

В связи с этим интересно рассмотреть влияние состава смазочной среды на физико-механические и трибологические параметры сервовитной пленки, формирующейся в трибосопряжении «латунь-сталь» (в каче-стве смазочной среды используются водные растворы карбоновых кислот).

Материалы и методы. Эволюцию коэффициента трения системы «латунь 59 — водный раствор кар-боновой кислоты — сталь 40Х» исследовали в лаборатории «Гибридные функциональные материалы на основе графена» научно-образовательного центра (НОЦ) «Материалы» на торцевой машине трения типа АЕ-5. Опыты проводились при следующих условиях: скорость вращения — 180 об/мин; осевая нагрузка — 98 Н; время ис-пытания — 10 часов. В качестве органической компоненты смазочной композиции использовали однооснов-ные карбоновые кислоты предельного ряда с общей формулой $R - COOH$ ($R = C_nH_{2n+1}$).

tions of carboxylic acids forms a nanostructured servovite film which drops the friction factor. Its mechanical, physical and tribological parameters depend on the composition of the model lubricating medium. It is determined that the local mechanical-and-physical properties depend on the method of producing the servovite layer, the load and the size of the deformation zone. The results obtained can be used in the development of lubri-cants.

Keywords: friction factor, selective transfer, servovite film, dimensional effects, surface roughness.

For citation: V.E. Burlakova, E.G. Droган, A.I. Tyurin, T.S. Pirozhkova. Mechanical properties of servovite films formed during friction in aqueous solutions of carboxylic acids. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no.3, pp. 280–288. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-3-280-288>

Механические характеристики (твердость — H и модуль Юнга — E) сервовитных пленок определялись методом инструментального индентирования [9, 10]. При этом использовались:

- наноиндентометр *Nanotest Platform 3* (*Micromaterials, UK*) с подключенным функциональным блоком, позволяющим осуществлять нагрузки от 0,01 мН до 500 мН;
- нанотрибоиндентометр *TI-950 Triboindenter* — многофункциональный комплекс для механических испытаний материалов посредством динамического наноиндентирования.

Методика наноиндентирования позволяет исследовать комплекс физико-механических свойств тонких приповерхностных слоев твердых тел и пленок толщиной до нескольких десятков нм [9–15]. Механические характеристики изучались с использованием алмазного индентора Берковича. Учитывая характерную толщину исследуемых пленок (от нескольких сотен нанометров до единиц микрометров), эксплуатационные физико-механические параметры измеряли на наноуровне при глубинах отпечатков индентора от 20 нм до единиц микрон.

На наноуровне коэффициент трения исследовался на *Triboindenter TI-950* при одновременном приложении к индентору нормальной и латеральной нагрузок [11, 16, 17]. Непрерывно регистрировались нормальная и латеральная составляющие сил (F_N и F_L) и смещений (h_N и h_L), реализуемых при воспроизведении трибоконтактов индентором. Регистрируемые данные анализировались, что позволяло судить о процессах трения и износа. Мерой оценки служил коэффициент трения k_{mp} .

Для определения толщины сервовитной пленки и параметров шероховатости использовали оптический профилометр *Contour GT-K1* с аналитическим программным обеспечением *Vision 64*, установленный в ресурсном центре коллективного пользования НОЦ "Материалы" (<http://nano.donstu.ru/>). Измерения проводились методом вертикальной сканирующей интерферометрии (*VSI*) со скоростью сканирования 0,1 мкм/сек при повторяемости *RMS* 0,01 нм.

Топография поверхности сервовитной пленки изучалась с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) *PHYWE Compact* в полуконтактном режиме монокристаллическим кремниевым зондом с алюминиевым покрытием.

Результаты исследования. Довольно хорошо изучена [8, 18] сервовитная пленка, самопроизвольно возникающая в ходе фрикционного взаимодействия в растворе глицерина в сплаве «медь—сталь». Известно, что она формируется на поверхности трения в топографически неравноценных условиях. Поэтому в разных местах фрикционного контакта состав и свойства сервовитной пленки различны. Ее толщина не превышает 2 мкм, а механические, физико-химические и трибологические свойства отличаются от свойств обычной компактной меди.

Следует отметить, что одним из продуктов трибоокисления глицерина [19] является карбоновая кислота. В этой связи интересно рассмотреть влияние состава смазочной среды на физико-механические и трибологические свойства трибосопряжения «латунь—сталь» при трении в систематическом ряду одноосновных карбоновых кислот.

Длительные эволюционные трибологические исследования пары трения «латунь — сталь» в водных растворах карбоновых кислот выявили следующую зависимость трибологических характеристик от состава смазочной среды: длина углеводородной цепи радикала кислоты увеличивается от C_0 до C_5 — коэффициент трения снижается до 0,007.

Причем наименьшее значение коэффициента трения, характерное для систем, реализующих эффект безызносности [20, 21], достигается в водных растворах валериановой и капроновой кислот. Одновременно с этим износ трибопары «латунь — сталь» снижается до 25 раз. В результате избирательного переноса при трении на трибосопряженных поверхностях формируется медная пленка с различной шероховатостью и плотностью покрытия поверхности.

Поверхность трения сканировалась в условиях перехода в ряду кислот «муравьиная — уксусная — пропионовая — масляная — валериановая — капроновая». При этом оптическая профилометрия выявила, во-первых, снижение шероховатости сервовитной пленки. Во-вторых, была установлена зависимость шероховатости от начальной топографии поверхности испытуемого стального диска (его R_a равно 118 нм) и состава смазочной композиции [22, 23] (рис. 1).

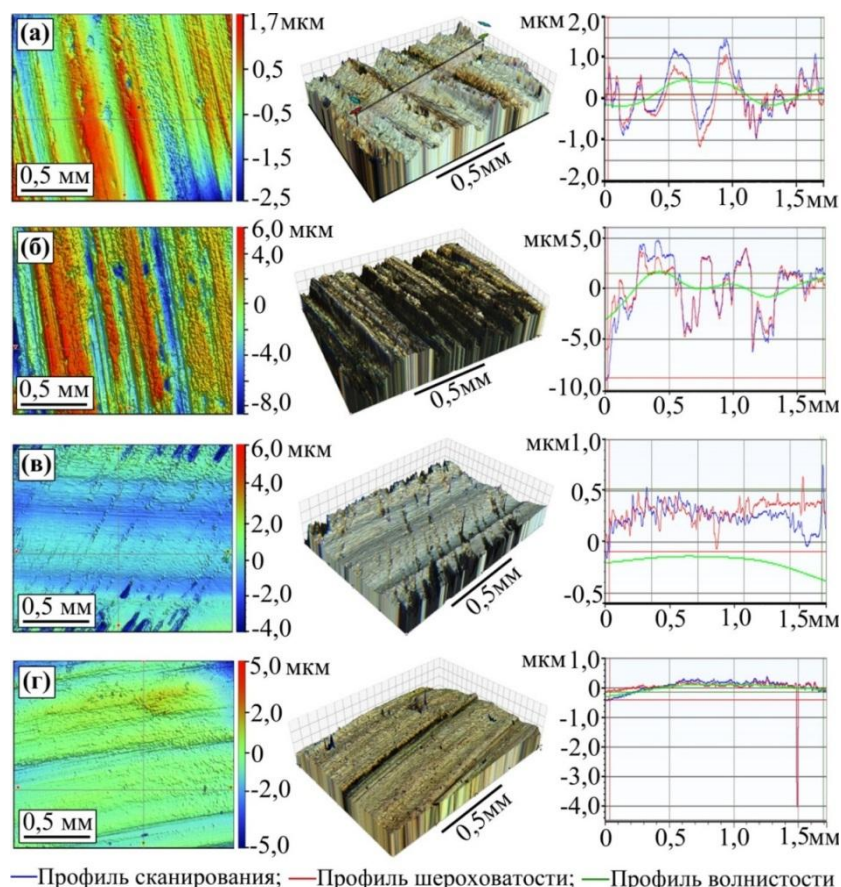


Рис. 1. 2D-визуализация, 3D-визуализация и профиль поверхности из стали (а), (е) и латуни-59 (б), (з) после трения в водных растворах уксусной (а), (б) и капроновой (е), (з) кислот

Шероховатость R_a на базовой длине ($L = 800$ мкм) сервоитной пленки снижается при формировании, например, в водном растворе капроновой кислоты, до 69 нм. (Для сравнения: в водном растворе муравьиной кислоты данный показатель достигает 580 нм, уксусной — 401 нм.) Разница объясняется коррозионной активностью среды.

В растворах муравьиной и уксусной кислот на трибосопряженных поверхностях обнаруживается множество царапин, неровностей и пор, а также участки с медной пленкой, образовавшейся по островковому механизму. При поперечном сечении поверхности трения выявляются глубокие продольные канавки, что свидетельствует об абразивном характере износа трибосопряжения [23, 24].

Более детальное сканирование поверхности с использованием метода АСМ и визуализация изображения обнаруживает значительные повреждения при трении в растворах муравьиной и уксусной кислот. На 3D-изображении они визуализируются в виде макроскопических темных полос, соответствующих областям интенсивного фрикционного напряжения, сопровождающегося сильным абразивным износом трибопары (рис. 2).

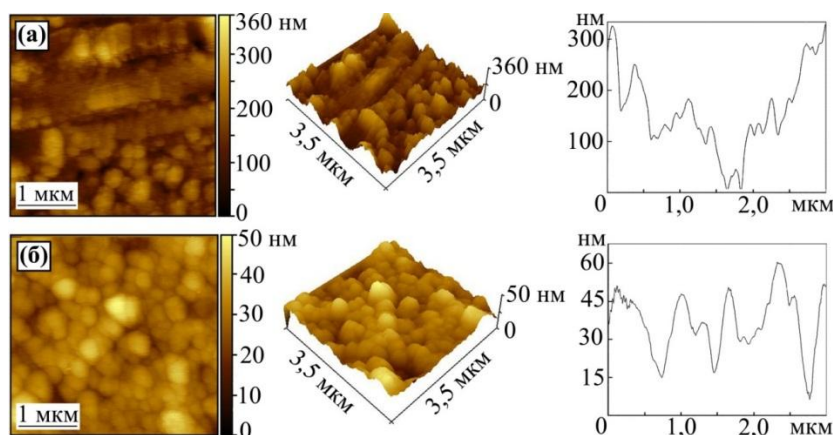


Рис. 2. Топография поверхности сервоитной пленки, полученной при трении в водном растворе уксусной (а) и капроновой (б) кислоты

Сравнительный анализ морфологии поверхности трения при переходе к кислотам с большей длиной углеводородного радикала приводит к выводу о смене характера износа, модификации структуры тонкого приповерхностного слоя трибосопряжения. Это является следствием массопереноса компонентов контактирующих тел, а также адсорбции нанокластеров меди из рабочей среды на контртело в результате трибоэлектрохимических процессов в зоне трения при реализации избирательного переноса. При этом на стальной поверхности при фрикционном взаимодействии в водных растворах капроновой и валериановой кислот образуется медная пленка из мелкозернистых нанометровых кластеров меди. Сформированный на поверхности слой достаточно плотный, с малым разбросом частиц по размеру (рис. 1, 2).

К настоящему времени накоплено значительное количество экспериментальных данных [25–29], свидетельствующих о существенном изменении механических свойств при уменьшении характерных размеров элементов структуры объекта менее 100 нм. Это позволяет предположить изменение механических параметров сервоитных пленок по сравнению с таковыми для меди в объеме [30]. Для выяснения этого факта проводилось инструментальное индентирование.

Значения твердости H и модуля Юнга E определяли по методике Оливера-Фара [10] из характерных P - h -диаграмм (рис. 3) в соответствии со стандартами [9].

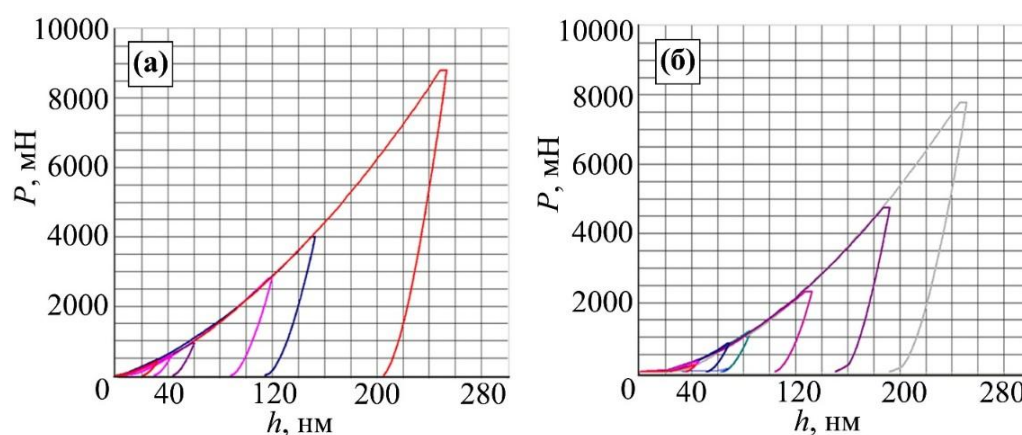


Рис. 3. Типичные P - h -диаграммы для сервоитной пленки, полученной при трении пары «латунь — сталь» в водном растворе валериановой кислоты (а), капроновой кислоты (б)

Проведенные исследования показали увеличение значений H и E пленок по сравнению с аналогичными характеристиками медного образца.

Увеличение твердости H и модуля упругости E пленки, образующейся на поверхности трения, может быть связано с изменением механизма пластической деформации. Высокая концентрация вакансий по границам зерен при фрикционном взаимодействии способствует зернограничному проскальзыванию структурных элементов относительно друг друга. При этом реализуется механизм недислокационной пластичности [31–34], что приводит к улучшению прочностных характеристик поверхностного медного слоя и увеличению пластичности при переходе в ряду кислот «муравьиная — уксусная — пропионовая — масляная — валериановая — капроновая». Из анализа зависимости величин H и E сервоитной пленки от глубины пластического отпечатка h_c также следует, что на твердость влияет масштабный фактор. Значения модуля Юнга остаются практически постоянными вплоть до глубин, сопоставимых с толщиной сервоитного слоя. Наиболее ярко это заметно на пленках, образующихся при трении в валериановой кислоте (рис. 4).

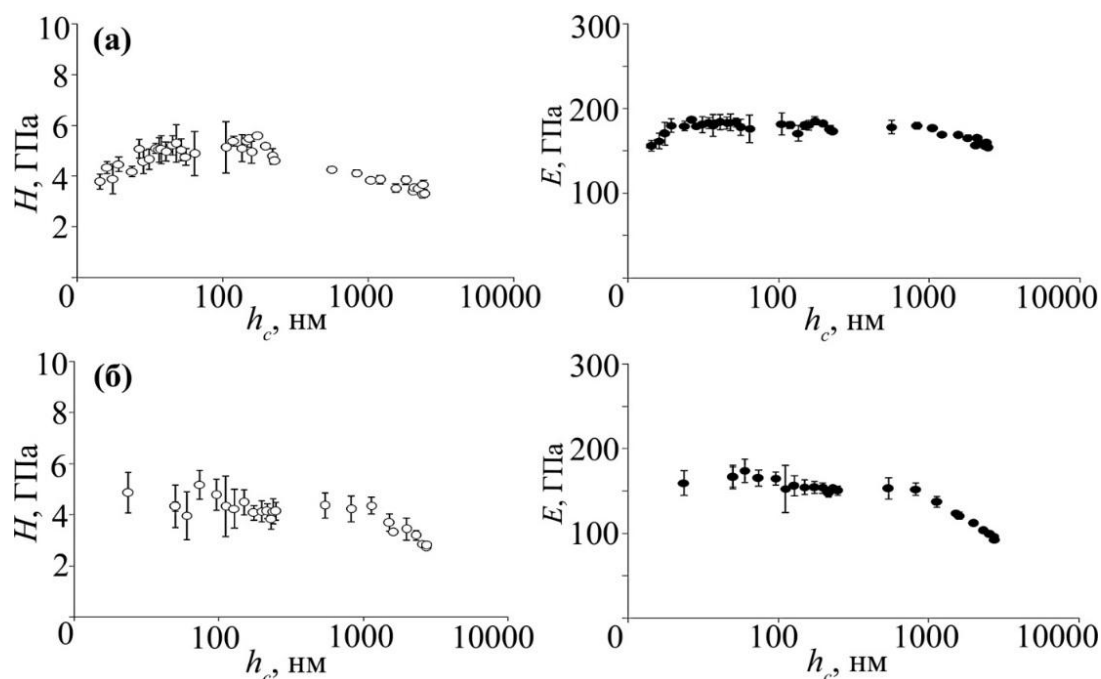


Рис. 4. Зависимость твердости (H) и модуля Юнга (E) от глубины пластического отпечатка (h_c) (показано в полулогарифмических координатах) при индентировании сервоитной пленки, полученной в водном растворе валериановой кислоты (а), капроновой кислоты (б)

Выявлен следующий размерный эффект:

- величина H растет с ростом h_c в области малых глубин;
- при дальнейшем росте h_c быстро уменьшается H .

Для других образцов размерные эффекты выражены слабее. Так, например, для пленки, сформированной в капроновой кислоте, величины H и E остаются практически постоянными во всем исследованном диапазоне h_c (от 23 нм до 1,1 мкм). Затем, с ростом h_c , значения H и E уменьшаются. Очевидно, это связано с увеличением размера зоны деформирования: на H и E начинают влиять свойства переходного слоя и материала подложки. Таким образом, в области больших глубин отпечатка ($h_c > 1,1$ мкм) величины H и E уменьшаются (рис. 4).

Размерный эффект [35, 36] также обнаруживается при изучении зависимости коэффициента трения от прикладываемой нагрузки в нано- и микрошкале [11, 16, 17] (рис. 5).

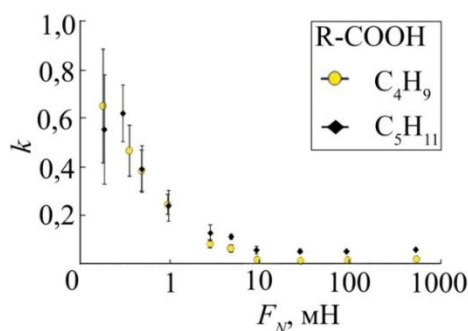


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения k сервоитной пленки от нагрузки в наношкале

Вначале он выражается в резком падении коэффициента трения с ростом нормальной нагрузки, вплоть до некоторого значения F_{Nonm} . Затем коэффициент трения плавно увеличивается с ростом F_N . Таким образом, зависимости $k = f(F_N)$ имеют явно выраженный минимум при достижении некоторого значения F_{Nonm} [11, 16, 17].

Полученные экспериментальные данные целесообразно сопоставить с теоретической зависимостью коэффициента трения от нормальной нагрузки. Таким образом, становится очевидно их хорошее качественное соответствие для всех исследованных образцов пленки. При этом на величину F_{Nonm} влияет тип используемой в

качестве смазочной среды карбоновой кислоты. Так, например, для капроновой кислоты $F_{Nonm} = 30$ мН, а для валериановой $F_{Nonm} = 100$ мН.

Обсуждение и заключения. Исследованы механические свойства серовитных пленок, формирующихся в паре трения «латунь–сталь». В нано- и микрошкале выявлены размерные эффекты в механических (твердости) и трибологических (коэффициент трения) свойствах. Показано, что исследованные свойства и характер их изменения зависят от типа используемой карбоновой кислоты. Уменьшение среднего размера кристаллитов в составе наночастиц пленки приводит к увеличению ее прочности и проявлению сверхпластичности при растяжении и сдвиге.

Полученные в работе результаты позволяют сформулировать следующие выводы.

1. При фрикционном взаимодействии пары «латунь — сталь» в водных растворах карбоновых кислот на поверхностях трения формируется антифрикционная серовитная пленка, способствующая резкому снижению коэффициента трения.
2. Серовитная пленка, формирующаяся при трибозадействии пары «латунь–сталь», является наноструктурной.
3. Трибологические параметры системы «латунь — водный раствор карбоновой кислоты — сталь» зависят от длины углеводородного радикала карбоновой кислоты, используемой в качестве смазочной среды.
4. Состав смазочной среды влияет на параметры шероховатости серовитной пленки: при переходе от муравьиной к капроновой кислоте шероховатость поверхности пленки снижается в 4 раза.
5. Локальные физико-механические свойства зависят от условий получения серовитного слоя, нагрузки и размера зоны деформирования (глубины внедрения индентора).
6. Обнаруженные размерные эффекты (зависимость определяемых величин от глубины отпечатка индентора) подтверждают вывод о наноструктурном характере серовитной пленки, формирующейся в трибосистеме «латунь–водный раствор карбоновой кислоты–сталь».

Библиографический список

1. Duvefelt, K. Model for contact between finger and sinusoidal plane to evaluate adhesion and deformation component of friction / K. Duvefelt, U. Olofsson, C.-M. Johansson // Tribology International. — 2016. — Vol. 96. — P. 389–394. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.12.020>
2. Jen, T.-C. Thermal analysis of a wet-disk clutch subjected to a constant energy engagement / T.-C. Jen, D.-J. Nemecek // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2008. — Vol. 51, № 7/8. — P. 1757–1769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.07.009>
3. Ost, W. The tribological behaviour of paper friction plates for wet clutch application investigated on SAEII and pin-on-disk test rigs / W. Ost, P. De Baets, J. Degrieck // Wear. — 2001. — Vol. 249. — P. 361–371.
4. Copper (II) oxide nanoparticles as additive in engine oil to increase the durability of piston-liner contact / M. Asnida [et al.] // Fuel. — 2018. — Vol. 212. — P. 656–667. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.002>
5. Experimental investigation of the tribological behavior of lubricants with additive containing copper nanoparticles / F.-L.-G. Borda [et al.] // Tribology International. — 2018. — Vol. 117. — P. 52–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.08.012>
6. Safonov, V. V. Evaluation of the antiwear properties of transmission oil with nanoscale powder additives / V. V. Safonov, V. V. Venskaitis, A. S. Azarov // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. — 2017. — Vol. 53, № 4. — P. 311–321. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375517040135>
7. Бурлакова, В. Э. Влияние наноразмерных кластеров меди на триботехнические свойства пары трения «сталь — сталь» в водных растворах спиртов / В. Э. Бурлакова, Ю. П. Косонова, Е. Г. Дроган // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 15, № 2 (81). — С. 41–47. DOI: <https://doi.org/10.12737/11590>
8. Кужаров, А. С. Концепция безызносности в современной трибологии / А. С. Кужаров // Изв. высш. учебных заведений. Сев.-Кавказский регион. Технические науки — 2014. — № 2 (177). — С. 23–31.
9. Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters : ISO 14577-4 (2007) / International Organization for Standardization. — Geneva : ISO, 2007. — 11 p.
10. Oliver, W.-C. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / W.-C. Oliver, G.-M. Pharr // Journal of materials research. — 2004. — Vol. 19, № 1. — P. 3–20. DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>
11. Тюрин, А. И. Исследование процессов деформирования при формировании отпечатка и трения в микро- и наномасштабе / А. И. Тюрин, Т. С. Пирожкова, И. А. Шуварин // Изв. высш. учебных заведений. Физика. — 2016. — Т. 59 (7). — С. 243–247.

12. Effect of silicate doping on the structure and mechanical properties of thin nanostructured RF magnetron sputter-deposited hydroxyapatite films / M. A. Surmeneva [et al.] // Surface and Coatings Technology. — 2015. — Vol. 275. — P. 176–184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.05.021>
13. Enhancement of the mechanical properties of az31 magnesium alloy via nanostructured hydroxyapatite thin films fabricated via radio-frequency magnetron sputtering / M. A. Surmeneva [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. — 2015. — Vol. 46. — P. 127–136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.02.025>
14. Fabrication and physico-mechanical properties of thin magnetron sputter deposited silver-containing hydroxyapatite films / A. A. Ivanova [et al.] // Applied Surface Science. — 2016. — Vol. 360. — P. 929–935. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.11.087>
15. Protective radiolucent aluminium oxide coatings for beryllium x-ray optics / O. Yurkevich [et al.] // Journal of Synchrotron Radiation. — 2017. — Vol. 24, № 4. — P. 775–780. DOI: <https://doi.org/10.1107/S1600577517007925>
16. Исследование кинетики и механизмов деформирования, трения и износа однородных и неоднородных твердых тел в наномасштабе методами динамического микро- и наноиндентирования / А. И. Тюрин [и др.] // Деформирование и разрушение структурно неоднородных сред и конструкций : мат-лы III всерос. конф., посвященной 100-летию со дня рождения академика Ю. Н. Работнова. — Новосибирск : Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева, 2014. — С. 108–110.
17. Тюрин, А. И. Исследование процессов трения и износа твердых тел в микро- и наномасштабе / А. И. Тюрин, Т. С. Пирожкова // Вестник Тамбовского университета. Естественные и технические науки. — 2016. — Т. 21, № 3. — С. 1375–1380. DOI: <https://doi.org/10.20310/1810-0198-2016-21-3-1375-1380>
18. The mechanism of the initial stage of selective transfer during frictional contact / I. V. Kragelskii [et al.] // Wear. — 1978. — Vol. 47, № 1. — P. 133–138. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(78\)90209-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(78)90209-0)
19. Беликова, М. А. Электрохимические свойства поверхности трения при самоорганизации в условиях избирательного переноса : автореф. дис. ... канд. техн. наук / М. А. Беликова. — Ростов-на-Дону, 2007. — 19 с.
20. Влияние природы органической компоненты на триботехнические свойства системы «бронза — водный раствор карбоновой кислоты — сталь» / В. Э. Бурлакова [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 15, № 4 (83). — С. 63–68. DOI: <https://doi.org/10.12737/16067>
21. Нанотрибология водных растворов карбоновых кислот при трении бронзы по стали / А. С. Кужаров [и др.] // Инновации, экология и ресурсосберегающие технологии : мат-лы XI междунар. науч.-техн. форума. — 2014. — С. 712–717.
22. Дроган, Е. Г. Исследование топографии поверхности и механических свойств сервоитной пленки / Е. Г. Дроган // Перспективы развития фундаментальных наук : сб. науч. тр. XIII междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. — 2016. — С. 148–150.
23. Jiang, J., The effect of substrate surface roughness on the wear of DLC coatings / J. Jiang, R.-D. Arnell // Wear. — 2000. — Vol. 239, № 1. — P. 1–9. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00351-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00351-8)
24. Dayson, C. The friction of very thin solid film lubricants on surfaces of finite roughness / C. Dayson // ASLE transactions. — 1971. — Vol. 14, № 2. — P. 105–115. DOI: <https://doi.org/10.1080/05698197108983232>
25. Андриевский, Р. А. Прочность наноструктур / Р. А. Андриевский, А. М. Глезер // Успехи физических наук. — 2009. — Т. 179. — С. 337–358.
26. Koch, C.-C. Nanostructured materials: processing, properties and applications / C.-C. Koch. — Norwich : William Andrew, 2006. — 784 p.
27. Glezer, A. M. Crack resistance and plasticity of amorphous alloys under microindentation / A. M. Glezer, I. E. Permyakova, V. A. Fedorov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2006. — Vol. 70, № 9. — P. 1599–1603.
28. Malygin, G. A. Plasticity and strength of micro-and nanocrystalline materials / G. A. Malygin // Physics of the Solid State. — 2007. — Vol. 49, № 6. — P. 1013–1033. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063783407060017>
29. Валиев, Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы / Р. З. Валиев, И. В. Александров. — Москва : Академкнига, 2007. — 398 с.
30. Головин, Ю. И. Введение в нанотехнику / Ю. И. Головин. — Москва : Машиностроение, 2008. — 496 с.
31. Nanostructuring of surface layers and production of nanostructured coatings as an effective method of strengthening modern structural and tool materials / V. E. Panin [et al.] // The Physics of Metals and Metallography. — 2007. — Vol. 104, № 6. — P. 627–636. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0031918X07120113>

32. Andrievski, R. A. Strength of nanostructures / R. A. Andrievski, A. M. Glezer // *Physics-Uspekhi*. — 2009. — Vol. 52, № 4. — P. 315–334. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.0179.200904a.0337>
33. Дуб, С. Н. Испытания твердых тел на нанотвердость / С. Н. Дуб, Н. В. Новиков // *Сверхтвердые материалы*. — 2004. — № 6. — С. 16–33.
34. Vakulenko, K. Effect of the state of surface layer on 40X steel fatigue characteristics / K. Vakulenko, I. Kazak, V. Matsevityi // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. — 2016. — Vol. 3, № 5. — P. 18–24.
35. Stoyanov, P. Scaling effects on materials tribology: from macro to micro scale / P. Stoyanov, R.-R. Chromik // *Materials*. — 2017. — Vol. 10, № 5. — P. 550. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10050550>
36. Current trends in the physics of nanoscale friction / N. Manini [et al.] // *Advances in Physics: X*. — 2017. — Vol. 2, № 3. — P. 569–590. DOI: <https://doi.org/10.1080/23746149.2017.1330123>

Поступила в редакцию 15.06.18

Сдана в редакцию 15.06.18

Запланирована в номер 05.07.18

Received 15.06.18

Submitted 15.06.18

Scheduled in the issue 05.07.18

Об авторах:

Бурлакова Виктория Эдуардовна,

заведующая кафедрой «Химия» Донского государственного технического университета (РФ, 344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3779-7079>

vburlakova@donstu.ru

Дроган Екатерина Геннадьевна,

ассистент кафедры «Химия» Донского государственного технического университета

(РФ, 344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4002-2082>

Ekaterina.drogan@gmail.com

Тюрин Александр Иванович,

заместитель директора по НИР Научно-исследовательского института «Нанотехнологии и наноматериалы» Тамбовского государственного университета им. Г. Р. Державина (РФ, 392000, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33), кандидат физико-математических наук, доцент,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8020-2507>

tyurin@tsu.tmb.ru

Пирожкова Татьяна Сергеевна,

инженер научно-исследовательского института «Нанотехнологии и наноматериалы» Тамбовского государственного университета им. Г. Р. Державина (РФ, 392000, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4231-0213>

t-s-pir@ya.ru

Authors:

Burlakova, Victoria E.,

Head of the Chemistry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344000, RF), Dr.Sci. (Eng.), professor,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3779-7079>

vburlakova@donstu.ru

Drogan, Ekaterina G.,

teaching assistant of the Chemistry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344000, RF),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4002-2082>

Ekaterina.drogan@gmail.com

Tyurin, Alexander I.,

Associate director for Research, Research Institute of Nanotechnologies and Nanomaterials, G.R. Derzhavin Tambov State University (33, Ul. Internatsionalnaya, Tambov, 392000, RF), Cand.Sci. (Phys.-Math.), associate professor,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8020-2507>

tyurin@tsu.tmb.ru

Pirozhkova, Tatyana S.,

engineer, Research Institute of Nanotechnologies and Nanomaterials, G.R. Derzhavin Tambov State University (33, Ul. Internatsionalnaya, Tambov, 392000, RF),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4231-0213>

t-s-pir@ya.ru