

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.3(92).15936

В. В. ТОКАРУК, О. О. МІКОСЯНЧИК, Р. Г. МНАЦАКАНОВ, О. Ю. ЖОСАН,
Д. В. ДОЛОТ

Національний авіаційний університет, Україна

АНАЛІЗ МІЦНІСТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ

Проведено аналіз дискретних електроіскрових покриттів щільністю 60% склерометричним методом. Встановлено вплив твердості покриття на розповсюдження деформаційних процесів в приповерхневих шарах матеріалу основи по глибині та різний ступінь неоднорідної пластичної деформації по довжині траси сканування індентора. Проаналізовано підвищення зносостійкості комбінованого покриття з твердого (ВК8) та м'якого (Сu) матеріалів за рахунок реалізації позитивного градієнту механічних властивостей по глибині і локалізації деформаційних процесів в покритті. Розглянута ефективність структурної пристосованості комбінованого покриття при терті за рахунок релаксації внутрішніх напружень шляхом підвищення суцільності покриття.

Ключові слова: електроіскрове покриття, мікротвердість, пластична деформація, градієнт механічних властивостей, зносостійкість.

Вступ та постановка задач дослідження. Домінуючим фактором, що визначає опір зношуванню деталей машин, є рівень міцності їх контактних поверхонь. На процес зовнішнього тертя впливає велика кількість чинників: напружено-деформований стан, механічні та фізико-хімічні властивості контактуючих тіл, навколишнє середовище, режим роботи і т.д. Застосування методів, спрямованих на зміцнення або зміну поверхневого шару, дозволяє запобігти процесу зародження деформаційних дефектів, що забезпечує підвищення зносостійкості контактних поверхонь [1]. Одним з найбільш раціональних шляхів, що дозволяє цілеспрямовано змінювати напружено-деформований стан в поверхневому шарі, деформаційно-силові параметри контактних областей і природу контактної взаємодії тіл, є метод електроіскрового легування (ЕІЛ). В кожному конкретному випадку потрібно оптимізувати режим обробки (вибір енергії розряду, час обробки), а також підібрати зносостійкий матеріал електрода. Тому вивчення характеристик міцності і пружності покриттів, наплавлених методом ЕІЛ, має важливе теоретичне і практичне значення.

Аналіз останніх публікацій з даної проблеми. Оскільки структурна пристосованість і зміна трибологічної системи в процесі експлуатації можуть істотно змінити вихідні параметри, які використовуються при прогнозуванні ресурсу вузла тертя, необхідно накопичення великої кількості експериментального матеріалу щодо взаємозв'язку між вихідною твердістю матеріалів і їх опором зношуванню. Отримані методом ЕІЛ покриття за структурою та властивостями відрізняються від вихідних сплавів. Причиною цього є мікрометалургійні процеси, що протікають на оброблюваній поверхні в зоні дії іскрового розряду внаслідок фізико-хімічної взаємодії перенесеного матеріалу з матеріалом катода і елементами навколишнього середовища при наявності імпульсних термодинамічних напружень [2].

Особливістю ЕІЛ-покриттів є притаманна їм несучільність, що змінюється в інтервалі 40 ... 10% і забезпечує підвищення зносостійкості за рахунок дискретності структури покриття, відповідальної за зниження залишкових напружень [3]. Наяв-

ність в поверхневому шарі дискретних ділянок підвищеної твердості, оптимальної суцільності, геометрії і глибини впровадження в поверхню усуває концентрацію напружень від контактних навантажень і перериває процес тріщиноутворення, пластичного деформування, а також знижує схильність до схоплювання деталей, що істотно підвищують міцність і експлуатаційну надійність пар тертя [4].

Згідно [5], ефект дискретності покриття посилюється при ЕІЛ за рахунок формування на початковому етапі обробки сфероподібних глобул підвищеної твердості в порівнянні з поверхнею. Наявність таких глобул, крім зниження залишкових напружень, зменшує площу трибоконтакта, що призводить до збільшення питомого навантаження і, як результат, ініціює реакції трибоокислення, які відповідальні за формування поліоксидних вторинних зносостійких структур [6].

Важливе практичне значення має процес формування зносостійких електроіскрових покриттів, що забезпечують реалізацію позитивного градієнту механічних властивостей по глибині з метою створення передумов для оптимальної структурної пристосованості елементів трибоспряження.

Мета роботи – оцінка міцнісних характеристик зносостійких електроіскрових покриттів при терті.

