

УДК 620.198

## МІКРОМЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ СТАЛІ 45 ПІСЛЯ ЕЛЕКТРОІСКРОВОЇ ОБРОБКИ

В. М. ГОЛУБЕЦЬ<sup>1</sup>, М. І. ПАШЕЧКО<sup>2</sup>, Я. БОРЦ<sup>2</sup>, М. БАРИЦЬ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний лісотехнічний університет України, Львів;

<sup>2</sup> Люблінський політехнічний інститут, Польща

Проаналізовано основні мікромеханічні характеристики поверхневого шару сталі 45 з електроіскровим покривом, а саме: мікротвердість, мікропластичність (повзучість), модуль Юнга, пружні і релаксаційні властивості, пружність мікродеформації, зміну контактної жорсткості.

**Ключові слова:** електроіскровий покрив, наноідентація, нанодряпання, мікромеханічні характеристики.

**Вступ.** Підвищення надійності і довговічності деталей машин, механізмів, різального інструменту – одне з основних завдань машинобудування. Важливою прикладною задачею при цьому є забезпечення усталених процесів тертя і зношування елементів трибовузлів і стабільність їх функціонування.

Широкого розповсюдження у промисловості набула технологія електроіскрового легування (ЕЛЛ) завдяки переносу на зміцнювану поверхню будь-яких струмопровідних матеріалів, високій міцності і адгезії зміцненого поверхневого шару металу, локальному нанесенні електроіскрового покриву (ЕП) без помітної деформації та відсутності нагрівання оброблюваної поверхні, низькій енергоємності. Важливим під час використання ЕЛЛ є розроблення і освоєння нових електродних матеріалів (сьогодні це переважно тверді сплави титан–кобальт і вольфрам–кобальт, графіт, а в окремих випадках хром, білий чавун тощо). Відновлення розмірів деталей здійснюють також ЕЛЛ в основному електродами з матеріалу близького за фізико-механічними властивостями до матеріалу виробу.

Під час тертя контактуючі поверхні піддаються механічній і тепловій дії, що суттєво впливає як на структурні зміни поверхневого шару, так і на триботехнічні параметри пар тертя. Трибологічну поведінку деталей визначають фізико-механічні властивості поверхневих шарів завтовшки до 0,1 мкм, в яких локалізуються контактні процеси [1]. Під час тертя мікровиступи поверхні зазнають напружень вздовж різних напрямків, які змінюються від стиску та розтягу і пошкоджують поверхню [2]. Опір руйнуванню і характер пошкоджень визначають насамперед механічними характеристиками поверхневих шарів, роботою пружного і пластичного деформування мікровиступів. Ці величини можуть суттєво змінюватися в результаті впливу компонентів середовища [3, 4].

Оцінити мікромеханічні характеристики тонких поверхневих шарів у мікро- і субмікрооб'ємах можна динамічним наноіндентуванням через зняття кінетичних діаграм вдавлювання [5, 6] та скретч-методом [7]. Таким дослідженням присвячені праці з впливу термічної обробки сталі [8], після електролітичного наводнення [9] та наплавлення [10] поверхонь з нанесеними захисними покриттями [11, 12].

Мета роботи – визначити окремі мікромеханічні характеристики поверхневого шару сталі 45 за використання як електродів для ЕІЛ порошкових дротів I (ПД 80X20P3T) і II (комбінованого). Досліджували на мікрошліфах.

**Методика досліджень. Матеріали електрода та режими ЕІЛ.** Комбінований електрод виготовляли із графіту МПГ-7  $\varnothing 6$  mm, в якому просвердлювали внутрішній отвір  $\varnothing 3,2$  mm, куди встановлювали порошок дріт ПД 80X20P3T. Довжина електрода 30 mm.

