

УДК 621.894:621.891

В. И. КУБИЧ

Запорожский национальный технический университет, Украина

ПОВЕДЕНИЕ СМАЗОЧНЫХ СЛОЕВ В ТРИБОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ «40X – (II–20A)–40X» ПРИ ГРАНИЧНО-ДОПУСТИМОЙ НАГРУЗКЕ

Приведены результаты триботехнических испытаний материалов трибологической системы «40X–(II–20A)–40X», проведенных на образцах на схеме трения «ролик-ролик», в условиях смены скоростного режима взаимодействия поверхностей с разной исходной шероховатостью при гранично-допустимой нагрузке. Полученные результаты позволили определить условия и время эффективного действия сформировавшихся смазочных слоев в отсутствие подпитки зоны контакта поверхностей трения компонентами масла II-20A.

Ключевые слова: коэффициент трения, время, поверхность, ролик, смазочный слой, испытание

Вступлення. Значимая часть деталей объектов машиностроения работает при их смазывании моторными, трансмиссионными, индустриальными и другими маслами, из которых на поверхностях трения формируются смазочные слои. На эффективность формирования и последующего проявления противоизносных, противозадирных и антифрикционных свойств смазочных слоев существенное влияние оказывают давление в контакте поверхностей трения, скорость их взаимного перемещения, и вид контакта: по площади; линейный; точечный. Например, в линейном контакте трущихся поверхностей, характерном для зубчатых передач, максимальное давление может достигать 1000–1500 МПа. При этом изнашивание поверхностей зубьев шестерен обуславливается нарушением режима граничной смазки, т.е. разрушением смазочных слоев [1]. В исследованиях, направленных на изучение трибологических процессов, протекающих при взаимодействии зубьев шестерен, общепринятой схемой, имитирующей условия их работы, является схема с линейным контактом двух роликов по образующей.

Постановка проблемы. Триботехнические характеристики индустриальных масел, применяющихся в зубчатых передачах, как и других смазочных материалов, оцениваются комплексно: по диаметру пятна износа, по индексу задира, по нагрузке сваривания, по критической нагрузке (ГОСТ 9490-75). При этом испытания проводятся с использованием машин с точечным контактом: четырехшариковая машины ЧМТ-1, машины КТ-2, МАСТ-1 и др, что не в полной мере может моделировать условия взаимодействия компонентов смазочных материалов с металлическими поверхностями при их линейном контакте, соответственно и создавать предпосылки к формированию смазочных слоев с высокой несущей способностью. Стандартизованная методика в определении смазывающих свойств не выделяет достаточно важного оценочного критерия - как временной показатель эффективного функционирования формирующихся смазочных слоев. Этот критерий может определять длительность возможного сохранения режима граничной смазки в трибологических системах, и как аргумент функции изменения коэффициента трения отражать характер поведения смазочных слоев при сменах режимов силового и нагрузочного взаимодействия. В настоящее время вопросам оценки эффективности формирования смазочных слоев и их влияния на изнашивание поверхностей посвящено ряд работ [2–6]. Так в работе [7] на основании проведенных триботех-

нических испытаний материалов триад «45ХН2МФА-Lukoil-Super-AO20-1», «12Х2Н4-Lukoil-Super-AO20-1» на машине трения СМЦ-2 в условиях ступенчатого нагружения выявлен неоднозначный характер формирования смазочных слоев, и проявления их свойств при граничном трении. При этом условия формирования смазочных слоев моделировались в схеме трения «ролик-колодка», и учитывался временной показатель. Тем самым была показана возможность оценки проявления смазочных свойств масла не только в стандартизованном точечном контакте, но также и при линейном контакте трущихся поверхностей. На сегодня оценке проявления свойств смазочных слоев, сформированных из разносоставных смазочных материалов, при линейном контакте, в диапазонных режимах нагружения предметное внимание не уделялось. В связи с этим возникает необходимость проведения поисковых исследований по определению условий формирования и разрушения смазочных слоев в подвижном линейном контакте.

Целью данной работы является установление зависимости изменения коэффициента трения в трибологической системе «40Х–(И–20А)–40Х» с линейным контактом поверхностей образцов от смены скоростного параметра взаимодействия в условиях прекращения подачи смазочного материала при гранично-допустимой нагрузке.