Методика проведення експерименту. Модельні кільцеві зразки пари тертя виготовлені зі сталі 30ХГСА та дюралюмінію Д16, на поверхню якого методом ЕІЛ нанесено досліджувані сплави. Електроіскрове легування проводили на стандартній промисловій установці «Елітрон 22А» на повітрі при питомій тривалості обробки поверхні зразка - 1 хв/см². Тривалість проходження електричних імпульсів становила 200 мкс.

В якості покриття застосовували твердий сплав ВК8 та мідь, фізико-механічні властивості яких наведені в табл.1. Досліджувані дискретні покриття твердого сплаву ВК-8, пластичного матеріалу Сu та комбінованого покриття ВК-8 + Сu наносились зі щільністю 60%.

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості дюралюмінію Д16, сплаву ВК8 та Сu

Характеристика	Д16	ВК8	Сu
Густина матеріалу, кг/м ³	2800	14600	8940
Коефіцієнт лінійного розширення, 10 ⁻⁶ , К ⁻¹	23	4,5	16,7
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	170	54	401
Питома теплоємність, Дж/(кг·К)	1000	150	385
Модуль Юнга, 10 ¹¹ Па	0,71	6,0	1,15
Модуль зсуву, 10 ¹¹ Па	0,27	2,5	4,24
Коефіцієнт Пуассона	0,3	0,196	0,33

Для отримання рівномірно зміцнених шарів необхідної шорсткості і щільності проводилася подальша обробка поверхні поверхневим пластичним деформуванням з подальшою фінішною обробкою. Отримана шорсткість була в межах $R_a = 0,5 - 0,7$ мкм.

Мікротвердість поверхневих шарів металу і знос вимірювалися на багатофункціональному приладі «Мікрон-гамма» [7], призначеному для дослідження фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалів методом безперервного вдавлювання індентора.

Трибологічні дослідження процесів тертя і зношування контактних поверхонь проводилися на серійній машині тертя 2070 СМТ-1 протягом 240 хв. у режимі граничного мащення з витратою оливи 1,2 л/год.

Обговорення основних результатів. Глибина впровадження індентора при склерометрії – основний параметр, за яким можливо встановити об'єм приповерхневих шарів металу, які реагують на вдавлювання індентора. Результати даного аналізу після структурної пристосованості поверхневих шарів металу при терті представлені на рис. 1.

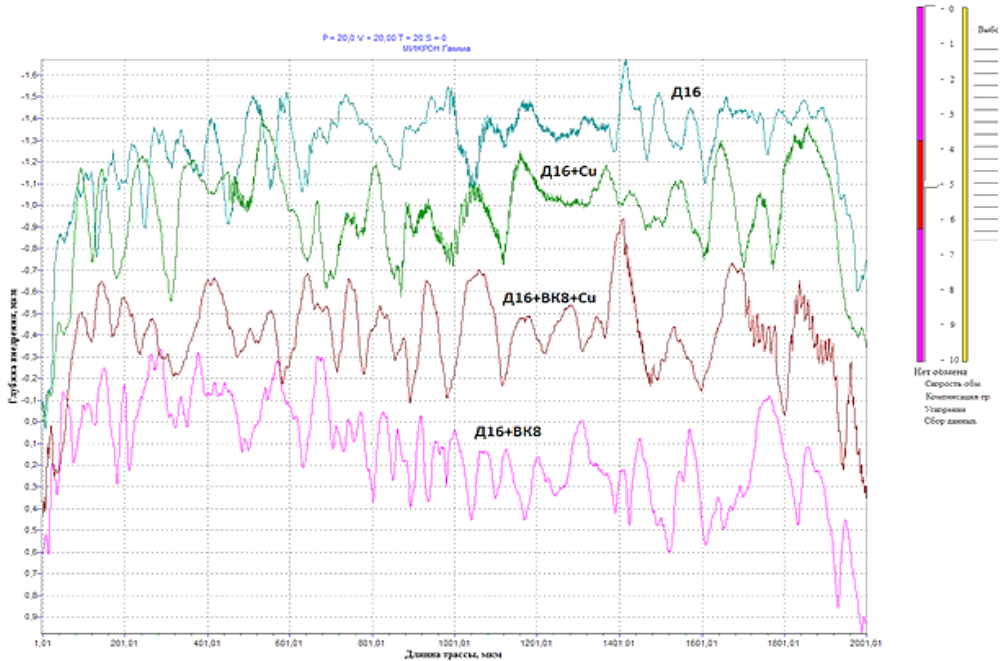


Рис. 1. Глибина вдавлювання індентора при склерометрії електроіскрових покриттів на дюралюмінії Д16

