

УДК 621.891

О. А. МИКОСЯНЧИК¹, Р. Г. МНАЦАКАНОВ¹, А. Ю. КУМУРЖИ²,
С. В. ШАКУЛИЕВ¹

¹Национальный авиационный университет, Украина

²Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко, Украина

ОЦЕНКА СТРУКТУРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПАР ТРЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ В РЕЖИМЕ ПУСК - ОСТАНОВКА

Определены закономерности влияния кинетики формирования граничных смазочных слоев минеральным трансмиссионным маслом на активированных трением контактных поверхностях и приращение удельной работы трения на износостойкость сталей 40X и ШХ15 в режиме частых пусков – остановок. Анализ смазочной способности масла при пусковом максимальном моменте трения показал, что сформированная толщина масляного слоя в контакте имеет двойственную природу – граничную и гидродинамическую. Установлены отличия в приращении удельной работы трения для исследуемых марок стали как в период пуска при чистом качении, так и при наличии проскальзывания, при этом энергонапряженность контакта выше для стали 40X. На кинетику изменения энергетического параметра для исследуемых марок стали существенное влияние оказывает структура стали после закалки и отпуска.

Ключевые слова: толщина смазочного слоя, удельная работа трения, реологические свойства, микротвердость, износ.

Введение и постановка задачи исследований. Большое многообразие физико-химических процессов, протекающих на контактных поверхностях при трении, затрудняет выбор подхода к описанию процесса изнашивания элементов трибосопряжения. Изнашивание деталей и долговечность трибосистемы при установившемся режиме трения определяется непрерывной моделью изнашивания, учитывающей кинетические закономерности износа, представляющие собой временные функции [1].

Отличительной особенностью эксплуатации многих трибомеханических систем являются неустановившиеся режимы работы, составляющие в отдельных случаях 60 – 90% времени их эксплуатации [2]. Главными фундаментальными задачами при повышении долговечности трибосопряжения являются установление диапазона нагрузочно-скоростных и температурных параметров эксплуатации пар трения, выбор износостойких материалов и эффективного смазочного материала. При этом, противоизносные и антифрикционные свойства смазочного материала необходимо рассматривать в связи с особенностями структуры и свойств тонкого, модифицированного трением, поверхностного слоя металла [3]. Установлено, что для поверхностей, подвергнутых фрикционному воздействию, характерны особенности усиления адсорбционно-диффузионных процессов и аномальные эффекты резкого повышения химической активности материалов [4]. В ходе изменений, происходящих на активированных трением контактных поверхностях, происходит формирование тонких пленок вторичных структур [5], смазочных адсорбционных слоев различной природы [6], которые, в результате структурной приспособляемости, характеризуются большей износостойкостью, по сравнению с исходным материалом.

Согласно [7], для достижения максимальной износостойкости при структурной приспособляемости элементов трибосопряжения необходимо исполь-

зовать средства уменьшения активации поверхностных слоев металла, снижения работы трения, регулирования пассивации и управления температурой.

Разработка методов оценки эффективности триботехнических характеристик контакта в нестационарных условиях трения является перспективным направлением при определении диапазона работоспособности материалов контактных поверхностей и смазочного материала при их эксплуатации в динамических условиях нагружения.

Цель работы. Определить закономерности влияния кинетики формирования граничных смазочных слоев на активированных трением контактных поверхностях и приращение удельной работы трения на износостойкость стали в режиме частых пусков – остановок.

Материалы и методы исследований. Исследование триботехнических параметров пар трения проводилось на установке для оценки триботехнических характеристик элементов трибосопряжения [8]. Момент трения, частота оборотов роликов, температура смазочного материала, толщина смазочного слоя, измеренная методом падения напряжения в режиме нормального тлеющего разряда [3], записываются и обрабатываются на персональном компьютере в реальном времени с графическим отображением их изменений в каждом цикле наработки.

В качестве образцов использовались ролики из стали 40X (HRC = 38, $R_a = 0,32$ мкм), и стали ШХ15 (HRC = 60, $R_a = 0,32$ мкм). Смазочный материал – трансмиссионное минеральное всесезонное масло ТАД-17и (API – GL-5).

Исследование смазочных свойств масла проходило в режиме пуск - остановка по следующей схеме: разгон в условиях чистого качения контактных поверхностей (12,5с) – работа в условиях 20% проскальзывания (4с) – торможение в условиях чистого качения контактных поверхностей (12,5с).