Методика исследований. Для проведения исследований использовались образцы-ролики, изготовленные из стали 40Х наружным диаметром $D = 50$ мм, шириною $b = 10$ мм с параметром шероховатости рабочей поверхности $Ra_{1,1} = 0,08$ мкм, $Ra_{2,2} = 0,16$ мкм, $Ra_{3,3} = 0,32$ мкм и микротвердостью поверхностного слоя HRC 42–52.

Триботехнических испытания проводились на машине трения модели СМЦ-2 при следующих условиях:

- схема трения «подвижный ролик - неподвижный ролик» (рис.1);
- частоты вращения подвижного ролика: 300 мин^{-1} ; 500 мин^{-1} ; $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$;
- нагрузка в зоне трения постоянная, приложена к верхнему ролику;
- капельное смазывание – 1 капля в 5 с маслом индустриальным И-20А.

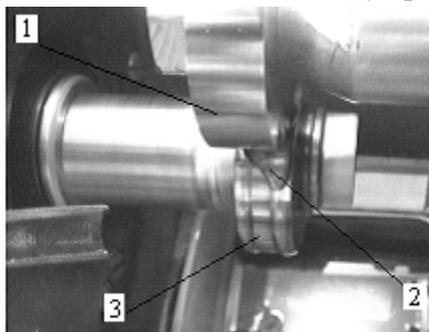


Рис. 1. Образцы схемы трения «ролик-ролик» при испытании: 1 – верхний неподвижный ролик; 2 – смазочная среда (масло И-20А); 3 – нижний вращающийся ролик

Для установления закономерностей проявления трибологических свойств смазочных слоев использовалась следующая методика:

- предварительное смазывание поверхности вращающегося и неподвижного ролика, приведение роликов в непосредственный контакт по линейной образующей $l \approx 8,5$ мм;
- пуск, приведение во вращение нижнего образца, частота вращения n_i ;
- испытание в течение 10 мин при капельном смазывании для обеспечения прирабатываемости масла и протекания процессов адсорбции его молекул к ак-

тивным центрам материала контактных поверхностей образцов; регистрация момента сопротивления вращению;

– прекращение подачи масла в зону трения, испытание в течение 10 мин.; регистрация момента сопротивления вращению;

– остановка, раскрытие контакта, визуальный контроль состояния поверхностей;

– вытирание контактных поверхностей фетровым материалом, визуальный контроль состояния поверхностей;

– приведение роликов в непосредственный контакт, пуск, контроль сопротивления вращению нижнего образца; испытание в течение 10 мин., регистрация момента сопротивления вращению;

– остановка опыта; раскрытие контакта, визуальный контроль состояния поверхностей.

Триботехнические испытания проводились в три этапа.

На первом этапе контактное взаимодействие рабочих поверхностей роликов осуществлялось без смазочного материала. Это позволило установить закономерность изменения коэффициента трения по мере изнашивания ювенильных поверхностных слоев роликов. Наличие прямолинейных участков свидетельствовало о том, что имели место установившиеся процессы взаимодействия образований на поверхности и по глубине. При этом численные значения коэффициента трения предложено рассматривать как критерий начала снижения функциональной активности молекул масла, и полной ее остановкой.

На втором этапе испытания проводились со смазочным материалом. При этом определялось значение нормальной силы, превышение которой приводило к невозможности влияния компонентов смазочного материала на процессы формирования слоев граничной смазки на рабочих поверхностях роликов.

На третьем этапе испытания проводились со смазочным материалом. Это позволило определить зависимости изменения коэффициента трения при граничной смазке. При этом эффективность проявления свойств формирующихся смазочных слоев обуславливалось:

– адгезионно-когезионным, адсорбционным взаимодействием молекул масла и сопутствующих образований, как с наружной, так и с внутренней поверхностями материала роликов;

– шероховатостью поверхностей в начальный период контактного взаимодействия;

– условиями силового и скоростного взаимодействия рабочих поверхностей.

Количество опытов на каждом этапе составило три. Графические зависимости устанавливаемых закономерностей строились в соответствии с усредненными значениями коэффициента трения.

Результаты исследований и обсуждение. В соответствии с результатами триботехнических испытаний первого этапа исследований ($n = 1000 \text{ мин}^{-1}$, $Ra_1 = 0,08 \text{ мкм}$) установлена зависимость изменения коэффициента трения по времени испытаний при изнашивании структур поверхностных слоев роликов. Полученные данные свидетельствуют о наличии пяти участков установившегося процесса трибологического взаимодействия структур, т.е. нормализации процесса трения (рис. 2).

Параметры трения приведены в таблице.