Формування електроіскрових покриттів з Cu, VK8+Cu, VK8 забезпечує зниження розповсюдження деформаційних процесів в приповерхневих шарах металу по глибині на 20%, 70% та 95% відповідно. Як для дюралюмінію без покриття, так і для покриттів Cu і VK8+Cu встановлено утворення неоднорідного деформаційного мікрорельєфу, що проявляється в нерівномірному розподілі тонких слідів ковзання в зонах з дрібнозернистою структурою. Якщо для Д16 та Д16+Cu ступінь неоднорідної пластичної деформації становить до 80% довжини траси сканування індентора, то для Д16+VK8+Cu цей показник зменшується на 30%. Лише для твердого покриття VK8 не встановлено прояву неоднорідної пластичної деформації, що обумовлено його високою твердістю та опором діючим нормальним та дотичним напруженням в зоні фрикційного контакту.

Деформаційно-міцнісні характеристики приповерхневих шарів металу відіграють ведучу роль в забезпеченні зносостійкості контактних поверхонь, оскільки прискорення / уповільнення формування дислокаційної структури при терті обумовлено активацією пар тертя.

Розглянемо зміну мікротвердості поверхневих та приповерхневих шарів досліджуваних поверхонь після наробітки 240 хв. в режимі ковзання (табл. 2, рис. 2).

Таблиця 2

Мікротвердість та лінійний знос досліджуваних поверхонь

Тип покриття	Мікротвердість вихідної поверхні, H_{20} , МПа	Мікротвердість поверхні після тертя, H_{20} , МПа	Знос, мкм
Д16	850	390 (зменшення)	0,01
Д16+Cu	700	755 (зміцнення)	0,002
Д16+ВК 8	17000	18920 (зміцнення)	0,046
Д16+ВК 8+Cu	6000	4730 (зменшення)	0,0048

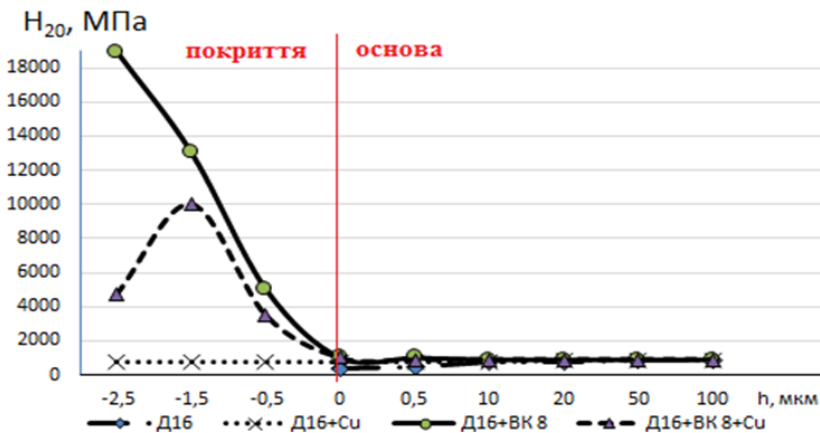


Рис. 2. Мікротвердість приповерхневих шарів металу по глибині (від'ємні значення відповідають покриттю, позитивні - основі).

Тільки для немодифікованої поверхні Д16 встановлено зниження мікротвердості поверхневих шарів при терті в 2,18 разів. Зменшення проявляється не тільки в поверхневих шарах металу, а розповсюджується на глибину до 30 мкм, що є головною передумовою для зниження зносостійкості. Механізм даного процесу полягає в зниженні опору локальному пластичному деформуванню в фрикційному контакті, інтенсифікації енергетичних трибопроцесів та утворенні розрихленого поверхневого шару металу з появою субмікроскопічних дефектів.

Формування електроіскрового покриття з міді забезпечує реалізацію позитивного градієнту механічних властивостей металу по глибині. Деформаційні процеси локалізуються переважно в покритті, однак сформоване м'яке покриття не забезпечує повного захисту матеріалу основи. Незважаючи на те, що зона розповсюдження пластичних деформацій в основі зменшується в 2 рази, глибина їх локалізації становить до 15 мкм.

Тверде електроіскрове покриття ВК8 забезпечує зростання мікротвердості поверхневих шарів металу в 20 разів. Однак, наявність негативного градієнту механічних властивостей по глибині знижує його зносостійкість, в середньому, в 4 рази, в порівнянні з Д16. В процесі тертя сформоване покриття ВК8 зміцнюється, що призводить до зростання напруженого стану в покритті та є головною передумовою до зниження інтенсивності релаксацийних процесів в активованих тертям поверхневих шарах металу.

