

УДК 621.891

## ЗНОСОТРИВКІСТЬ СТАЛІ 30ХГСА В УМОВАХ КОЧЕННЯ З ПРОКОВЗУВАННЯМ

О. О. МІКОСЯНЧИК, Р. Г. МНАЦАКАНОВ, Л. А. ЛОПАТА,  
В. С. МАРЧУК, О. Є. ЯКОБЧУК

*Національний авіаційний університет, Київ*

Визначено закономірності зміни зносотривкості трибоелементів, виготовлених зі сталі 30ХГСА, в екстремальних умовах тертя залежно від моменту тертя, питомої роботи тертя і товщини мастильного шару під час змащування контактних поверхонь мінеральним (Ера ВНПП-286М) та синтетичним (Aero Shell Grease 33) літєвими мастилами. Встановлено залежність між трибологічними характеристиками контакту і терміном напрацювання контактних поверхонь до перших ознак схоплювання. Як критерій поверхневої міцності за тертя обрано кінетику зміни інтенсивності тепловиділення в контакті з урахуванням потужності і питомої роботи тертя. Проаналізовано здатність трибосистеми до відновлення метастабільних структур у критичних режимах тертя, коли питома робота процесу зростає, однак, набуває мінімальні значення в періоди схоплювання контактних поверхонь.

**Ключові слова:** зносотривкість, момент тертя, робота тертя, інтенсивність тепловиділення, товщина межових шарів.

**Вступ.** Через велику кількість фізико-хімічних процесів, що протікають на контактних поверхнях під час тертя, складно проаналізувати зношування елементів трибоспряжень. За переходу трибосистеми в критичні режими роботи (підвищені навантаження, високі швидкості ковзання, нестационарні умови роботи – режим пуск–зупинка) виникає ймовірність порушення цілісності мастильного шару. Зношування може посилюватись внаслідок руйнування мастильної плівки та втрати змащувальної здатності трибоелементів [1]. Достатньо частою причиною відмови відповідальних пар тертя з локальним контактом є припинення підживлення зони тертя змащувальним матеріалом, тобто мастильне голодування. В таких умовах суттєво порушується тепловідвід із зони тертя, в контакті виникають локальні ділянки з різким підвищенням температури. Таким чином, знос трибоелементів та теплові явища, пов'язані з ним, зумовлені фізичними процесами у зоні їх контакту.

Кінетику зміни робочих триботехнічних параметрів поверхонь контакту трибоспряжень визначають механізми порушення роботоздатності змащувальних шарів у локальних контактах, фізико-хімічна природа цих шарів, режим мащення, динамічні зміни на межі метал–мастильний матеріал [2, 3]. Лінійну кореляцію між зносом і розсіяною енергією встановили раніше [4, 5]. Крім того, кількісний показник дисипації енергії можна розглядати як параметр зміни механічних та структурних властивостей контактуючих тіл.

Щоб досягти максимальної зносотривкості за структурної пристосованості елементів трибоспряжень, необхідно зменшити активацію поверхневих шарів металу, знизити роботу тертя, регулювати пасивацію та керувати температурою [6].

Тому важливо вивчити залежність зносотривкості трибоелементів від тепловиділення в триботехнічному контакті в екстремальних умовах роботи трибосистеми.

Щоб оцінити залежність зносотривкості від триботехнічних характеристик контактних поверхонь трибоелементів у нестационарних умовах тертя, слід визначити діапазон роботоздатності матеріалів контактних поверхонь трибоелементів і мастильного матеріалу під час експлуатації за динамічного навантаження.

Мета дослідження – оцінити інтенсивність зношування контактних поверхонь трибоелементів, виготовлених зі сталі 30ХГСА, та термін їх напрацювання до перших ознак схоплювання залежно від триботехнічних параметрів контакту в нестационарних умовах мащення.

**Матеріали та методи.** Зносотривкість та триботехнічні параметри пар тертя вивчали на установці СМЦ-2. Момент тертя, частоту обертів роликів, температуру мастильного матеріалу, його товщину, яку вимірювали методом падіння напруги в режимі тліючого розряду, записували і обробляли на персональному комп'ютері в реальному часі з графічним відображенням їх змін у кожному циклі напрацювання. Випробовували в нестационарних умовах мащення в режимі пуск (4s)–стаціонарна робота (7s)–гальмування (3s)–зупинка (3s). Досліджували за схемою ролик–ролик у режимі кочення з 20% проковзуванням. Максимальна частота обертання для випереджувальної поверхні становила 800 rot/min. В експериментах до режиму мастильного голодування переходили після відповідного припрацювання контактних поверхонь, показником якого є стабілізація параметрів тертя – товщини змащувального шару, моменту тертя, температури змащувального матеріалу та роботи тертя. Режим мастильного голодування встановлювали шляхом повного видалення змащувального матеріалу як з доріжки тертя, так і зі зон, що безпосередньо контактували з нею.

Як зразки використовували ролики ( $d = 50 \text{ mm}$ ) з легованої конструкційної сталі 30ХГСА (HRC 35,  $R_a = 0,32 \text{ }\mu\text{m}$ ). Як змащувальні матеріали – літєві авіаційні мастила Aero Shell Grease 33 (синтетичне) і Ера ВНІНП-286М (мінеральне). Контактне навантаження становило 400 МПа.

**Результати та їх обговорення.** Виявили (рис. 1) кінетику зміни пускового моменту тертя  $M(t)$  та початкової товщини шару  $h(t)$  з мастил Aero Shell Grease 33 і Ера ВНІНП-286М під час розвитку мастильного голодування до заїдання. Зміна цих параметрів супроводжувалась нестабільним процесом, що проявлялося в періодичному коливанні їх значень.

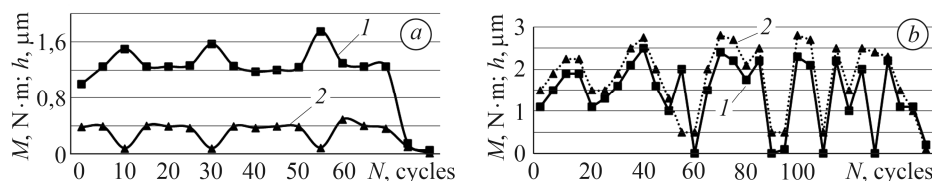


Рис. 1. Кінетика зміни пускового моменту тертя  $M(t)$  (криві 1) і початкової товщини мастильного шару  $h(t)$  (криві 2) у період розвитку мастильного голодування: а – мастило Ера ВНІНП-286М; б – Aero Shell Grease 33.

Fig. 1. Kinetics of the change of the starting moment of friction  $M(t)$  (curves 1) and the initial thickness of the lubricant layer  $h(t)$  (curves 2) during the development of lubricant starvation: а – Era VNIINP-286M lubricant; б – Aero Shell Grease 33 lubricant.

Для мінерального мастила Ера ВНІНП-286М кількість циклів напрацювання до проявів перших ознак схоплювання контактних поверхонь вдвічі менша, ніж для синтетичного Aero Shell Grease 33. Встановили суттєву відмінність коливальних змін моменту тертя та товщини мастильного шару під час контакту. Якщо зі стрімким зменшенням товщини шару мастила Ера ВНІНП-286М до 0,1... 0,05  $\mu\text{m}$  момент тертя зростає в середньому в 1,2–1,4 рази, то зі збільшенням товщини шару мастила Aero Shell Grease 33 синхронно зменшується в 2,5–5 разів.

Припускали, що ці відмінності обумовлені різною природою сформованих під час тертя межових адсорбційних шарів на активованих контактних поверхнях. Синтетичні компоненти мастила Aero Shell Grease 33 схильніші до полімеризаційних явищ, викликаних механо-хімічними процесами у зоні тертя. Це призводить до формування в контакті мастильної плівки, товщина якої в 2,3–4,8 рази більша, ніж з мастила Ера ВНІІП-286М. Під час руйнування шару з мастила Aero Shell Grease 33, наприклад в 60; 90; 110 циклах (рис. 1b), режим мащення стрімко змінюється з гідродинамічного ( $\lambda = 5$ ) до граничного ( $\lambda = 0,7$ ), а під час руйнування шару з мастила Ера ВНІІП-286М у 10; 30; 55 циклах напрацювання (рис. 1a) – з межового ( $\lambda = 0,8$ ) до напівсухого ( $\lambda = 0,15$ ).

Таким чином, внаслідок руйнування шару, сформованого мастилом Ера ВНІІП-286М, трибосистема переходить у жорсткіші умови тертя, які проявляються в дефіциті змащувального матеріалу, домінувальному впливі твердої фази контактних поверхонь, що призводить до підвищення сили тертя, а отже, зростання пускового моменту тертя. За руйнування шару з мастила Aero Shell Grease 33 відбуваються деструкція та дезорієнтація полімеризованих компонентів, що обумовлює зменшення його товщини, але залишається мінімальна товщина до 0,35  $\mu\text{m}$ , яка надійно захищає поверхні тертя. Саме мастильний матеріал забезпечує стабільні умови мащення. Стрімке кореляційне зниження моменту тертя в періоди, коли зменшується товщина мастильного шару, обумовлене падінням в'язкості мастила в результаті механічної та теплової дії в зоні контакту та короткочасним домінуванням гідродинамічних ефектів внаслідок плавлення межових шарів. Аналогічні прояви встановили раніше [7, 8]. На завершальній стадії випробувань, коли схоплювання набуває лавинного характеру, параметри  $M(t)$  і  $h(t)$  різко зменшуються і прагнуть до нуля, причому це відбувається синхронно. Слід відзначити, що на цьому етапі кореляційно знижується і питома робота тертя ( $J_f$ ). Виявили [9, 10], що за нормального функціонування мастила в зоні контакту (під час накопичення пошкоджень) будь-яка аномальна зміна в змащувальному процесі неминує призводити до стрибкоподібного збільшення параметра  $J_f$ . Однак в умовах мастильного голодування на етапі, що передує схоплюванню контактних поверхонь, встановили стрибкоподібне його зменшення (рис. 2).

Рис. 2. Кінетика зміни моменту тертя  $M(t)$  під час пуску (криві 1, 2) і питомої роботи тертя  $J_f$  (криві 1', 2') за мастильного голодування:  
1, 1' – мастило Ера ВНІІП-286М;  
2, 2' – Aero Shell Grease 33.

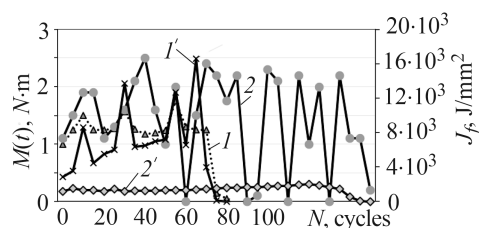


Fig. 2. Kinetics of the change in the friction moment at start-up  $M(t)$  (curves 1, 2) and specific work of friction  $J_f$  (curves 1', 2') during the lubricant starvation process:  
1, 1' – Era VNIINP-286M lubricant; 2, 2' – Aero Shell Grease 33 lubricant.

Під час застосування мастил кількісні та якісні зміни питомої роботи тертя в екстремальних умовах суттєво відрізняються. По-перше, якщо для мастила Ера ВНІІП-286М у періоди стрімкого підвищення пускового моменту тертя кореляційно зростає і питома робота тертя (за напрацювання 10; 30; 55 циклів вона збільшується в середньому в 2–2,3 рази), то для мастила Aero Shell Grease 33 її значення стабільні впродовж усього періоду напрацювання. По-друге, якщо для першого значення питомої роботи тертя в контакті без урахування циклів, коли вона стрімко зростає, зафіксовані в межах 5500...7200  $\text{kJ/mm}^2$ , то для другого вони в 3,6–5 разів нижчі.

Проаналізуємо кінетику зміни інтенсивності тепловиділення в контактi під час використання досліджуваних мастил, яка характеризує потужність тертя [11]:

$$Q_0 = f N_l V_{sl}, \quad (1)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя;  $N_l$  – погонне навантаження;  $V_{sl}$  – швидкість ковзання.

Оскільки погонне навантаження та швидкість ковзання, яка обумовлена проковзуванням контактних поверхонь, ідентичні для цих мастил, то згідно з формулою (1) інтенсивність тепловиділення в контактi залежить тільки від кінетики зміни коефіцієнта тертя. Оскільки він за змащування мастилом Aero Shell Grease 33 в 1,2 рази більший, ніж за змащування мастилом Era VNIINP-286M, то і інтенсивність тепловиділення для синтетичного мастила в 1,2 рази вища, ніж для мінерального (рис. 3).

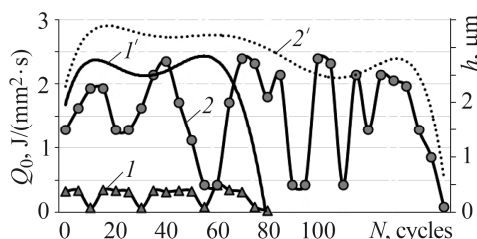


Рис. 3. Зміна товщини мастильного шару (криві 1, 2) та інтенсивності тепловиділення в контактi (криві 1', 2') під час мастильного голодування:

1, 1' – мастило Era VNIINP-286M;  
2, 2' – Aero Shell Grease 33.

Fig. 3. The change in thickness of lubricating layer (curves 1, 2) and the intensity of the heat release in the contact (curves 1', 2') during the lubricant starvation process:  
1, 1' – Era VNIINP-286M lubricant; 2, 2' – Aero Shell Grease 33 lubricant.

Однак за інтенсивністю тепловиділення не повністю вдається відтворити суть термічних процесів у контактi. Якщо ґрунтуватися на кінетиці її зміни для обох мастил, то структурно-термічна активація контактних поверхонь і мастильного матеріалу має бути ідентична. Одержані ж експериментальні дані свідчать про суттєві відмінності структурної пристосованості мастил та матеріалу контактних поверхонь. Зокрема, полімеризаційні характеристики мастила, товщина мастильного шару, період напрацювання до перших ознак схоплювання. Вони суттєво більші під час застосування мастила Aero Shell Grease 33, ніж Era VNIINP-286M. Оскільки основною частиною енергії структурної та термічної активації є теплота, то і відмінність в інтенсивності тепловиділення ( $Q_0$ ) має бути суттєвіша. Вона не корелює з експериментально встановленою питомою роботою тертя в контактi ( $J_f$ ): значення  $Q_0$  в 1,2 рази більші, а  $J_f$  – в 3,6–5 рази нижчі за використання мастила Aero Shell Grease 33.

Вважають [11], що одним з головних регуляторів поверхневої міцності матеріалів під час тертя є теплота. До граничних критичних значень температури зони тертя вона активує корисні процеси, що забезпечують структурну пристосованість та нормалізують тертя. Вище цих значень призводить до деструкційних процесів у зоні (десорбції мастильного матеріалу, руйнування метастабільних вторинних структур тощо) та обумовлює переходи до недопустимих явищ руйнування.

Умовою виникнення заїдання є критична температура в зоні контакту [12]:

$$t_{\Sigma cr} \geq t_0 + \vartheta = t_0 + 0,83 \frac{Q_0}{\left(\sqrt{\lambda_1 \rho_1 c_1 V_{k1}} + \sqrt{\lambda_2 \rho_2 c_2 V_{k2}}\right) \sqrt{b}}, \quad (2)$$

де  $t_0$  – температура поверхонь до входу в зону контакту;  $\vartheta$  – температура спалаху, тобто миттєве підвищення температури під час заїдання;  $Q_0$  – потужність тертя;  $\lambda_{1,2}$  – коефіцієнт теплопровідності;  $\rho_{1,2}$  – питома маса;  $c_{1,2}$  – питома тепло-

ність випереджальної (1) і відставальної (2) поверхонь;  $b$  – напівширина площадки контакту за Герцом.

Отже, найвідчутніше на миттєве підвищення температури в зоні контакту в критичних умовах мащення впливає потужність тертя  $Q_0$ . Однак миттєвий приріст температури, незалежно від типу мастила, незначний і становить  $5 \dots 10^\circ\text{C}$ . Таким чином,  $t_{\Sigma \text{cr}} \ll t_0 + \vartheta$ , що не є передумовою до схоплювання поверхонь.

Експериментально ж встановили, що перші ознаки схоплювання в умовах переходу трибосистеми до мастильного голодування проявляються на 80 та 150 циклах напрацювань за змащування мастилами Era ВНІНП-286М та Aero Shell Grease 33 відповідно.

Зазначимо, що формули (1) та (2) не враховують мастильний матеріал, сумарну швидкість кочення контактних поверхонь, тобто чинники, які також суттєво змінюють динаміку теплових процесів у трибологічному контакті.

Якщо за основу взяти кінетику зміни питомої роботи тертя  $J_f$ , то логічним є пояснення трибологічних процесів у контакті, які викликають схоплювання пар тертя. Під час використання мінерального мастила Era ВНІНП-286М питома робота тертя в умовах мастильного голодування становитиме  $5500 \dots 7200 \text{ kJ/mm}^2$ , що обумовлено домінуванням у контакті переважно граничного режиму мащення. З підвищенням енергонавантаженості контакту порушується структурна пристосованість, що проявляється в деструкції межового змащувального шару, переході трибосистеми в напівсухий режим мащення. Саме в періоди руйнування мастильної плівки питома робота тертя в контакті зростає до  $12000 \dots 16000 \text{ J/mm}^2$ . Після 75 циклу напрацювання унеможлиблюється відновлення метастабільних структур, товщина мастильного шару, момент тертя та питома робота тертя прагнуть до мінімальних значень, що призводить до схоплювання контактних поверхонь.

Під час використання мастила Aero Shell Grease 33 питома робота тертя в умовах мастильного голодування знаходиться в межах  $1200 \dots 2000 \text{ J/mm}^2$ . Значно знизити енергонавантаженисть контакту можна мастилом, яке обумовлює гідродинамічний режим мащення. Незважаючи на періодичне стрімке зменшення товщини мастильного шару до  $0,4 \text{ }\mu\text{m}$  і перехід трибосистеми в граничний режим мащення, підвищення питомої роботи тертя не зафіксували, оскільки повної деструкції межової плівки не було. Однак після 140 циклу напрацювання в умовах мастильного голодування товщина мастильного шару, момент тертя та питома робота тертя прагнуть до мінімальних значень, що призводить до схоплювання поверхонь. Це пов'язано з явищами, які обумовлюють кумулятивне накопичення пошкоджень під циклічним навантаженням та призводять до досягнення енергії активації руйнування граничних значень.

Встановили кореляційний зв'язок між питомою роботою тертя та інтенсивністю зношування контактних поверхонь. Вищі значення питомої роботи тертя, характерні під час змащування мастилом Era ВНІНП-286М, свідчать про інтенсифікацію деструктивних процесів у контакті, що посилюють зношування контактних поверхонь (рис. 4). Інтенсивність зношування визначали за прояву перших ознак схоплювання елементів трибоспряження. Оскільки їх фіксували за різних циклів напрацювання (для Era ВНІНП-286М і Aero Shell Grease 33 відповідно 80 та 150 циклів), то шлях тертя контактних поверхонь суттєво відрізнявся (для випереджальної поверхні 1176 та 2205 м, для відставальної 937 та 1758 м за змащування мастилами Era ВНІНП-286М і Aero Shell Grease 33 відповідно). Тому наведені показники лише якісно характеризують процес.

Оскільки зносотривкість пар тертя визначають за величиною, оберненою до інтенсивності зношування, то для випереджальної поверхні вона становить

$5,58 \cdot 10^8$  та  $1,47 \cdot 10^9$ , а для відставальної –  $2,68 \cdot 10^8$  та  $9,25 \cdot 10^8$  відповідно під час змащування мастилами Ера ВНІІНП-286М та Aero Shell Grease 33.

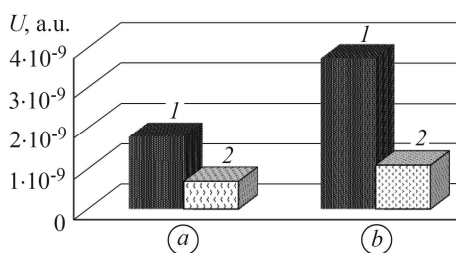


Рис. 4. Інтенсивність зношування ( $U$ ) контактних поверхонь за змащування пар тертя мастилами Ера ВНІІНП-286М (1) та Aero Shell Grease 33 (2):  
*a* – випереджальна поверхня;  
*b* – відставальна.

Fig. 4. The intensity of wear ( $U$ ) of contact surfaces under lubrication of pairs friction with lubricants Era VNIINP-286M (1) and Aero Shell Grease 33 (2):  
*a* – advance surface; *b* – falling behind.

Як відомо [11], питома робота поверхневого руйнування ( $J_c$ ) змінюється в два етапи: за нормального зношування може значно зростати та знаходитися в межах  $5000 \dots 75000 \text{ kJ/mm}^3$ ; руйнування ж внаслідок схоплювання відбувається за стрімкого її зниження до  $10 \text{ kJ/mm}^3$ . У виконаних експериментах також встановили аналогічну закономірність: незалежно від типу мастила трибосистема відновлює метастабільні структури в критичних режимах тертя за зростання питомої роботи тертя в контакті, однак, вона набуває мінімальні значення в періоди схоплювання поверхонь.

Отже, схоплювання контактних поверхонь відбувається тоді, коли поверхневий об'єм металу поглинає певну частину граничної енергії, що інтенсифікує їх руйнування.

#### ВИСНОВКИ

Підвищити зносотривкість трибоеlementів, виготовлених зі сталі 30ХГСА, можна, застосовуючи синтетичне мастило Aero Shell Grease, яке проти мінерального ВНІІНП-286М сприяє формуванню в контакті мастильної плівки, товщина якої в 2,3–4,8 рази більша, що забезпечує домінування граничного режиму мащення, зниження моменту тертя та питомої роботи тертя, а отже, збільшення вдвічі терміну напрацювання контактних поверхонь до перших ознак схоплювання в екстремальних умовах роботи елементів трибоспряження. Встановлено кореляційний зв'язок між питомою роботою тертя та інтенсивністю зношування контактних поверхонь: підвищення питомої роботи тертя під час змащування елементів трибоспряжень мастилом Ера ВНІІНП-286М свідчить про інтенсифікацію деструктивних процесів у контакті, що посилюють зношування випереджальної та відставальної поверхонь в умовах кочення з проковзуванням, порівняно зі змащенням мастилом Aero Shell Grease 33.

**РЕЗЮМЕ.** Определены закономерности изменения износостойкости трибозлементов, изготовленных из стали 30ХГСА, в экстремальных условиях трения в зависимости от момента трения, удельной работы трения и толщины смазочного слоя при смазывании контактных поверхностей минеральной (Эра ВНИИНП-286М) и синтетической (Aero Shell Grease 33) литиевыми смазками. Установлена зависимость между трибологическими характеристиками контакта и сроком наработки контактных поверхностей до первых признаков схватывания. В качестве критерия поверхностной прочности при трении выбрана кинетика изменения интенсивности тепловыделения в контакте с учетом мощности и удельной работы трения. Проанализирована способность трибосистемы к восстановлению метастабильных структур в критических режимах трения, когда удельная работа трения в контакте возрастает, но принимает минимальные значения в периоды схватывания контактных поверхностей.

*SUMMARY.* The patterns of wear resistance of tribo-elements made of 30XГСА steel are determined under extreme friction conditions, depending on the friction moment, specific friction work and thickness of the lubricating layer when lubricating the contact surfaces with mineral (Era VNIINP-286M) and synthetic (Aero Shell Grease 33) lithium lubricants. The dependence is established between the tribological characteristics of the contact and operating time of the contact surfaces to the first signs of setting. The kinetics of the change in the intensity of heat release in contact with the friction power and the specific friction work is chosen as a criterion to assess surface strength in friction. The ability of the tribosystem to restore metastable structures in critical modes of friction is analyzed. It is characterized by an increase in the specific friction work in contact, however the index assumed the minimum values during the contact surfaces setting.

1. *Laber S. and Laber A.* Modifying Operating Conditions of the Friction Pair with an Additive Added to the Lubricant While Operating // *Solid State Phenomena*. – 2014. – **220–221**. – P. 230–238.
2. *Zhu Y., Olofsson U., and Chen H.* Friction between wheel and rail: a pin-on-disc study of environmental conditions and iron oxides // *Tribology letters*. – 2013. – **52**, № 2. – P. 327–339.
3. *Zhu Y., Olofsson U., and Persson K.* Investigation of factors influencing wheel–rail adhesion using a mini traction machine // *Wear*. – 2012. – **292–293**. – P. 218–231.
4. *Jahangiri M.* Investigation of the Slipping Wear based on the Rate of Entropy Generation // *J. of Modern Proc. in Manufact. and Production*. – 2014. – **3**, № 1. – P. 47–57.
5. *An energy-based model for the wear of UHMWPE* / R. Colaco, M. P. Gispert, A. P. Serrob, and B. Saramago // *Tribol. Lett.* – 2007. – № 26. – P. 119–124.
6. *Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Шнейдерович Р. М.* Расчет на прочность деталей машин. – М.: ГНТИМЛ, 1959. – 460 с.
7. *Influence of the nature of boundary lubricating layers on adhesion component of friction coefficient under rolling conditions* / O. Mikocyanchyk, R. Mnatsakanov, A. Zaporozhets, and R. Kostynik // *Eastern-European J. Enterprise Techn.* – 2016. – № 4/1 (82). – P. 24–31.
8. *Ляшенко Я. А.* Фазовый переход первого рода между жидкоподобной и твердоподобной структурами граничной смазки // *Журн. техн. физики*. – 2012. – **82**, вып. 1. – С. 19–28.
9. *Крагельский И. В., Виноградова И. Э.* Коэффициенты трения. – М.: Рипол Классик, 2013. – 228 с.
10. *Микосянчик О. А.* Влияние переменного градиента скорости сдвига на реологические и противоизносные свойства контакта в режиме пуск–остановка // *Вісник КрНУ ім. М. Остроградського*. – 2016. – № 3 (98). – Ч. 1. – С. 48–55.
11. *Костецкий Б. И.* Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // *Проблемы трения и изнашивания*. – 1986. – № 6. – С. 287–295.
12. *Blok H.* Seizure-delay method for determining the seizure protection of E. P. lubricants // *SAE J. (Trans.)*. – 1939. – **44**, № 5. – P. 193.

Одержано 23.05.2018