В соответствии с установленной зависимостью (рис. 2), визуальным освидетельствованием состояния рабочих поверхностей роликов, и структурою поверхностного слоя шлифованной детали [8] стало возможным представить модели контактного взаимодействия изнашивающихся структур (рис. 3).

Таблица

**Параметры установившегося процесса взаимодействия структур
поверхностных слоев**

Параметр	Участок				
	I	II	III	IV	V
Коэффициент трения, f	0,17	0,5	0,83	0,7	0,44
Продолжительность t , с	3–5	10–12	1–2	10–12	90

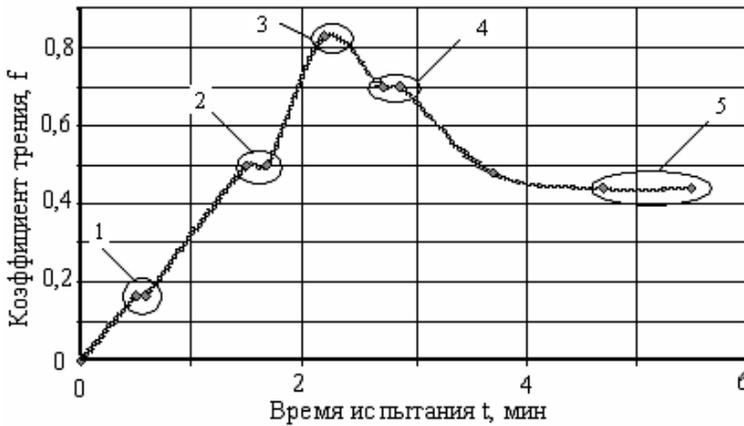


Рис. 2. Изменение коэффициента трения при изнашивании структур поверхностных слоев роликов: (1-5) – участки нормализации процесса трения

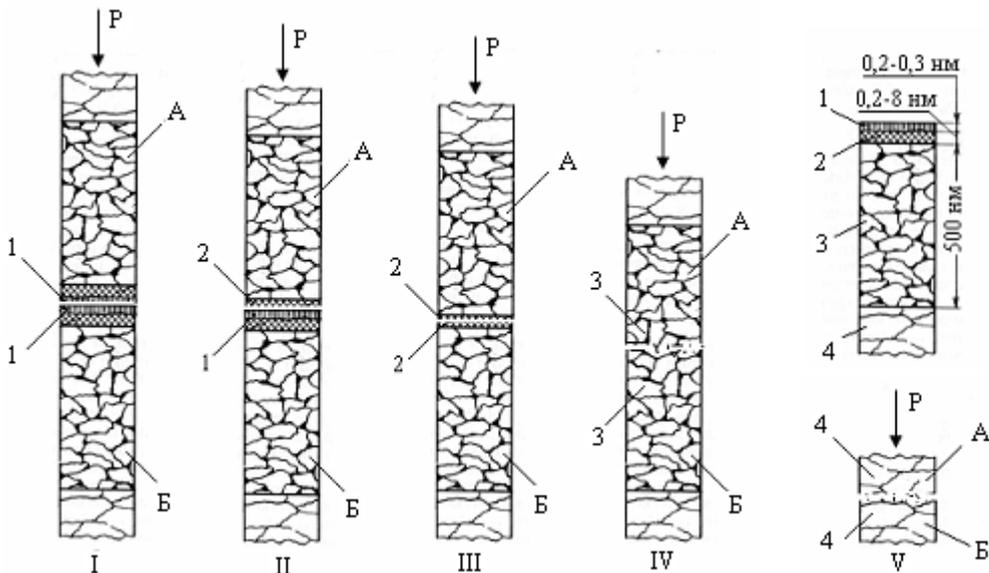


Рис. 3. Модели взаимодействия структур поверхностных слоев роликов: *A* – поверхностный слой неподвижного ролика; *B* – поверхностный слой подвижного ролика; *1* – граничный слой из адсорбированной пленки газов, влаги и смазочного материала; *2* – деформированный, раздробленный слой окислов, пустот, надрывов и трещин; *3* – слой из зерен, деформированных тангенциальными силами при шлифовании; *4* – металл с исходной структурой; (I-V) – стадии изнашивания поверхностных слоев материала роликов

При этом выделенные участки (1–5) (рис. 2) соответствуют стадиям (I–V) изнашивания поверхностных слоев (рис. 3). Таким образом, численные значения коэффициентов трения (таблица) могут определять характер трибологического взаимодействия структур сопрягаемых поверхностей, т.е. переход с граничной смазки на их ювенильный контакт. При этом возможно свидетельствовать о моменте начала и полного прекращения функционального действия молекул смазочного материала, в данном случае индустриального масла И-20А. Так, для взаимодействия граничных слоев из адсорбированных пленок газов и влаги коэффициент трения составляет 0,17 (1 участок). Для взаимодействия адсорбированных пленок газов и влаги вращающегося ролика с деформированным слоем окислов неподвижного ролика (II стадия), коэффициент трения составляет 0,5, а для взаимодействия металлов с исходной структурой коэффициент трения 0,44. Причем на V-й стадии длительность нормального процесса трения значительно превышает продолжительность предыдущих стадий.