При формуванні комбінованого електроіскрового покриття ВК8+Cu усуваються недоліки, які зазначені вище для кожного покриття окремо. Його висока

зносостійкість обумовлена як реалізацією позитивного градієнту механічних властивостей по глибині, так і локалізацією деформаційних процесів в покритті. Наявність міді на твердому покритті забезпечує ефективну структурну пристосованість комбінованого покриття при терті за рахунок релаксації внутрішніх напружень: зменшення покриття в 1,25 разів, в порівнянні з покриттям ВК8, знижує імовірність формування локальних концентраторів напружень шляхом підвищення суцільності покриття (рис. 3).

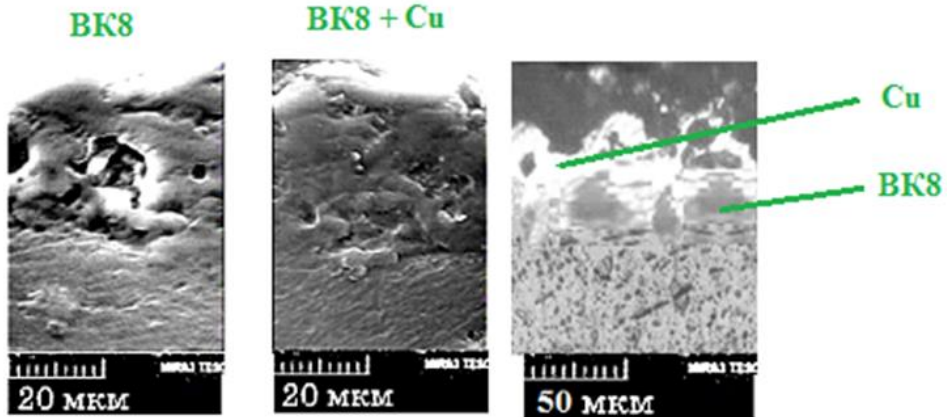


Рис. 3. Оптично-мікроскопічні зображення поперечних перерізів зразків дюралюмінію Д16 з електроіскровими покриттями після трибологічних випробувань

Суцільність комбінованого покриття ВК8+Cu зростає в 2 рази, в порівнянні з покриттям ВК8, за рахунок заповнення несучільностей твердого покриття ВК8 міддю, що сприяє локалізації нормальних та тангенціальних напружень в м'якій складовій комбінованого покриття.

Таким чином, аналіз досліджуваних електроіскрових покриттів показав переваги комбінованого покриття з твердого (ВК8) та м'якого (Cu) матеріалів, яке забезпечує підвищення зносостійкості модифікованої поверхні дюралюмінію Д16 за рахунок позитивного градієнту механічних властивостей по глибині та ефективного опору щодо розповсюдження пластичних деформацій в матеріал основи.

Висновки. Проведена оцінка міцнісних характеристик дискретних електроіскрових покриттів при терті встановила вплив мікротвердості поверхневих та приповерхневих шарів матеріалу, градієнту механічних властивостей по глибині, суцільності покриття на їх оптимальну структурну пристосованість. Залежно від твердості матеріалу електроіскрового покриття забезпечується зниження розповсюдження деформаційних процесів в приповерхневих шарах матеріалу основи по глибині від 20 до 95%. Не встановлено закономірності щодо взаємозв'язку процесів зміцнення / зменшення поверхневих шарів металу при терті та їх зносостійкості. Ефективні протизношувальні характеристики проявляє комбіноване покриття з твердого (ВК8) та м'якого (Cu) матеріалів на дюралюмінію Д16 за рахунок наявності позитивного градієнту механічних властивостей по глибині покриття-основа і локалізації деформаційних процесів в покритті.

Список літератури

1. Tokaruk V.V. Microgeometrical characteristics of electrospark coatings in the initial state / V.V. Tokaruk, O.O. Mikosianchyk, R.G. Mnatsakanov, N.O. Rohozhyna // Problems of Tribology. – 2020. – V. 25, No 4/98. – P.33-39

2. Окин М.А. Повышение межремонтного ресурса восстановленных электроискровой обработкой деталей оптимизацией физико-механических свойств покрытий / М.А. Окин / Автореф. дис. на соиск. уч. степ. к.т.н. по спец.05.20.03, ГОУВПО Мордовский государственный ун-т им. Н.П. Огарева, Саранск, 2010. – 20с.