Оболонка порошкового дроту виготовлена з низьковуглецевої сталі 08кп і заповнена порошковою шихтою на основі феросплавів (табл. 1). Хімічний склад порошкового дроту такий: 20 mass% Cr; 3 В; 1 Ti; 0,8 С; Fe – решта. Серійне виробництво самозахисного порошкового дроту ПП-АН 170 (ПП-Нп-ПД 80X20P3T)  $\varnothing 3,2$  mm здійснює ТОВ “Науково-виробнича фірма “ЕЛНА”, Київ.

**Таблиця 1. Компонентний склад шихти ПП-Нп-ПД 80X20P3T (mass%)**

Компоненти шихти	Fe	Cr	В	Ti
ФХБ-2	50	30	20	–
ФХ100	35	65	–	–
Ти-1	70	–	–	30

ЕІП наносили за допомогою установки для ЕІЛ “Елітрон” виробництва дослідного заводу Інституту прикладної фізики АН Молдови, яка складається із генератора і ручного вібратора, на дев’ятому режимі легування (режим ємності та напруги – 3, ємність батареї накопичення конденсаторів 630 mkF, амплітуда імпульсів накопичувальних конденсаторів 58 V, робочий струм 9 A, частота імпульсів 100 Hz).

ЕІЛ базується на використанні явищ, які супроводжують раптове вивільнення електричної енергії, і характеризується високою температурою каналу іскри та іонізацією міжелектродного простору. В зв’язку з тим, що за цього процесу відбуваються короткі за часом імпульси електричного струму тривалістю  $10^{-3} \dots 10^{-5}$  s, відвід тепла на електродах від місця розряду до оброблюваної поверхні не забезпечується теплопровідністю металу. Тому малі об’єми поверхневих шарів металу піддаються різким коливанням температури – від температури кипіння металу в електродах до температури в декілька десятків градусів [13].

**Наноідентація.** Тест з наноідентації досліджуваних матеріалів виконаний за допомогою Ultra Nano Hardness Tester (UNHT) з використанням алмазного індентора Берковича за кімнатної температури.

Для визначення механічних характеристик поверхневих шарів використовували метод динамічного індентування [5]. Він ґрунтується на автоматичній реєстрації діаграми навантаження  $F = f(h)$ , де  $F$  – навантаження на індентор;  $h$  – глибина його впровадження у поверхню досліджуваного матеріалу (рис. 1). Основна перевага методу полягає в тому, що твердість визначають у момент максимального заглиблення наконечника ( $h_{\max}$ ), тобто до початку пружного відновлення матеріалу. Діаграма дає інформацію про роботу індентора на подолання опору матеріалу  $W_{\text{plast}}$  (1) і роботу матеріалу на відновлення своїх властивостей  $W_{\text{elast}}$  (2). За цими результатами визначають ступінь пластичності поверхні за формулою  $\varepsilon = (W_{\text{plast}} - W_{\text{elast}}) / W_{\text{plast}}$ , а також  $h_r$  з контактної жорсткості  $S$  (3), згідно з формулою  $\varepsilon \cdot (h_{\max} - h_r)$ .

Кінетичні діаграми вдавлювання дають змогу вивчити мікромеханічні характеристики поверхневих шарів матеріалів: мікротвердість, мікропластичність (повзучість), пружні і релаксаційні властивості, зміну контактної жорсткості.

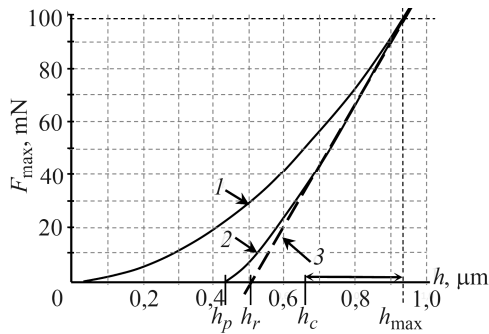


Рис. 1. Діаграма навантаження за динамічного інденування:  $h_c$  – глибина відбитка індентора за  $F_{\max}$ ;  $h_r$  – заглиблення, яке обчислюємо з контактної жорсткості матеріалу (3) та  $h_p$  – яке залишається в покриві після усунення сили  $F$ . 1, 2 – площі під гілками навантаження та розвантаження, відповідно.