Ступенчатое изменение нагружения контакта, проведенное на втором этапе, при частоте вращения нижнего ролика 1000 мин^{-1} и подаче масла позволило определить гранично-допустимое значение нормальной силы, которое составило $P = 165 \text{ Н}$. Увеличение нагрузки свыше 165 Н приводило к резкому нарушению смазочной способности масла, на поверхности вращающегося ролика формировались очаги схватывания. При этом установлено, что об управлении процессом нормального механохимического изнашивания, за счет увеличения количества подаваемого масла, в условиях граничного трения, не может быть и речи. При радиусах роликов $r_{1,2} = 0,025 \text{ м}$, коэффициенте Пуассона $\mu_{1,2} = 0,3$, модуле упругости стали $E_{1,2} = 210 \text{ ГПа}$, полуширине линии контакта $a = 0,0365 \text{ мм}$ начальное расчетное давление по Герцу составило $p = 359 \text{ МПа}$. По окончании испытаний расчетное давление в зоне трения с учетом геометрических размеров изношенной поверхности неподвижного ролика составляло 6,9 МПа, 10,3 МПа, 20,6 МПа.

При раскрытии контакта на поверхности вращающегося ролика при всех частотных режимах испытаний наблюдалось следующее:

- постоянно присутствующая порция масла в конфузорной области контакта (рис. 1, поз. 2) временно не локализовалась, а сразу растекалась по цилиндрической поверхности;
- изменений масла по цветности не выявлено;
- следов схватывания не выявлено, однако имело место абразивное изнашивание рабочей поверхности со следами износа в виде тонких полос с располагающимися между ними менее изношенными полосами черного цвета.

Зависимости изменения коэффициента трения при граничной смазке, отображающие характер поведения формируемых смазочных слоев при соответствующих частотах вращения, приведены на рис. 4.

При испытании на частотах вращения 500^{-1} , 1000 мин^{-1} и установившемся локальном образовании масла (рис. 1 поз. 2) при введении в область зоны трения капель масла имело место удаление его мелких порций в виде брызг. Это свидетельствовало о том, что сформировавшаяся трибологическая система становилась закрытой, и способной функционировать при соответствующем запасе масла. Как показывают результаты, это происходило гарантированно в течение 18 мин. При этом значения коэффициента трения оставались стабильно постоянными 0,1–0,12 (рис. 4, а, в) уже со второй минуты испытаний.

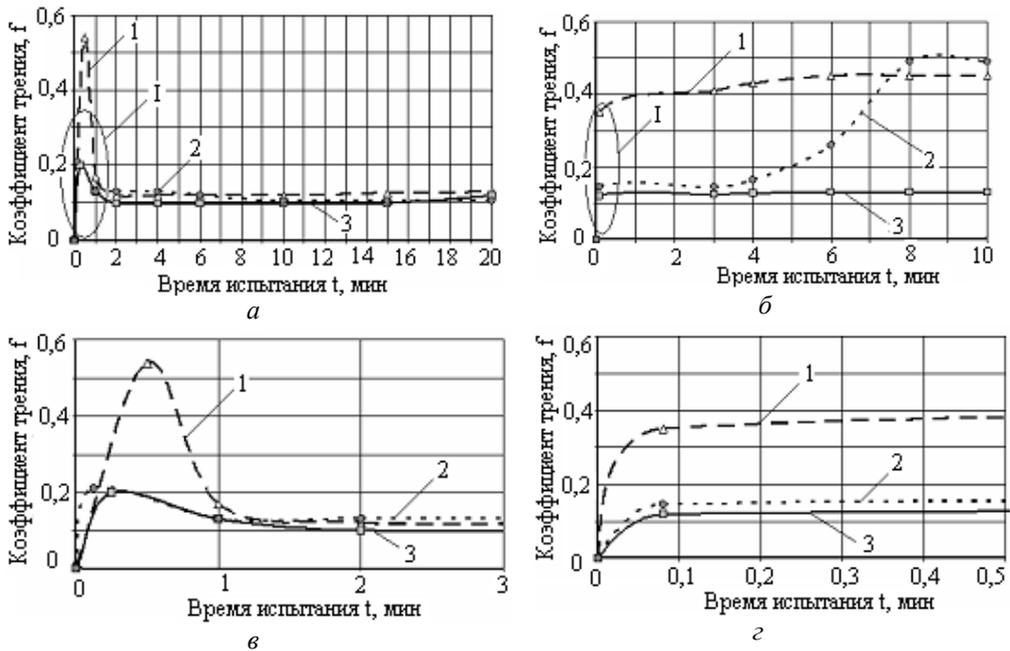


Рис. 4. Изменения коэффициента трения при проявлении свойств смазочных слоев: *a* – при смазывании зоны контакта; *б* – после вытирания поверхностей; *в* – увеличенный по времени фрагмент I (*a*); *г* – увеличенный по времени фрагмент I (*б*);
 1 – $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$, $Ra_{3,3} = 0,32 \text{ мкм}$; 2 – $n = 500 \text{ мин}^{-1}$, $Ra_{2,2} = 0,16 \text{ мкм}$;
 3 – $n = 300 \text{ мин}^{-1}$, $Ra_{1,1} = 0,08 \text{ мкм}$

Из полученных зависимостей (рис.4, *a*, *в*) следует, что начальная шероховатость поверхностей оказывает влияние на сопротивление вращению при страгивании ролика. При этом максимальный коэффициент трения 0,54 соответствует максимальной шероховатости 0,32 мкм при пуске с частотой 1000 мин^{-1} , а минимальные 0,20–0,21 для взаимодействующих поверхностей шероховатостью 0,16 мкм и 0,08 мкм при пуске с частотами 500 мин^{-1} и 300 мин^{-1} .

Полученная стабильность коэффициента трения при всех частотных режимах со второй минуты испытаний свидетельствует о том, что на рабочих поверхностях сформировались устойчивые смазочные слои. Исходя из значений давлений в зоне контакта [2] на микронеровностях поверхности сплошно из компонентов масла формируется квазипластичное тело, о чем свидетельствуют визуализируемые темные полосы. Это тело образует слой определенной толщины и обуславливает граничную смазку с коэффициентом трения 0,1–0,12, которая прочно удерживается на поверхности ролика. Поскольку на протяжении всего времени испытаний имела локализация масла в около контактной зоне, то на поверхности тонкого слоя квазипластичного тела присутствовали и менее вязкие тончайшие смазочные слои. Исходя из капиллярности строения металлов [9], компоненты масла также проникают и взаимодействуют с внутренней поверхностью, оставаясь под контактным слоем, образуя тем самым резерв.

Характера изменения коэффициента трения (рис. 4, *б*, *г*) в условиях контактного нагружения сформировавшихся смазочных слоев (после вытирания поверхностей) свидетельствует о следующем. При частоте вращения 300 мин^{-1} функциональная стабильность смазочных слоев гарантированно оставалась стабильной на протяжении 10 мин. Ее разрушение не происходила, о чем свидетельствовало постоянство значения коэффициента трения (0,12–0,13) < 0,44. При частоте вращения

500 мин⁻¹ несколько сниженная функциональная стабильность смазочных слоев оставалась стабильной на протяжении 3,5 мин, коэффициент трения составлял уже (0,14–0,16) < 0,44. Это свидетельствует о том, что в смазочных слоях происходят процессы их частичного разрушения, и начала влияния механической составляющей силы трения. Далее имеет место рост коэффициента трения до 0,5 в течение 4 мин. При этом в течение 3 мин в образовании силы трения принимают участие и молекулы масла, сосредоточенные в капиллярном приповерхностном слое вращающегося ролика, которые под действием центробежных сил выходят в зону трения. При частоте вращения 1000 мин⁻¹ смазочные слои оставались функциональными лишь на протяжении 0,5 с. В этом случае коэффициент трения стремительно растет в течении 6 с до значения 0,35, и далее плавно до 0,45. Здесь также в образовании силы трения принимают участие молекулы масла, действие которых имеет место вплоть до 3 мин., что обуславливалось увеличением центробежной силы с ростом частоты вращения.

Выводы. Проведенные триботехнические испытания позволили установить следующее. Время прирабатываемости масла И-20А при гранично-допустимой нагрузке на линейный контакт поверхностей (сталь 40Х) от параметра шероховатости $Ra = 0,08–0,32$ мкм не зависит, и составляет 2 мин. При этом формируются слои граничной смазки функционально стабильные в течение 18 мин. в диапазоне частот вращения 300–1000 мин⁻¹, коэффициент трения 0,1–0,12. В отсутствие подпитки зоны контакта функциональная стабильность сформированных смазочных слоев уменьшается с ростом частоты вращения. Максимальное время (по условиям эксперимента) сохранения смазочных свойств – 10 мин соответствует частоте вращения 300 мин⁻¹, коэффициент трения 0,12–0,13.

Предложенная методика триботехнических испытаний и оценки результатов может использоваться для последующего исследования трибологического состояния смазочных слоев при моделировании контактного взаимодействия поверхностей в трибологических системах с использованием иных материалов.

Список литературы

1. Смазочные материалы: Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: Справочник / Р.М. Матвеевский, В.Л. Лашхи, И.А. Буяновский и др.– М.: Машиностроение, 1989. – 224 с.
2. Сагин С.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей / С.В. Сагин, Ю.В. Заболотный // Проблемы тертя. – 2012. – №4. – С.68–81
3. Трофімов І.Л. Моделювання впливу електричного поля на протизносні властивості мастильних матеріалів / І.Л. Трофімов // Проблеми тертя та зношування. – 2013. – Вип. 59. – С.89–92.
4. Мельник В.Б. Метод оцінки складових змашувального шару в локальному контактi зубчатих передач / В.Б. Мельник // Проблеми тертя та зношування. – 2012. – Вип.58. – С.165–168.
5. Савчук А.М. Кінетика зміни характеристик мастильного матеріалу в умовах недостатнього мащення / А.М. Савчук // Проблеми трибології. – 2012. – №4. – С.127–129.
6. Гедзюк Т.В. Аналіз процесів самоорганізації в умовах граничного тертя / Г.В. Гедзюк // Проблеми трибології. – 2011. – №4. – С.72–75.
7. Кубич В.И. Коэффициент трения триад «45ХН2МФА–Lukoil–Super–АО20–1», «12Х2Н4–Lukoil–Super–АО20–1» в условиях ступенчатого нагружения / В.И. Кубич // Проблемы тертя та зношування.– №61(2). – 2013.– С.37–45.
8. Трибологія: підр. / М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, М.І. Пашечко, Є.В. Корбут. – К.: Вид-во Нац. Авіац. Ун-ту «НАУ»–друк. –2009. –392 с.
9. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения / А.С.Ахматов // – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.

Статья поступила в редакцию 12.02.2014

В. І. КУБІЧ

**ПОВЕДІНКА ЗМАЩУВАЛЬНИХ ШАРІВ В ТРИБОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ
«40X–(I–20A)–40X» ПРИ ГРАНИЧНО-ПРИПУСТИМОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

Наведено результати триботехнічних випробувань матеріалів трибологічної системи «40X–(I–20A)–40X», які проведені на зразках по схемі тертя «ролик-ролик», в умовах зміни швидкісного режиму взаємодії поверхонь з різною початковою шорсткістю при гранично-допустимому навантаженні. Отримані результати дозволили визначити умови і час ефективної дії змащувальних шарів, що сформувалися, у відсутності підпитки зони контакту поверхонь тертя компонентами масла I-20A.

Ключові слова: коефіцієнт тертя, час, поверхня, ролик, змащувальний шар, випробування

V. I. KUBICH

**BEHAVIOR OF LAYERS IN LUBRICANTS TRIBOLOGICAL SYSTEM
«40X–(I–20A)–40X» WITH BOUNDARY PERMISSIBLE LOAD**

The results of tribological testing of materials tribological system «40X–(I–20A)–40X» conducted on samples of the scheme friction «movie clip» change in the conditions of high-speed mode of interaction with the surface roughness at different initial boundary- load capacity. The results allowed to determine the conditions and time effective action lubricating layer formed in the absence of recharge zone of contact surfaces of friction components of oil -20A . Found that in the absence of feeding nip formed by the functional stability of lubricating layers decreases with increasing speed . The technique of tribological tests and evaluation of results, which can be used for further study tribological state lubricating layers in the modeling of contact interaction surfaces in tribological systems using other materials .

Keywords: friction factor, time, surface, roller, lubricant layer, test

Кубич Вадим Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедри автомобилей, Запорозький національний технічний університет, Україна, reibung1@mail.ru.