3. Ляшенко Б.А. Упрочняющие покрытия дискретной структуры / Б.А. Ляшенко, А.Я. Мовшович, А.И. Долматов // Научно-технические системы. – 2001. – № 4. – С. 17–25

4. Ляшенко Б.А. Розробка нових зносостійких покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик деталей механізмів / Б.А. Ляшенко, В.С.Антонюк, О.Б. Сорока, А.В. Рутковский // 36. Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: міжнар. наук.-техн. конф. – Тернопіль.: ТДТУ ім. І. Пулюя. – 2004. – С. 381-386.

5. Особенности глобулярной структуры электроискровых покрытий на сплаве ВК8 / И.А. Подчерняева, О.В. Степанова, А.Д. Панасюк и др. // Порошковая металлургия. – 2008. – № 5/6. – С. 77–84.

6. Корбут Е.В. Перспективы электроискрового упрочнения твердосплавного режущего инструмента / Е.В. Корбут, Б.А. Ляшенко, И.И. Подчерняева, Д.В. Юрченко // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2012. – Вип.12. – С. 67-80.

7. Игнатович С. Р. Определение микромеханических характеристик поверхности материалов с использованием наноиндентометра «Микрон-гамма» / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, В.И. Закиев // Вестник ХНАДУ. 2008. №42. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-mikromehanicheskikh-harakteristik-poverhnosti-materialov-s-ispolzovaniem-nanoindentometra-mikron-gamma> (дата обращения: 28.08.2021).

Стаття надійшла до редакції 31.08.2021.

Токарук Віталій Володимирович – старший викладач кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 78 56, E-mail: vetalion1980@gmail.com.

Мікосянчик Оксана Олександрівна – д. техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: oksana.mikos@ukr.net.

Мнацаканов Рудольф Георгійович – д. техн. наук, професор, професор кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 76 70, E-mail: mnatsakanov@ukr.net.

Жосан Олександр Юрійович – студент групи КМ-403Б, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 408 44 45, E-mail: acelamond@gmail.com

Долот Денис Володимирович – студент групи ГУ-412Б, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 408 44 45, E-mail: denis_dolot@ukr.net

V. V. TOKARUK, O. A. MIKOSIANCHYK, R. G. MNATSAKANOV, O. Y. ZHOSAN,
D. V. DOLOT

ANALYSIS OF FIRMNESS CHARACTERISTICS OF ELECTRIC-SPARK COATINGS

The analysis of discrete electric-spark coatings with a density of 60% by sclerometric method is carried out. The influence of coating hardness on the propagation of deformation processes in the near-surface layers of the base material along the depth, and different degree of inhomogeneous plastic deformation along the length of the indenter scan route are established. The formation of electric-spark coatings with Cu, BK8+Cu, BK8 ensures a reduction of spread of deformation processes in the near-surface layers of metal at a depth of 20%, 70% and 95%, respectively. It is established that the deformation-firmness characteristics of the near-surface layers of metal play a key role in ensuring wear resistance of contact surfaces, given that acceleration / deceleration of the formation of the dislocation structure during friction is due to the activation of friction pairs. The evaluation of the firmness characteristics of discrete electric-spark coatings during friction established the influence of microhardness of the surface and near-surface layers of the material, the gradient of mechanical properties in depth and the integrity of the coating on their optimal structural suitability. Formation of combined electric-spark coating BK8+Cu eliminates the disadvantages that are identified for each coating separately. The presence of copper on the hard surface provides effective structural adaptability of the combined coating under friction due to relaxation of internal stresses: softening of the coating in 1.25 times, compared to BK8 coating, reduces the likelihood of local stress concentrators by increasing the integrity of the coating. The integrity of the combined coating BK8+Cu increases in 2 times, compared with the BK8 coating, due to filling the imperfections of the BK8 hard coating with copper, which contributes to the localization of normal and tangential stresses in the soft component of the combined coating.

Key words: electric-spark coating, microhardness, plastic deformation, gradient of mechanical properties, wear resistance.

Referenses

1. Tokaruk V.V. Microgeometrical characteristics of electrospark coatings in the initial state / V.V. Tokaruk, O.O. Mikosianchyk, R.G. Mnatsakanov, N.O. Rohozhyna // *Problems of Tribology*. – 2020. – V. 25, No 4/98. – P.33-39.
2. Okin M.A. Povyshenie mezhremontnogo resursa vosstanovlennykh elektroiskrovoy obrabotkoj detalej optimizaciej fiziko-mekhanicheskikh svojstv pokrytij / M.A. Okin / *Avtoref. dis. na soisk. uch. step. k.t.n. po spec.05.20.03, GOUVPO Mordovskij gosudarstvennyj un-t im. N.P. Ogareva, Saransk, 2010. – 20s.*
3. Lyashenko B.A. