

УДК 621.763:667.637.22

В. П. КАШИЦЬКИЙ, О. Л. САДОВА, О. М. ЛЮШУК

**ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СЕРВОВИТНОЇ ПЛІВКИ У ВИСОКОНАПОВНЕНИХ ПРЕС-КОМПОЗИТАХ**

Перспективним напрямком в сучасному трибоматеріалознавстві є розробка полімеркомпозитів, здатних до ініціювання процесів самоорганізації під час експлуатації, що призводить до формування в поверхневих шарах трибоконтакту нових стійких структур. Тому основну увагу акцентовано на особливостях виникнення ефекту вибіркового перенесення в епоксикомпозитах, наповнених порошками на основі міді та базальтовим волокном. Проаналізовано результати експериментальних досліджень та вибрано оптимальний склад епоксикомпозиту, за якого формується мідна плівка і стабілізується процес фрикційної взаємодії. Проведено хімічний аналіз трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу оптимального складу.

**Ключові слова:** самоорганізація, сервовітна плівка, епоксикомпозитний матеріал, структура, поверхня трибоконтакту, фрикційна взаємодія, зносостійкість.

Перспективным направлением в современном трибоматериаловедении является разработка полимеркомпозитов, способных инициировать процессы самоорганизации во время эксплуатации, что приводит к формированию в поверхностных слоях трибоконтакта новых устойчивых структур. Поэтому основное внимание акцентировано на особенностях возникновения эффекта выборочного переноса в эпоксикомпозитах, наполненных порошками на основе меди и базальтовым волокном. Проанализированы результаты экспериментальных исследований и выбран оптимальный состав эпоксикомпозитов при котором формируется медная пленка и стабилизируется процесс фрикционного взаимодействия. Проведен химический анализ трибоповерхности эпоксикомпозитного материала оптимального состава.

**Ключевые слова:** самоорганизация, сервовитная пленка, эпоксикомпозитный материал, структура, поверхность трибоконтакта, фрикционное взаимодействие, износостойкость.

The topical direction is the development of tribotechnical composite materials based on polymer binders, in particular based on epoxy resin, which is characterized by high technology in the forming and adhesion capacity to many materials, that allows to refuse use of liquid lubricants. In this case initiation processes of self-organization, leading to the formation of new stable structures during the operation sliding bearing and contributes to stabilize the frictional parameters is perspective.

The article presented the features of appearance of effect of selective transfer in epoxy composites filled by powders based on copper and basalt fibers. The results of research was analyzed and selected the optimal composition of epoxy composite, at which is formed copper film and stabilized friction process. Conducted the chemical analysis of the friction surface of epoxy composite material optimal composition and determined distribution of chemical elements in the section of epoxy composite material.

**Keywords:** self-organization, serfing-film, epoxy composite material, structure, surface of trybocontact, frictional interaction, wear resistance.

**Вступ.** Сучасний розвиток машинобудівної галузі неможливий без покращення триботехнічних властивостей матеріалів вузлів тертя, що досягається шляхом модифікації структури або за рахунок розробки нових композитних матеріалів триботехнічного призначення. При цьому важливу роль відіграє вибір матриці, структура і властивості якої визначають допустимі режими експлуатації матеріалу вцілому. Застосування полімерів дозволяє значно скоротити витрати дорогих матеріалів та знизити енерговитрати, а композити на основі полімерної матриці мають високі антифрикційні властивості і придатні для експлуатації за середніх навантажень та швидкостей ковзання [1–3].

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Перспективними матеріалами для виготовлення триботехнічних матеріалів є полімеркомпозити, зокрема на основі епоксидних смол, які широко застосовують для виготовлення деталей вузлів тертя, оскільки мають високу адгезію до металів та інших матеріалів, високу механічну міцність, малу усадку і водопоглинання, вібро- і корозійну стійкість, високі електроізоляційні властивості.

Актуальним стає використання самозмашувальних полімер-композитних матеріалів у трибовузлах, де небажане або неможливе зовнішнє підведення мастил. Одним із способів реалізації процесу самозмашування є забезпечення фрикційного вибіркового перенесення, тобто генерація в зоні тертя суцільного або

фрагментарного прошарку, який відділяє поверхні контакту і активно впливає на характер тертя та зношування. Тому дослідження процесів фрикційного переносу та самоорганізації структури поверхневого шару трибоконтакту у вузлах тертя відкриває новий етап у розвитку триботехніки [3, 4].

**Мета та задачі дослідження.** Метою дослідження є розробка оптимального складу епоксикомпозитного матеріалу триботехнічного призначення та визначення умов стабілізації фрикційної взаємодії за рахунок протікання процесів самоорганізації.

Для досягнення даної мети необхідно було вирішити наступні завдання:

1. Розробити склад епоксикомпозитного матеріалу триботехнічного призначення, за якого реалізується ефект вибіркового перенесення.

2. Встановити умови стабілізації триботехнічних характеристик та утворення самоорганізуючих стійких плівок переносу під час фрикційної взаємодії та провести хімічний аналіз трибоповерхні епоксикомпозитів.

**Матеріали та методи дослідження епоксикомпозитних матеріалів триботехнічного призначення.** Як вихідний матеріал використано епоксиднодіанову смолу марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), тверднення якої проведено з використанням поліетиленполіаміну – ПЕПА (ТУ 6-02-594-70), призначеного для структурування епоксидних смол за кімнатної температури [5, 6].

Дослідження зносостійкості проводили на машині тертя СМЦ-2 за схемою “вал–сегмент втулки” в умовах тертя без мастильного середовища. Контртіло виготовлено у формі диска із сталі 45 (ГОСТ 1050-74) діаметром 50 мм з шорсткістю поверхні  $Ra=3,2$ . Масу зразків визначено на аналітичних лабораторних вагах типу ВЛА – 200 з точністю 0,0001 г.

Дослідження макро- та мікроструктури матеріалу проведено на металографічному мікроскопі МИМ-10 ( $\times 100\dots 600$ ). Детальне вивчення ділянок поверхні проведено на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106 И ( $\times 100\dots 1000$ ).

**Результати дослідження епоксикомпозитних матеріалів триботехнічного призначення.** Для забезпечення реалізації ефекту вибіркового перенесення та покращення теплофізичних характеристик матеріалу триботехнічного призначення застосовано порошок оксиду міді, який виконує також армувальну функцію, підвищує твердість та міцність полімерної системи. Експериментально встановлено, що оптимальний вміст порошку оксиду міді знаходиться в межах 50...150 мас. ч., оскільки відбувається підвищення механічних характеристик. За вищого вмісту наповнювача полімерна система є не технологічною.

Використання базальтового волокна дозволяє підвищити температуру експлуатації та хімічну стійкість

композитних матеріалів. Вміст базальтового волокна (2...150 мас. ч.) обґрунтовано показниками адгезійної міцності та межі міцності при стисненні [7, 8].

Негативний вплив механічного та теплового вплив під час фрикційної взаємодії планується компенсувати структурним пристосуванням матеріалу за рахунок введення в систему добавок (табл. 1), які виконують мастильну функцію або ініціюють утворення плівок переносу з низьким опором зсуву [9].

Експериментально встановлено, що найменшу інтенсивність зношування мають епоксикомпозити, наповнені 100 мас. ч. базальтовим волокном та 150 мас. ч. порошком оксиду міді (склад № 5). Це досягається в результаті стабілізації трибовзаємодії за рахунок формування фрагментів мідної плівки на поверхні епоксикомпозиту та перенесенням її на поверхню контртіла. В результаті даного ефекту на поверхнях епоксикомпозитних зразків (рис. 1, а, в, д) та контртіла починають утворюватись фрагменти сервовитної (мідної) плівки, яка характеризується низьким опором зсуву та легко відновлюється в процесі трибовзаємодії [3, 10]. На мікроструктурах трибоповерхонь епоксикомпозитів зафіксовано пористу мідну плівку, після формування якої на трибоповерхні пара тертя композитний матеріал-сталь стає локально парою мідь-мідь.

Таблиця 1 – Склад та зносостійкість прескомпозитів

№ зразка	Матриця	Вміст базальтового волокна, мас. ч.	Вміст CuO, мас. ч.	I <sub>g</sub> , г/м <sup>3</sup>	
				V=2,3 м/с	V=3,6 м/с
1	100 мас. ч. ЕД-20 + 12 мас. ч. ПЕПА	2	50	2,32	6,13
2		2	100	1,87	6,46
3		2	150	1,33	3,82
4		50	150	6,09	10,52
5		100	150	3,02	5,98
6		150	150	6,83	11,65

Обчислено, що найбільша площа фрагментів утворення мідної плівки 32,54 % відповідає епоксикомпозиту складу № 5, а найменша 18,97 % – епоксикомпозиту складу № 4, який містить вдвічі менше базальтового волокна. Для епоксикомпозитного матеріалу складу № 6, площа утворених фрагментів плівки становить 26,57 %.

Аналіз мікроструктур епоксикомпозитів вказує на рівномірний розподіл частинок оксиду міді (24...85 мкм) в епоксикомпозиті (рис. 1, б, г, е). Базальтові волокна в процесі вимішування та формування епоксикомпозитних матеріалів зазнають руйнування, тому мають різну довжину в діапазоні 6...19 мкм.

Наступні дослідження за режиму тертя  $V=2,3$  м/с,  $P=1,5$  МПа проведено для епоксикомпозитів складів № 4, № 5 та № 6, які мають найбільшу площу фрагментів сервовитної плівки. Дослідження епоксикомпозитів даних складів показали підвищену інтенсивність зношування ( $I_g = 7,91$  г/м<sup>3</sup>,  $I_g = 6,34$  г/м<sup>3</sup>,  $I_g = 6,98$  г/м<sup>3</sup>) на початковому проміжку дослідження  $L = 3000$  м (рис. 2). Однак на наступному етапі проведення експерименту ( $L = 6000$  м) зафіксовано різке зниження даної характеристики в 1,3...2 рази. Це можна пояснити протіканням процесів вибіркового перенесення міді з поверхневого шару епокси-

композитного матеріалу на контртіло на початковому етапі досліджень та формуванням сервовитної плівки на останньому.

Для епоксикомпозитів, наповнених базальтовим волокном в кількості 50 мас. ч. (№ 4) та 150 мас. ч. (№ 6), спостерігається незначне підвищення інтенсивності зношування на шостому та дев'ятому кілометрі відповідно, що можна пояснити інтенсифікацією протікання фізико-хімічних процесів пов'язаних із вибіркоким перенесенням та припрацюванням трибовузла. Встановлено, що із збільшенням тривалості досліджень (9000 м, 12000 м, 15000 м) інтенсивність зношування поступово знижується ( $I_g = 2,51$  г/м<sup>3</sup>,  $I_g = 2,43$  г/м<sup>3</sup>,  $I_g = 2,31$  г/м<sup>3</sup> для епоксикомпозитів складів № 4, 5, 6 відповідно), оскільки відбувається формування сервовитної плівки.

Проведено хімічний аналіз трибоповерхні епоксикомпозиту складу № 5 (рис. 3), який має найнижчу інтенсивність зношування та найбільшу площу фрагментів мідної плівки. На трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу вибрано п'ять структурно різних точок. Точки 1 і 3 відповідають включенням оксиду міді, що підтверджується отриманими результатами (табл. 2). В даних точках зафіксовано високий вміст міді, що становить 52,79 % та 50,66 % відповідно. По-

казники значень вмісту кисню є найнижчими серед вибраних точок. Присутність інших елементів можна пояснити частковим перенесенням останніх з іншої структурної одиниці композитного матеріалу під час виготовлення мікрошліфа та взаємодією компонентів із матрицею.

Точка 2 відповідає включенню базальтового волокна, де встановлено присутність таких хімічних елементів, як Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Fe. Отримані значення концентрацій останніх в даній точці та висо-

кий вміст кисню 37,54 % обумовлено хімічним складом базальтових волокон.

Хімічний аналіз точок 4 і 5 найбільше відповідають комплексній взаємодії структурних складових полінаповненої епоксисистеми (епоксидна смола, твердник, оксид міді, базальтове волокно), оскільки містить високу концентрацію вуглецю (34,69 % та 20,07 % відповідно) та кисню (29,11 % та 26,60 відповідно), що характерне для складу даної полімерної матриці. Концентрації решти елементів знаходяться в межах 0,25...14,64 %.

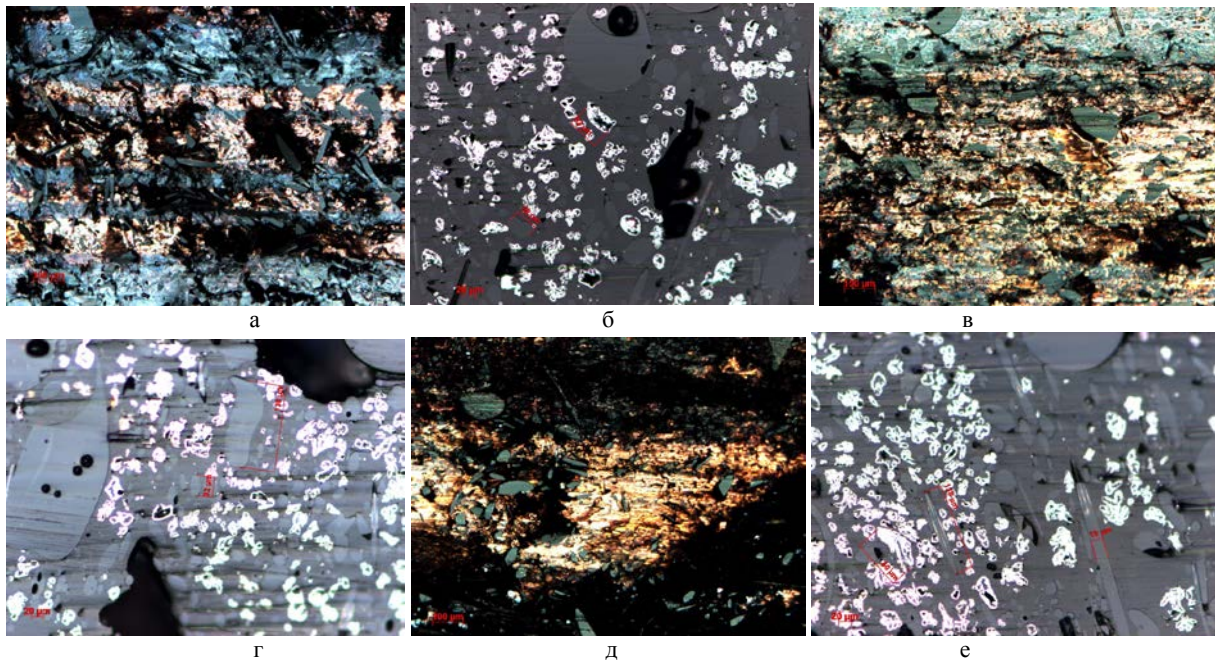


Рис. 1 – Мікроструктури епоксикомпозитних матеріалів: а, б – трибоповерхня та мікроструктура зразка № 4; в, г – трибоповерхня та мікроструктура зразка № 5; д, е – трибоповерхня та мікроструктура зразка № 6

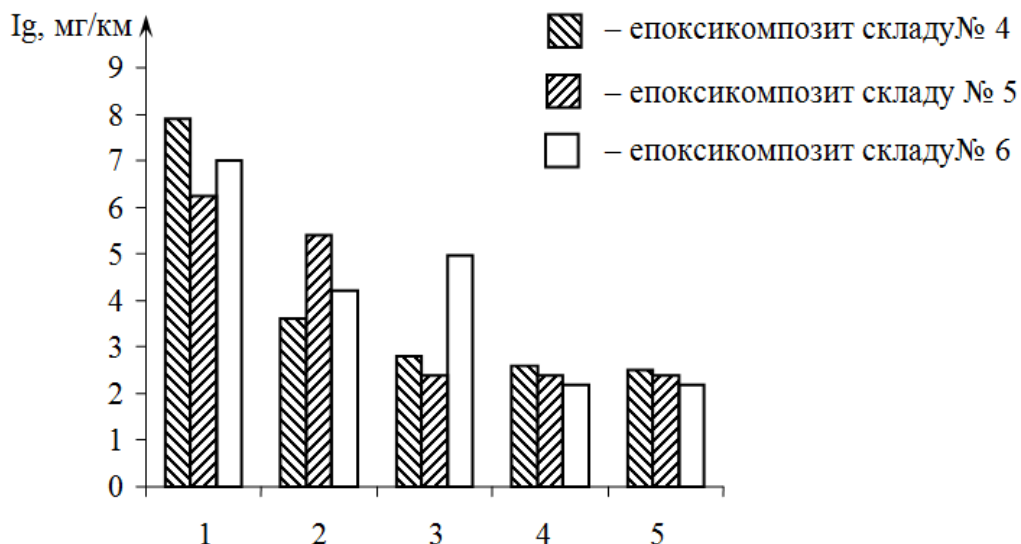
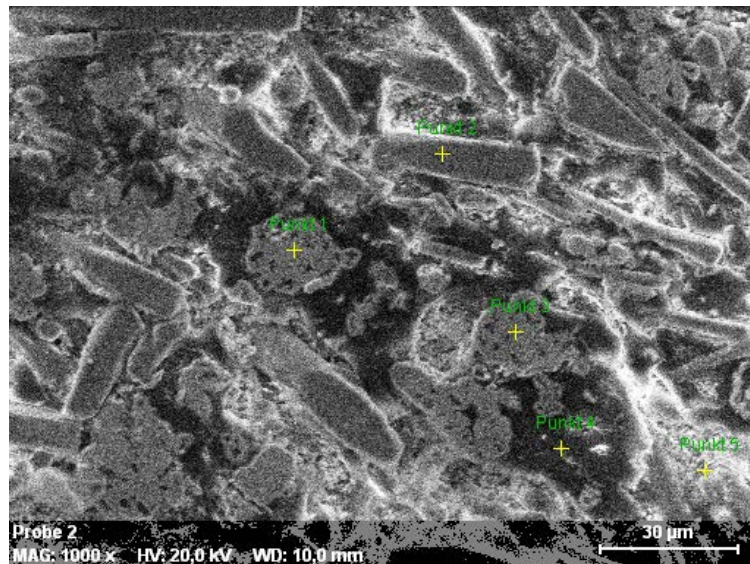
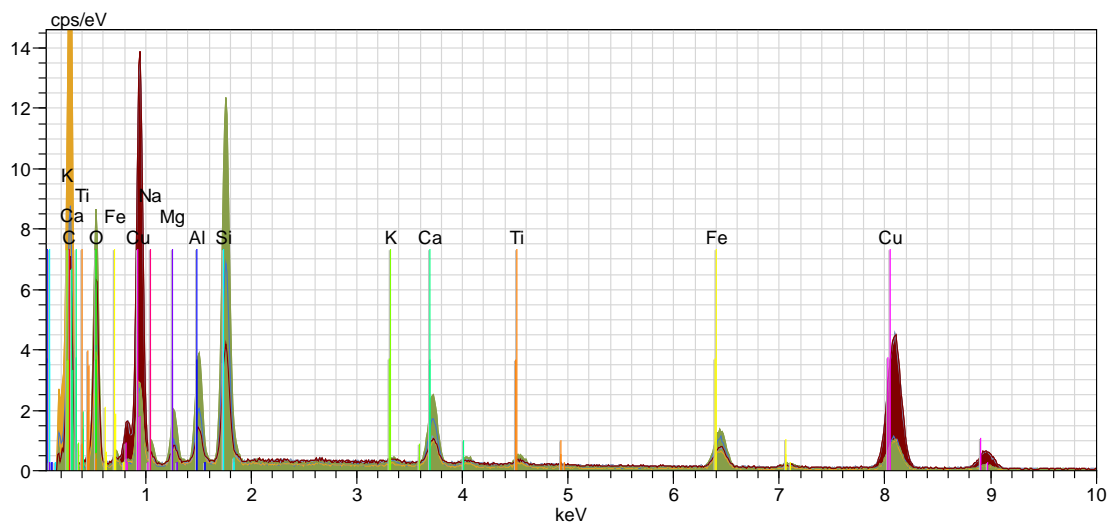


Рис. 2 – Залежність інтенсивності зношування епоксикомпозитів від тривалості фрикційної взаємодії: 1 – 3000 м, 2 – 6000 м, 3 – 9000 м, 4 – 12000 м, 5 – 15000 м



а



б

Рис. 3. Хімічний аналіз трибоповерхні епоксикомпозиту складу № 5: а – мікроструктура; б – хімічний спектр в точці 1

Таблиця 2 – Хімічний склад трибоповерхні епоксикомпозиту складу № 5

Спектр, %	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	Cu
Точка 1	11,38	19,86	0,72	1,13	1,89	6,04	0,30	1,76	0,75	3,37	52,79
Точка 2	13,78	37,54	1,58	2,54	4,56	14,64	0,59	5,07	1,40	7,00	11,32
Точка 3	11,13	18,91	1,40	2,12	2,81	6,87	0,26	1,77	0,65	3,41	50,66
Точка 4	34,69	29,11	1,18	1,61	2,64	6,97	0,25	2,32	0,82	4,49	15,91
Точка 5	20,07	26,60	1,65	1,67	3,71	12,60	0,54	4,56	1,16	9,46	17,98

**Висновки.** В результаті проведених досліджень:

1. Доведено позитивний вплив порошку оксиду міді (CuO) за вмісту (100...150 мас. ч.) на триботехнічні характеристики епоксикомпозитних матеріалів, оскільки відбувається підвищення зносостійкості ( $I = 2,31 \text{ г/м}^3$ ) за рахунок встановлення ефекту вибіркового перенесення. Даний порошок (CuO) забезпечує високу конструкційну міцність матеріалу через достатню твердість частинку та сприяє формуванню на поверхні контакту сервовітної плівки в процесі трибозаємодії.

2. Встановлено, що реалізація режиму вибіркового перенесення знижує інтенсивність зношування епоксикомпозитного матеріалу майже втричі при збільшенні тривалості фрикційної взаємодії ( $L = 3000...15000 \text{ м}$ ),

що дозволяє підвищити надійність і довговічність трибовузлів, які використовують в умовах з обмеженим машенням або за відсутності мастильного середовища.

**Список літератури:**

1. Костронов, А. Г. Триботехническое материаловедение [Текст] / А. Г. Костронов. – Луганск: Ноулджд, 2012. – 700 с.
2. Корбут, С. В. Трибология [Текст] / С. В. Корбут, М. В. Кіндрачук, В. Ф. Лабунець, М. І Пашечко. – Київ: НАУ-друк, 2009. – 391 с.
3. Гаркунов, Д. Н. Триботехника (износ и безызносность) [Текст]: учеб. / Д. Н. Гаркунов. – Москва: МСХА, 2001. – 616 с.
4. Поляков, А. А. Трение на основе самоорганизации [Текст] / А. А. Поляков, Ф. И. Рузанов, А. А. Чичинадзе. – Москва: Наука, 1992. – 133 с.
5. Крыжановский, В. К. Износостойкие реактопласты [Текст] / В. К. Крыжановский. – Ленинград: Химия, 1984. – 120 с.

6. Князев, В. К. Эпоксидные конструкционные материалы в машиностроении [Текст] / В. К. Князев. – Москва: Машиностроение, 1977. – 184 с.
7. Кашицкий, В. П. Розробка захисних покриттів з підвищеною зносостійкістю на основі епоксидних композитів, модифікованих кремнійорганічним лаком КО-921 [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / В. П. Кашицкий. – Луцький національний технічний університет. – Луцьк, 2006. – 151 с.
8. Савчук, П. П. Властивості епоксикремнійорганічних композитів армованих базальтовими волокнами [Текст] / П. П. Савчук, О. А. Отченашенко // Наукові нотатки. – 2006. – № 18. – С. 340–348.
9. Кашицкий, В. П. Дослідження інтенсивності зношування мультнаповнених епоксикомпозитів триботехнічного призначення [Текст]: мат. 4-ої міжн. наук.-практ. конф. / В. П. Кашицкий, П. П. Савчук, О. Л. Садова, О. І. Давидюк // Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування. – Херсон, 2013. – С. 108–110.
10. Денисов, Л. М. Подшипники скольжения с безыносным режимом трения [Текст]: учеб. пос. / Денисов Л. М. – Иркутск: ИПИ, 1982. – 88 с.
2. Korbut, Ye. V., Kindrachuk, M. V., Labunets, V. F., Pashechko, M. I., (2009). Trybolohiia. Kiev: NAU-druk, 391.
3. Garkunov, D. N. (2001). Tribotekhnika (iznos i bezyznosnost'). Moscow: MSHA, 616.
4. Poljakov, A. A., Ruzanov, F. Y. (1992). Trenye na osnove samoorhanyzatsyy. Moscow: Nauka. 133.
5. Kryzhanovskij, V. K. (1984). Iznosostojkie reaktoplasty. Leningrad: Himija, 120.
6. Knjazev, V. K. (1977). Jepoksidnye konstrukcionnye materialy v mashinostroenii. Moscow: Mashinostroenie, 184.
7. Kashytskyi, V. P. (2006). Rozrobka zakhysnykh pokryttiv z pidvyshchenoiu znosostiikistiu na osnovi epoksydnykh kompozytiv, modyfikovanykh kremniiorhanichnym lakom КО-921. Lutsk national technical university, Lutsk, 151.
8. Savchuk, P. P., Otchenashenko, O. A. (2006). Vlastyvosti epoksykremniiorhanichnykh kompozytiv armovanykh bazaltovymy voloknamy. Naukovi notatky, 18, 340–348.
9. Kashytskyi, V. P., Savchuk, P. P., Sadova, O. L., Davydiuk, O. I. (2013). Doslidzhennia intensyvnosti znoshuvannia multynapovnenykh epoksykompozytiv trybotekhnichnoho pryznachennia. Suchasni energetichni ustanovki na transporti, tehnologii ta obladnannja dlja ih obslugovuvannja, 108–110.
10. Denysov, L. M. (1982). Podshipniki skol'zhenija s bezyznosnym rezhimom trenija. Irkutsk: IPI, 88.

**Bibliography (transliterated):**

1. Kostornov, A. G. (2012). Tribotekhnicheskoe materialovedenie. Lugansk: Noulidzh, 700.

*Надійшла (received) 18.02.2016*

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Особливості формування сервовитної плівки у високонаповнених прескомполитах/ В. П. Кашицкий, О. Л. Садова, О. М. Люшук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 7(1179). – С.3–7. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Особенности формирования сервовитной пленки в высоконаполненных прескомполитах/ В. П. Кашицкий, О. Л. Садовая, А. М. Люшук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 7(1179). – С.3–7 – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.**

**The features of formation of serfing-film in the highly filled press composites/ V. Kashytskyi, O. Sadova, O. Lyushuk // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – № 7 (1179). – P. 3–7. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Кашицкий Віталій Павлович** – кандидат технічних наук, Луцький національний технічний університет, доцент кафедри "Матеріалознавства та пластичного формування конструкцій машинобудування"; вул. Львівська, 75, e-mail: [kashickij@ya.ru](mailto:kashickij@ya.ru).

**Садова Оксана Леонідівна** – кандидат технічних наук, Луцький національний технічний університет, асистент кафедри "Матеріалознавства та пластичного формування конструкцій машинобудування"; вул. Львівська, 75, e-mail: [sadova11oksana@gmail.com](mailto:sadova11oksana@gmail.com).

**Люшук Олександр Миколайович** – аспірант, Луцький національний технічний університет, аспірант кафедри "Матеріалознавства та пластичного формування конструкцій машинобудування"; вул. Львівська, 75, e-mail: [oleksandrlyushuk30@gmail.com](mailto:oleksandrlyushuk30@gmail.com).

**Кашицкий Виталий Павлович** – кандидат технических наук, Луцкий национальный технический университет, доцент кафедры "Материаловедения и пластического формирования конструкций машиностроения"; ул. Львовская, 75, e-mail: [kashickij@ya.ru](mailto:kashickij@ya.ru).

**Садовая Оксана Леонидовна** – кандидат технических наук, Луцкий национальный технический университет, ассистент кафедры "Материаловедения и пластического формирования конструкций машиностроения"; ул. Львовская, 75, e-mail: [sadova11oksana@gmail.com](mailto:sadova11oksana@gmail.com).

**Люшук Александр Николаевич** – аспирант, Луцкий национальный технический университет, аспирант кафедры "Материаловедения и пластического формирования конструкций машиностроения"; ул. Львовская, 75.

**Kashytskyi Vitalii** – candidate of technical sciences, associate professor, Lutsk National Technical University; Lvivska st., 75, e-mail: [kashickij@ya.ru](mailto:kashickij@ya.ru)

**Sadova Oksana** – candidate of technical sciences, assistant, Lutsk National Technical University; Lvivska st., 75, e-mail: [sadova11oksana@gmail.com](mailto:sadova11oksana@gmail.com).

**Lyushuk Olexander** – postgraduate student, Lutsk National Technical University; Lvivska st., 75, e-mail: [oleksandrlyushuk30@gmail.com](mailto:oleksandrlyushuk30@gmail.com)