Контактная нагрузка по Герцу ($\sigma_{\max}$) составила 250 МПа, общее количество циклов наработки – 200, максимальное количество оборотов составило 1000 и 800 об/мин соответственно для опережающей и отстающей поверхностей.

Результаты исследований и их обсуждение. При исследовании эффективности смазочного действия трансмиссионного масла ТАД-17и в начальный пусковой период цикла, в условиях чистого качения установлена высокая несущая способность масла для всех видов исследуемых контактных поверхностей. Следует отметить, что в начальный период пуска, который соответствует 0 – 2с, страгивание контактных поверхностей в 200 циклах наработки для стали 40X, согласно расчетному критерию λ [9], происходит в условиях полусухого (5% циклов), граничного (20% циклов), эластогидродинамического (30% циклов) и гидродинамического (45% циклов) режимов смазочного действия, а для более твердой стали ШХ15 количество пусков, происходящих в условиях полусухого и граничного режимов смазочного действия увеличивается, в среднем, на 20%. Вследствие активации поверхностных слоев металла в нестационарных условиях работы контактных поверхностей, происходит постепенное формирование на них граничных адсорбционных слоев смазочного материала, проявляющих высокую адаптационную способность – толщина граничных слоев составляет от 0,2 до 4 мкм. Анализ смазочной способности масла при пусковом максимальном моменте трения показал, что сформированная толщина масляного слоя в контакте имеет двойственную природу – граничную и гидродинамическую. Приращение гидродинамической составляющей толщины смазочного слоя при увеличе-

нии суммарной скорости качения до 1,48 м/с, рассчитанное как разность измеряемой толщины смазочного слоя при данной скорости контактных поверхностей и толщины граничного слоя, измеренного на стоянке, составляет 1 – 3 мкм, что при последующем увеличении скорости качения обеспечивает реализацию гидродинамического режима смазочного действия (рис. 1).

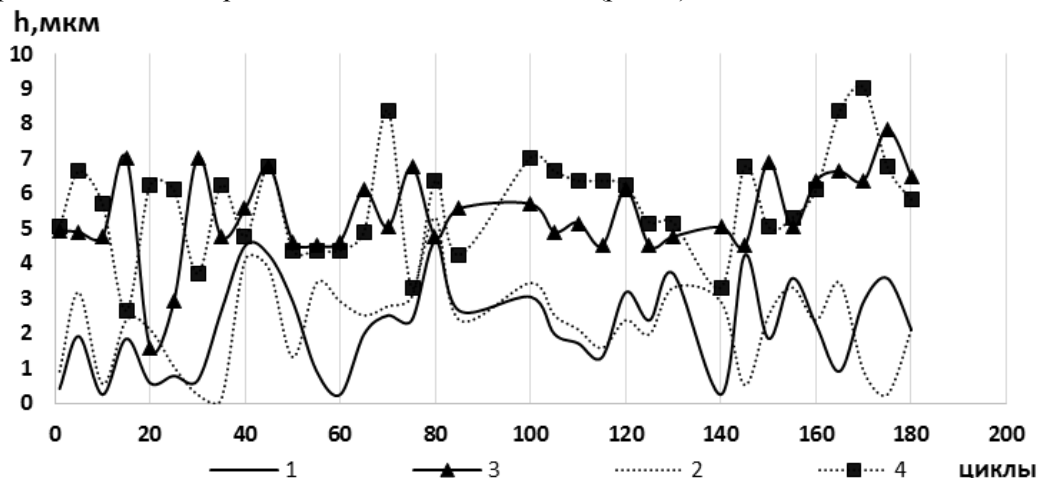


Рис. 1. Изменение общей толщины смазочного слоя в контакте при суммарной скорости качения 1,48 м/с и толщины граничных адсорбционных слоев смазки: 1 – толщина граничных слоев масла на стали ШХ15; 2 – толщина граничных слоев масла на стали 40X; 3 – общая толщина смазки для стали ШХ15; 4 – общая толщина смазки для стали 40X

В данных условиях эксперимента чистое качение контактных поверхностей изменялось на качение с проскальзыванием, максимальные значения которого составляли 20% при скорости качения 4,8 м/с. При таком режиме работы исследуемый смазочный материал проявляет эффективное смазочное действие, реализуется гидродинамический режим смазки, при этом толщина смазочного слоя составляет 4 – 8 мкм, что соответствует аналогичным значениям данного параметра в условиях чистого качения. Согласно результатам, полученным в работе [10], контактно-гидродинамический критерий $P_H/\mu V_{\Sigma k}$, характеризующий несущую способность контакта, положительно оценивает увеличение скорости качения на прирост толщины смазочного слоя в контакте, однако увеличение скорости скольжения при наличии проскальзывания обуславливает снижение эффективности смазочного действия. Аналогичные результаты получены и в наших условиях эксперимента – стабилизация толщины смазочного слоя в контакте, отсутствие корреляционного влияния на данный параметр скорости качения, являются последствием появления в контакте высоких градиентов скорости сдвига масляного слоя, достигающих значений $6,23 \cdot 10^4 - 1,84 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, при увеличении проскальзывания.

Наличие проскальзывания в контакте существенно изменяет реологические свойства исследуемого минерального трансмиссионного масла. Если в условиях чистого качения эффективная вязкость масла ($\eta_{\text{эф}}$), независимо от типа материала контактных поверхностей, составляла, в среднем, 2000 Па·с, то при высоких градиентах скорости сдвига снижение этого показателя установлено в 10 раз при смазывании стали 40X и в 20 раз при использовании роликов из стали ШХ15 (рис. 2).

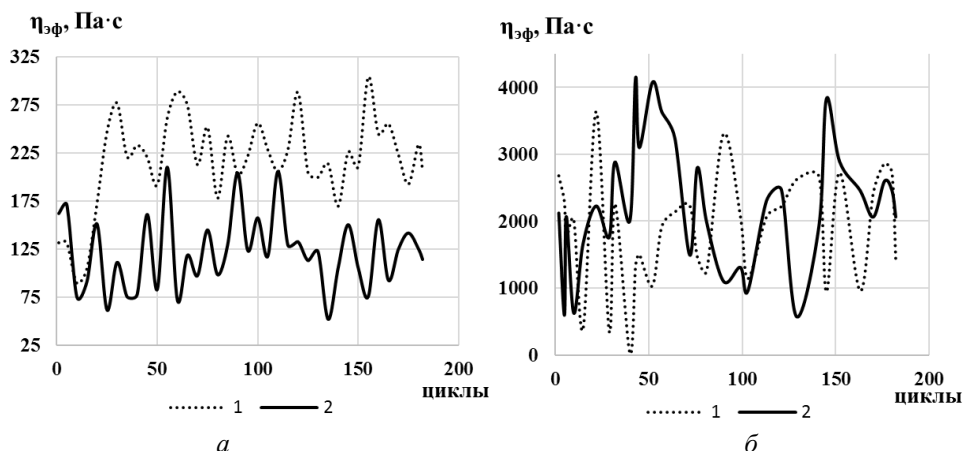


Рис. 2. Кинетика изменения эффективной вязкости в контакте в условиях чистого качения (а) и качения с проскальзыванием (б): 1 – при смазывании стали 40Х, 2 – при смазывании стали 3ХХ15

Зависимость $\eta_{\text{эф}}$ от градиента скорости сдвига свидетельствует о приобретении смазочным материалом неньютоновских свойств в контакте, что также подтверждается и другими авторами [11].

Условия чистого качения способствуют локализации напряжений сдвига непосредственно в смазочном слое, где сила трения меньше, при этом высоковязкое масло ТАД-17и проявляет высокие антифрикционные свойства – коэффициент трения не зависит от твердости исследуемых поверхностей и составляет, в среднем, 0,01. Однако, при высоких градиентах скорости сдвига по толщине смазочного слоя в условиях проскальзывания, напряжение сдвига смазочных слоев возрастает в 2,4 раза при использовании более мягкого материала стали 40Х, что приводит и к корреляционному повышению коэффициента трения, а при смазывании поверхностей из стали 3ХХ15 изменений напряжения сдвига смазочного слоя и коэффициента трения не установлено (рис.3).