Fig. 1. Load profile for dynamic indentation:  $h_c$  – depth of the indenter print at  $F_{\max}$ ;  $h_r$  – dimple, which is calculated from the contact rigidity of the material (3) and  $h_p$  – dimple, remaining at the coating after the removal of force  $F$ . 1, 2 – areas under load profiles and unload respectively.

Основні вдосконалення установки такі: новий наконечник і система референс-фіксації, яку вводять у головку Ultra Indenter Head, і яка використовує активні верхні співвідношення сигналів під час вимірювання за дуже низьких навантажень (менші ніж 0,01 N) та дає можливість вимірювати глибини та навантаження; відсутність температурного ефекту; зворотний зв'язок за петлеподібного контролю навантаження за допомогою контрольної та інденторної системи; низький тепловий дрейф; висока резонансна частота; новий електронний дизайн. Тестували на наноінденіацію за допомогою регулятора навантаження з лінійним режимом, швидкістю навантаження і розвантаження 100 mN/min і тривалістю витримки 20 s. Кожен зразок вимірювали за максимального навантаження 50 mN. Виконали п'ять вимірювань на різних ділянках покриву та обчислили середні значення твердості та модуля Юнга. За допомогою оптичної мікроскопії одержали зображення вибраних відбитків.

Ідентифікований модуль  $H$  обчислили за стандартним співвідношенням

$$H = F_{\max} / A, \quad (1)$$

де  $F_{\max}$  – максимальне випробувальне навантаження;  $A$  – проектована площа контакту.

Модуль пружної деформації  $E^*$  визначаємо за методом Олівера та Фарра [14]

$$E^* = \frac{1}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}}, \quad (2)$$

де  $E_r$  – модуль пружності індентора (1141 GPa для алмаза);  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона для індентора (0,07 для алмаза).

Модуль  $E_r$  розраховуємо так:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi} \cdot S}{2 \cdot \beta \cdot \sqrt{A_p(h_c)}}, \quad (3)$$

де  $\beta$  – геометричний коефіцієнт індентора ( $\beta = 1,034$  для трикутної форми);  $h_c$  – глибина проникнення індентора за  $F_{\max}$ ;  $S$  – контактна жорсткість, виражена похідною за пікового навантаження:

$$S = \left( \frac{dF}{dh} \right)_{\max}. \quad (4)$$

Модуль Юнга  $E_H$  визначаємо із  $E^*$  з використанням коефіцієнта Пуассона ( $\nu_i$ ):

$$E_{IT} = E^* \cdot (1 - \nu_s^2). \quad (5)$$

Типові значення  $\nu_s$  для кераміки 0,1...0,3; металу – 0,2...0,4; полімеру – 0,3...0,4.

Мікромеханічні властивості поверхневих шарів вимірювали згідно з нормами [15].

**Тестування нанодряпанням.** Тестували досліджувані матеріали з використанням пристрою Nan-Scratch Tester (NST) CSM Instruments, який обладнаний стрижнем з наконечником у вигляді сфероконічного алмазного індентора з радіусом 2  $\mu\text{m}$ . Досліджували за кімнатної температури в режимі багаторазового сканування (попереднє сканування – подряпування – після сканування), що дає змогу визначати профіль  $P$ , глибини подряпин  $D_1$  та  $D_2$ . Тестували на дряпання в прогресивному режимі навантаження з такими параметрами: початкове тестове навантаження 0,2 mN, максимальне випробувальне навантаження 20; 25; 50 і 100 mN, швидкість його зміни 2 mN/s, довжина подряпини до 0,8 mm. Навантаження в тестах попереднього сканування та після сканування становило 0,2 mN. Тестові дослідження повторювали щонайменше тричі для кожного зразка, що дає можливість отримати середні значення необхідних параметрів [7].

**Одержані результати досліджень та їх аналіз. Наноідентація.** Досліджували мікромеханічні характеристики ЕП, абсолютні значення яких наведено в табл. 2. Модулі Юнга ( $E_{IT}$ ,  $E_r$ ,  $E^*$ ), повзучість  $C_{IT}$ , твердість  $H_{IT}$  і  $HV_{0,02}$  (табл. 2) для покриттів, отриманих з використанням порошкового дроту II є більші, ніж для покриттів з порошкового дроту I.

**Таблиця 2. Мікромеханічні характеристики ЕП**

Показники Електрод	$H_{IT}$ , GPa	$E_{IT}$	$E_r$	$E^*$	$C_{IT}$ , %	$A_{p,2}$ , $\text{nm}^2$
		GPa				
Порошковий дріт I	18,462	180,95	169,46	198,84	0,86	2708448,20
Порошковий дріт II	24,958	207,86	190,47	228,42	0,97	2003599,44

Продовження табл. 2.

$W_{\text{elast}}$	$W_{\text{plast}}$	$W_{\text{total}}$	$\eta_{IT}$ , %	$P$	$R$	$HV_{0,02}$
pJ						
4169,72	5168,76	9331,48	44,68	0,55	0,45	1709,8
4270,46	4127,42	8397,88	50,85	0,49	0,51	2311,4

Продовження табл. 2.

$F_{\text{max}}$ , mN	$h_{\text{max}}$ , nm	$S$ , mN/nm	$h_c$	$h_r$	$h_p$	$m$	$\epsilon$
			nm				
50	492,69	0,3254	366,71	339,02	319,74	1,13	0,82
50,01	444,232	0,3146	313,23	285,26	267,19	1,11	0,82

Робота сил пружної деформації  $W_{\text{elast}}$ , пружна частина діаграми  $\eta_{IT}$  є більші для покриття, одержаного із порошкового дроту II, а пластичної  $W_{\text{plast}}$  більша для покриття з порошкового дроту I. Коефіцієнт  $P$  ( $P = W_{\text{plast}} / W_{\text{total}}$ ), який характеризує пластичність матеріалу, є більшим для покриття з порошкового дроту I. Коефіцієнт  $R$  ( $R = W_{\text{elast}} / W_{\text{total}}$ ) – питомий внесок релаксаційних процесів на стадії

розвантаження, релаксаційна здатність матеріалу є більшими для покриття з порошкового дроту II.

Мікротвердість за Вікерсом  $HV_{0,02}$  більша для покриття з порошкового дроту II. Контактна жорсткість  $S$ , максимальна глибина проникнення індентора  $h_{\max}$ , глибина відбитка індентора  $h_c$  при  $F_{\max}$ , заглиблення  $h_r$ , яке обчислюємо з контактної жорсткості матеріалу, заглиблення  $h_p$ , яке залишається в матеріалі після усунення сили  $F$ , параметр  $m$  при допасовуванні сили до кривої навантаження є більшими для покриття з порошкового дроту I. Геометрична стала  $\epsilon$  є однаковою для досліджуваних покриттів.

Оскільки є помітна різниця в значеннях мікомеханічних характеристик ЕП, отриманих із порошкових дротів I і II, наведено (рис. 2 і 3) діаграму зміни навантаження і глибини проникнення індентора та кінетичну діаграму неперервного мікродавлювання індентора для покриття з порошкового дроту II.

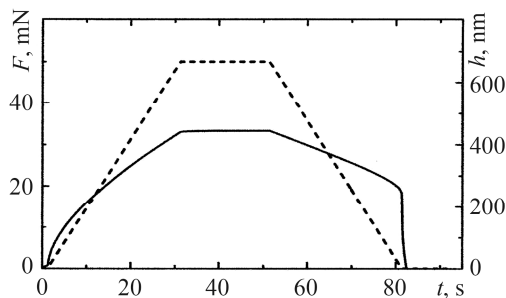


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Діаграма зміни навантаження і глибини проникнення для покриття із порошкового дроту II:  $F$  – штрихова лінія;  $h$  – суцільна.

Fig. 2. Diagram of the change of load and depth of penetration for the powder wire coating II:  $F$  – dashed line;  $h$  – solid line.

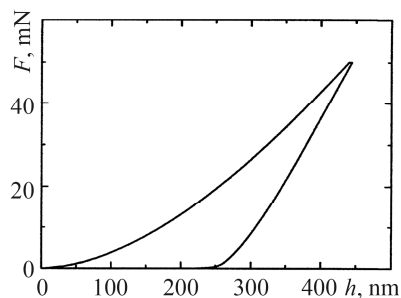


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Кінетична діаграма неперервного мікродавлювання індентора для покриття із порошкового дроту II.

Fig. 3. Kinetic diagram of continuous microindentation of the indenter for the coating from powder wire II.

*Покриття з порошкового дроту I.* Під час навантаження на індентор 25 mN коефіцієнт тертя змінюється в межах 0,7...1,15 (рис. 4a), а за навантаження 50 і 100 mN – 0,75...0,90.

Глибина проникнення індентора за навантаження 25 mN у покритті становить ~900 nm. Відновлена глибина (після зняття навантаження) ~300 nm (довжина індентування до 0,06 mm). Глибина проникнення (900...1400 nm) індентора і відновлена глибина (150...500 nm) в сталі 45 є більші. За навантаження на індентор 50 mN ці величини становлять відповідно ~1600 і ~250 nm, а за навантаження 100 mN – ~750 і ~550 nm. В сталі 45 за навантаження 50 mN глибина проникнення індентора становить 1600...2400, а відновлена до 500...750 nm, а за навантаження 100 mN – 3000...3750 і 1000 nm, відповідно.

*Покриття з порошкового дроту II.* За навантаження на індентор 25 mN коефіцієнт тертя змінюється в межах 0,8...1,0 (рис. 4b), а при 50 і 100 mN змінюється в межах 0,7...0,8 і 0,85...0,92, відповідно.

Глибина проникнення індентора за навантаження 25 mN у покритті становить ~750...1100 nm, а відновлена (після зняття навантаження) ~100...700 nm (довжина індентування до 0,01 mm). Глибина проникнення (1200...1700 nm) індентора і відновлена (750...1200 nm) в сталі 45 більші (рис. 5). За навантаження на інден-

тор 50 mN ці величини становлять відповідно  $\sim 700$  і  $\sim 500$  nm, а за навантаження 100 mN  $\sim 750$  і  $\sim 550$  nm. В сталі 45 за навантаження 50 mN глибина проникнення індентора становить 1500...2500, а відновлена 750...1000 nm, а за навантаження 100 mN – 3000...4500 і 750 nm, відповідно.

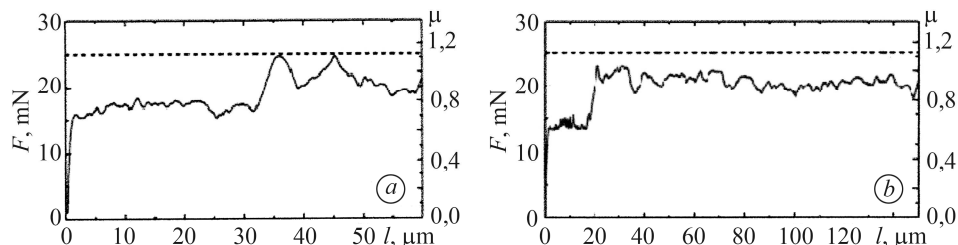


Рис. 4. Скретч-тестування покриття з порошкового дроту I (a) та II (b) за навантаження на індентор  $F_n = 25$  mN:  $F_n$  – штрихова лінія;  $\mu$  – суцільна;  $l$  – довжина нанодряпання.

Fig. 4. Scratch testing for the coating of the powder wire I (a) and II (b) for the load on the indenter  $F_n = 25$  mN:  $F_n$  – dashed line;  $\mu$  – solid line;  $l$  – length of nanoscratch.

Мікροструктура скретч-тестованого покриття показана на рис. 6.

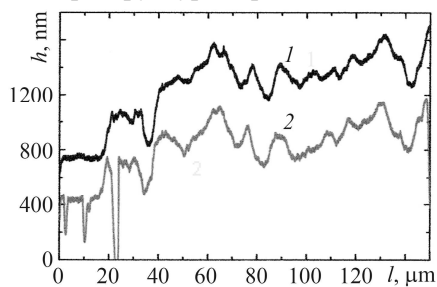


Рис. 5. Fig. 5.

Рис. 5. Глибина проникнення (1) і відновлення (2) за скретч-тестування покриття з порошкового дроту II з навантаженням на індентор 25 mN:  $l$  – довжина нанодряпання.

Fig. 5. Depth of penetration (1) and recovery (2) for scratch testing of the coating II from powder wire for the load on the indenter 25 mN:  $l$  – length of nanoscratch.

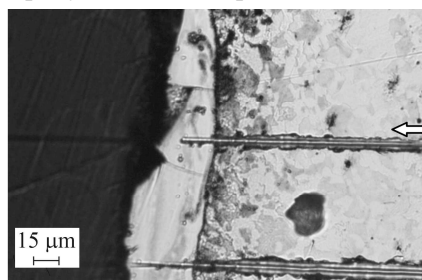


Рис. 6. Fig. 6.

Рис. 6. Мікροструктура скретч-тестованого покриття з порошкового дроту II за навантаження на індентор 25 mN.

Fig. 6. Microstructure of the scratch-tested coating from powder wire II for load on the indenter 25 mN.

## ВИСНОВКИ

Електроіскрове легування сталі 45 з використанням електродів з порошкових дротів за вказаними режимами суттєво змінює інженерію поверхні під час нанесення ЕП. Встановлено помітну різницю між параметрами мікро- і субмікрооб'ємів поверхневого шару ЕП залежно від легування електродом I і комбінованим II; показники з використанням останнього є суттєво більшими. Важливими показниками мікромеханічних характеристик для трибоматеріалознавства при встановленні закономірностей і механізмів трибологічної поведінки ЕП під час тертя і зношування є робота сил пружної  $W_{elast}$  і пластичної  $W_{plast}$  деформації; коефіцієнт  $P$  для пластичності і  $R$  для релаксаційної здатності матеріалу; твердість  $H_{IT}$ ,  $HV_{0,02}$ ; модуль Юнга  $E_{IT}$ , який вказує на підвищення міцності покриття, що призводить до зменшення глибини проникнення індентора під час наноідентації; коефіцієнт тертя  $\mu$ . Окремі числові значення мікромеханічних характеристик можуть бути корисними для розроблення інженерних методів розрахунку міцності, жорсткості, тривкості, напружено-деформованого стану трибоматеріа-

лів для деталей машин, які працюють в умовах контактної взаємодії.

**РЕЗЮМЕ.** Проанализировано основные микромеханические характеристики поверхностного слоя стали 45 с электроискровым покрытием, а именно: микротвердость, микропластичность (ползучесть), модуль Юнга, упругие и релаксационные свойства, упругость микродеформации, изменение контактной жесткости.

**SUMMARY.** The main micromechanical characteristics of the surface layer of 45 steel with electric-spark coating, namely: microhardness, microplasticity (creep), Young's modulus, elastic and relaxation properties, elastic microdeformations, change in contact rigidity are analyzed.

1. Беркович И. И., Громаковский Д. Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т., 2000. – 268 с.
2. Jones J. W. and Wert J. J. The effects of gaseous environments on the wear of commercial purity titanium // *Wear*. – 1975. – **32**. – P. 363–377.
3. Sasada T., Hiratsuka K., and Saito H. Adsorption of surrounding gas molecules on pure metal surfaces during wear processes // *Wear*. – 1990. – **135**. – P. 251–264.
4. Трибологічні властивості комбінованих метало-оксидокерамічних шарів на легких сплавах / М. М. Студент, В. М. Довгунік, М. Д., Клапків В. М. Посувайло, В. В., Шмирко, А. Р. Киця // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2012. – **48**, № 2. – С. 55–64.  
(*Tribological properties of combined metal-oxide-ceramic layers on light alloys / M. M. Student, V. M. Dovhunyuk, M. D. Klapkiv, V. M. Posuvailo, V. V. Smyrko, A. P. Kytsya // Materials Science*. – 2012. – **48**, № 2. – P. 180–190.)
5. Головин Ю. И. Наноиндентирование и его возможности. – М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.
6. Бульчев С. И., Алехин В. П., Шоршоров М. Х. Исследование физико-механических свойств материалов в приповерхностных слоях и в микрообъемах методом непрерывного вдавливания индентора (обзор) // *Физика и химия обработки материалов*. – 1979. – № 5. – С. 69–81.
7. Blau P. J. Scratch Adhesion Testing // *Lab Handbook of Scratch Testing*. – Oak Ridge: Blue Rock Techn. Publ., 2002. – Chapter 7. – P. 7.1–7.15.
8. Структурно-реологические механизмы снижения динамической напряженности и деформационного упрочнения фрикционного контакта / В. В. Шевеля, А. С. Трытек, В. П. Олександренко, Ю. С. Соколан // *Проблеми трибології*. – 2010. – № 1. – С. 6–15.
9. Зміна мікромеханічних властивостей поверхневих шарів Fe, Cu і Ti після електролітичного наводнювання / В. А. Винар, М. Я. Головчук, Х. Б. Василів, В. І. Закієв // *Міжвузівський зб. "Наукові нотатки"*. – 2013. – **I**, № 41. – С. 38–44.
10. Мікроструктура та опір абразивному зношуванню вібронаплавленого металу з порошкового дроту базової системи Fe–Cr–B / А. А. Войтович, Г. В. Похмурська, М. М. Студент, О. З. Студент // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2016. – **52**, № 3. – С. 63–68.  
(*Microstructure and abrasive-wear resistance of the vibration-deposited metal of core wires of the basic Fe–Cr–B system / A. A. Vojtovych, H. V. Pokhmurs'ka, M. M. Student, O. Z. Student // Materials Science*. – 2016. – **52**, № 3. – P. 365–370.)
11. Matrix coatings based on anodic alumina with carbon nanostructures in the pores / G. G. Gorokh, M. I. Pashechko, J. T. Borc, A. A. Lozovenko, I. A. Kashko, and A. I. Latos // *Appl. Surf. Sci.* – 2018. – **433**. – P. 829–835.
12. Оцінювання механічних властивостей комбінованих металооксидокерамічних шарів на алюмінієвих сплавах / М. М. Студент, В. В. Шмирко, М. Д. Клапків, І. М. Лясота, Л. Н. Добровольська // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2014. – **50**, № 2. – С. 116–121.  
(*Evaluation of the mechanical properties of combined metal-oxide-ceramic layers on aluminum alloy / M. M. Student, V. V. Smyrko, M. D. Klapkiv, I. M. Lyasota, L. N. Dobrovolska // Materials Science*. – 2014. – **50**, № 2. – P. 290–295.)
13. Иванов Г. П. Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин. – М.: Машгиз, 1961. – 302 с.
14. Oliver W. C. and Pharr G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // *J. Mater. Res.* – 1992. – **7**, № 6. – P. 1564–1583.
15. Norma PN-EN ISO 14577-1: 2005. Instrumentalna próba wciskania wgłębnika do określenia twardości i innych własności materiałów. Część I. Metoda badania. – Publ. 13.07.2005.

Одержано 24.01.2019