Мы предполагаем, что разные сдвиговые напряжения в смазочном слое при использовании сталей 40Х и 3ХХ15 обусловлены различной природой граничных смазочных слоев, образующихся из компонентов смазочного материала и участвующих в формировании вторичных структур на активированных трением контактных поверхностях. Это предположение основано на анализе изменения энергетического параметра – удельной работы трения ($A_{\text{тр}}$) в контакте согласно методике [9]. Согласно Костецкому, удельная работа трения является комплексным физическим критерием, всесторонне характеризующим процесс трения и изнашивания, а также поверхностную прочность материалов [7]. В начальный момент страгивания контактных поверхностей для стали 40Х установлены всплески удельной работы трения в диапазоне 3 – 35 Дж/мм² в 95% циклов при наработке, а для стали 3ХХ15 в аналогичных условиях эксперимента приращение данного параметра составляет 1 – 30 Дж/мм² в 20% циклов. Увеличение скорости качения до 4,8 м/с при наличие проскальзывания, где максимальная скорость скольжения составляет 0,65 м/с, энергонапряженность контакта резко возрастает: $A_{\text{тр}}$ находится в диапазонах 1000 – 2800 Дж/мм² и 500 – 2000 Дж/мм² для сталей 40Х и 3ХХ15 соответственно (рис. 4).

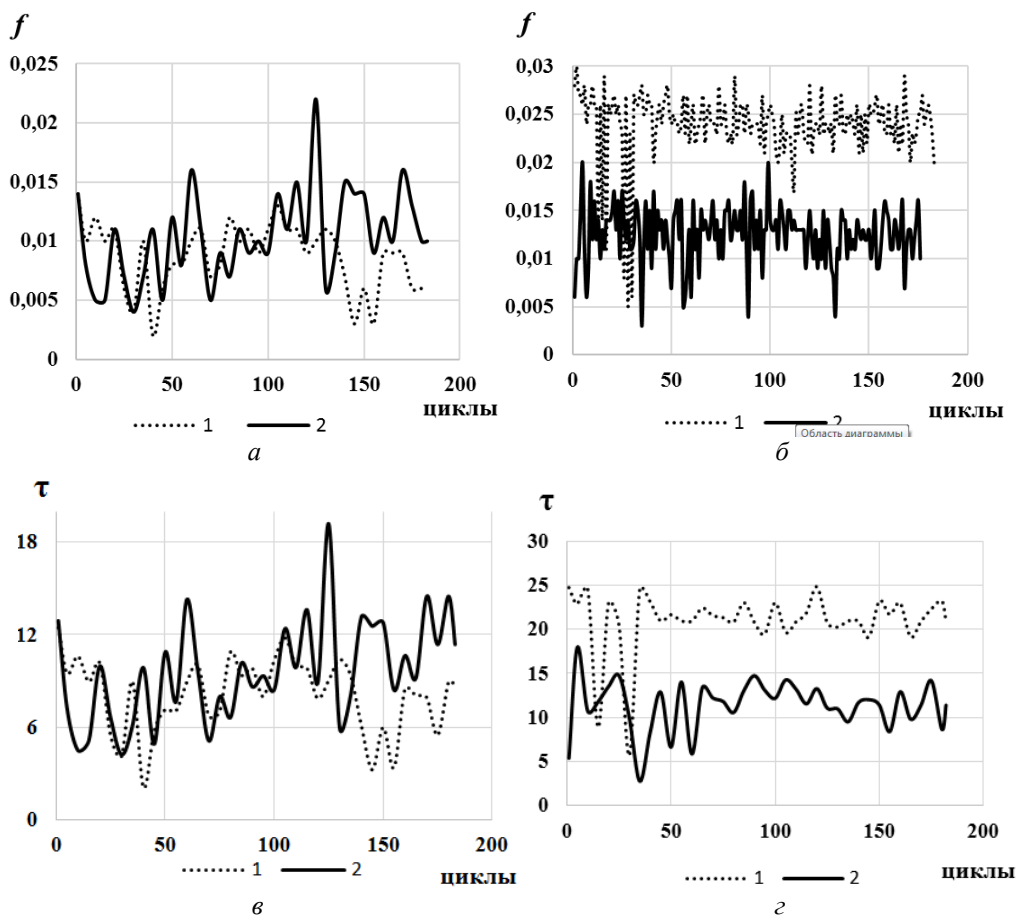


Рис. 3. Динамика коэффициента трения (a , b) и напряжения сдвига смазочного слоя ($в$, $г$) в нестационарных условиях работы: 1 – при смазывании стали 40X, 2 – при смазывании стали ШХ15

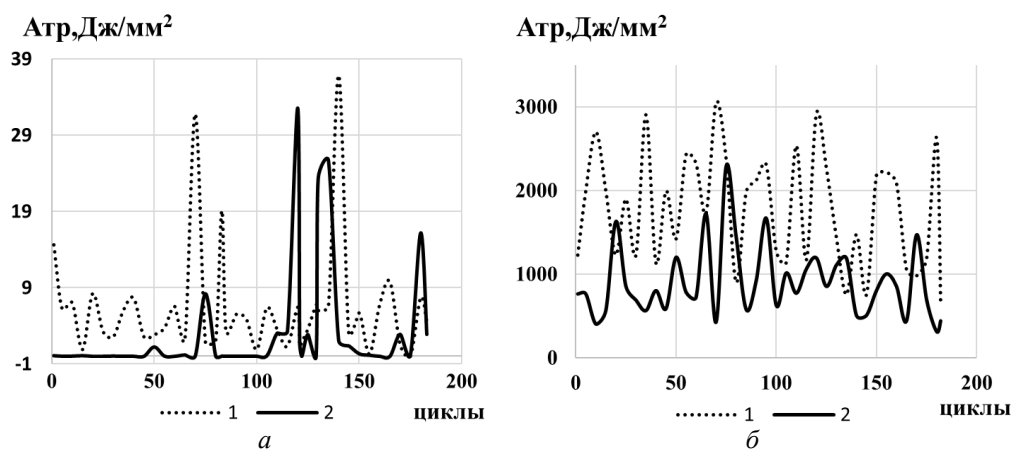


Рис.4. Изменение удельной работы трения в контакте в период пуска при чистом качении (a) и при 20% проскальзывании контактных поверхностей ($б$): 1 – для стали 40X, 2 – для стали ШХ15

Столь существенные отличия в кинетике изменения энергетического параметра для исследуемых марок стали обусловлены их структурными различиями. Для стали 40X характерна структура сорбита. Согласно [12], при трении такой стали в приповерхностном слое из-за низкого потенциального барьера сдвиговой деформации формируется текстурированная структура. В наших условиях эксперимента физико-химическая активность активированного трением металла возрастает, что приводит к повышенной адсорбционной способности и формированию на контактных поверхностях хемосорбционных граничных слоев, характеризующихся повышенным напряжением сдвига вследствие влияния на них твердой фазы активированного металла, что проявляется в режиме проскальзывания. Начальная стадия формирования граничных слоев приводит к интенсификации износа и адсорбционной пластификации поверхностных слоев металла, что проявляется в их разупрочнении – микротвердость (ΔH_{100}) опережающей и отстающей поверхностей уменьшается на 260 и 490 МПа соответственно (рис. 5).

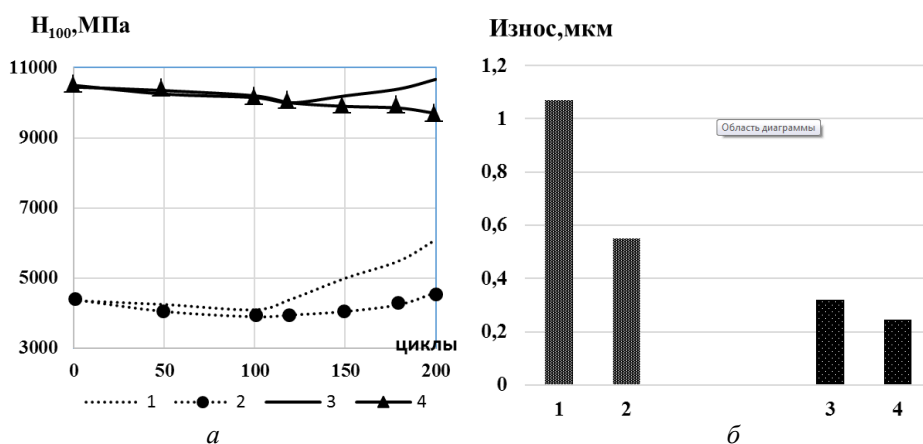


Рис. 5. Изменение микротвёрдости поверхностных слоев металла (а) и износ контактных поверхностей (б) при наработке 200 циклов: 1 – отстающая поверхность, 40X; 2 – опережающая поверхность, 40X; 3 – отстающая поверхность, ШХ15; 4 – опережающая поверхность, ШХ15

Однако, после наработки 100 циклов происходит постепенное упрочнение поверхностных слоев стали 40X, что также совпадает с результатами, полученными в работе [12]: основным видом упрочнения сорбитной структуры в поверхностном слое является наклеп.

Для стали ШХ15, имеющей после закалки и низкотемпературного отпуска структуру мелкоигльчатого мартенсита с равномерно распределенными избыточными карбидами, характерна высокая износостойкость контактных поверхностей – износ отстающей и опережающей поверхностей в 3,34 и 2,23 раз меньше, по сравнению с аналогичными показателями, установленными для стали 40X (рис. 5). Согласно [13] мелкодисперсные карбиды благоприятно влияют на релаксационную способность металла. В наших условиях эксперимента, при нестационарной работе контактных поверхностей приращение удельной работы трения характеризуется низкими показателями, уменьшается влияние твердой фазы на сформированные граничные слои смазочного материала, что и проявляется в снижении напряжений сдвига смазочного слоя в 2,3 раза при проскальзывании, по сравнению с τ граничных слоев, образованных на стали 40X.

Следует отметить, что эффект адсорбционного пластифицирования и понижения прочности поверхностных слоев металла для ШХ15 проявляется при более длительных циклах нагружения – для отстающей поверхности разупрочнение поверхностных слоев металла составило $\Delta H_{100} = 800$ МПа без последующего упрочнения, а для опережающей поверхности разупрочнение составило $\Delta H_{100} = 500$ МПа до 120 цикла, при дальнейшей наработке контактные поверхности характеризуются постепенным упрочнением.

Из приведенного анализа смазывающих, антифрикционных и реологических свойств триботехнического контакта следует, что на структурную приспособляемость контактных поверхностей в нестационарном режиме работы существенное влияние оказывает активация поверхностных слоев металла на формирование граничных смазочных слоев маслом ТАД-17и. Причем, для материала с меньшей твердостью характерно формирование граничных пленок с большими показателями эффективной вязкости в контакте и напряжений сдвига масляного слоя вследствие их дезориентации и постоянного обновления на истирающейся поверхности металла при износе. Повышение твердости стали вследствие менее интенсивной ее активации при трении способствует формированию стабильных граничных адсорбционных слоев, характеризующихся более низкими напряжениями сдвига и лучшими антифрикционными свойствами.

Выводы:

1. Для стали ШХ15 увеличивается время адаптации граничных смазочных слоев вследствие минимального приращения удельной работы трения в контакте, при этом в начальный период страгивания реализуется полусухой или граничный режимы смазочного действия.

2. 20%-ное проскальзывание в контакте существенно повышает градиент скорости сдвига смазочных слоев, что приводит к снижению эффективной вязкости в контакте в 10 раз при смазывании стали 40Х и в 20 раз при использовании стали ШХ15.

3. При градиентах скорости сдвига по толщине смазочного слоя выше $6,23 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ в условиях проскальзывания, напряжение сдвига смазочных слоев возрастает в 2,4 раза при использовании более мягкого материала стали 40Х, что приводит и к корреляционному повышению коэффициента трения, а при смазывании поверхностей из стали ШХ15 изменений напряжений сдвига смазочного слоя и коэффициента трения не установлено.

4. Установлены показатели приращения удельной работы трения в период пуска при чистом качении для стали 40Х до 35 Дж/мм^2 в 95% циклов, а для стали ШХ15 – до 30 Дж/мм^2 в 20% циклов; при наличии проскальзывания энергонапряженность контакта резко возрастает – удельная работа трения находится в диапазонах $1000 - 2800 \text{ Дж/мм}^2$ и $500 - 2000 \text{ Дж/мм}^2$ для сталей 40Х и ШХ15 соответственно.

5. Структурные различия сталей 40Х и ШХ15 после закалки и отпуска существенно влияют на износостойкость металла: для стали ШХ15 структура мелкоигольчатого мартенсита с равномерно распределенными избыточными карбидами характеризуется высокой износостойкостью контактных поверхностей – износ отстающей и опережающей поверхностей в 3,34 и 2,23 раз меньше, по сравнению с аналогичными показателями, установленными для сорбита отпуска стали 40Х.

Список литературы

1. Барышев В.И. Температурно–силовая совместимость материалов подшипников скольжения шестеренных насосов типа НШ / В.И. Барышев // Серия «Машиностроение», Вестник ЮУрГУ. – 2005, № 1(6). – С.105–113.
2. Костецкий Б.И. О роли вторичных структур в формировании механизмов трения, смазочного действия и изнашивания / Костецкий Б.И. // Трение и износ. – 1980. – Т. I, № 4 – С.57–68.
3. [Электронный ресурс] // Научная библиотека диссертаций и авторефератов. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.dissercat.com/content/deformatsionno-spektralnyi-analiz-vtorichnykh-struktur-poverkhnostei-treniya-detalei-aviatsi>.
4. Патент на корисну модель №88748, МПК G 01 N 3/56 Пристрій для оцінки трибо-технічних характеристик трибоелементів / Мікосянчик О.О. – u 2013 13450, заявл. 19.11.13; опубл. 25.03.14, Бюл. №6 – 4с.
5. Райко М.В. Исследование смазочного действия нефтяных масел в условиях работы зубчатых передач: дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук: 05.02.04 / М.В. Райко – К.: КИИГА, 1974. – 369с.
6. Дмитриченко Н.Ф. Смазочные процессы в условиях нестационарного трения / Дмитриченко Н.Ф., Мнацаканов Р.Г. – Житомир: ЖИТИ, 2002. – 308 с.
7. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин / Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Шнейдерович Р.М. – М.:ГНТИМЛ, 1959. – 459с.
8. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография / И.Д. Ибатуллин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 507с.
9. Александров А.В. Сопротивление материалов: учебник для вузов / Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. – М.:Высш. школа, 1995. – 560с.
10. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения / Ахматов А.С. – М., Физматгиз. – 1967. – 472 с.
11. Поверхностная прочность материалов при трении / [Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, А. К. Караулов та ін.]. – Київ: Техніка, 1976. – 296 с.

Статья поступила в редакцию 19.02.2016.

О. О. МІКОСЯНЧИК, Р. Г. МНАЦАКАНОВ, О. Ю. КУМУРЖИ, С. В. ШАКУЛІСВ

ОЦІНКА СТРУКТУРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПАР ТЕРТЯ ПРИ РОБОТІ В РЕЖИМІ ПУСК - ЗУПИНКА

Визначені закономірності впливу кінетики формування граничних змащувальних шарів мінеральною трансмісійною оливою на активованих тертям контактних поверхнях і приросту питомої роботи тертя на зносостійкість сталей 40X і ШХ15 в режимі частих пусків - зупинок. Аналіз мастильної здатності оливи при пусковому максимальному моменті тертя показав, що сформована товщина масляного шару в контакті має дві складові – граничну та гідродинамічну. Встановлено відмінності в прирості питомої роботи тертя для досліджуваних марок сталі як в період пуску при чистому коченні, так і при наявності проковзування, при цьому енергонавантаженість контакту вище для сталі 40X. На кінетику зміни енергетичного параметру для досліджуваних марок сталі істотно впливає структура сталі після загартування і відпуску.

Ключові слова: товщина мастильного шару, питома робота тертя, реологічні властивості, мікротвердість, знос.

О. А. MIKOSYANCHYK, R. G. MNATSAKANOV, A. Y. KUMURJY, S. V. SHAKULIEV

EVALUATION OF STRUCTURAL AND ENERGY PARAMETERS OF FRICTION PAIRS UNDER START – STOP MODE

The presented study identifies patterns that influence the kinetics of the formation of the boundary layers of lubricating mineral gear oil on activated friction contact surfaces, and the increment of the friction specific work on wear-resistant steel 40X and ШХ15 in frequent start – stop operation mode. The analysis of the lubricating ability of oil at the starting maximum torque of friction showed that the thickness of the oil layer formed in contact has a dual nature – boundary and hydrodynamic. The differences are indentified in the increment of the friction specific work for steel brands under research in the start-up period at pure rolling as well in slippage presence, herewith, the energy intensity of contact is higher for steel 40X. On kinetics of changes in the energy parameter for the researched steel brand is significantly affected by the structure of steel after quenching and tempering.

Key words: lubricating layer thickness, friction specific work, rheological characteristics, micro-hardness, wear.

Мікосянчик Оксана Олександрівна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри безпеки життєдіяльності, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м.Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 78 91, E-mail: oksana.mikos@bk.ru.

Мнацаканов Рудольф Георгійович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри організації авіаційних робіт та послуг, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м.Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 68 75, E-mail: mnatsakanov@bk.ru.

Кумуржи Олександр Юрійович – молодший науковий співробітник лабораторії зміцнення поверхні елементів конструкцій № 6.1, Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка, м.Київ, Україна, 01014, тел.: +38 044 281 63 77, E-mail: maricom@ukr.net

Шакулісв Сердар Вельсахатович – аспірант, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м.Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 68 75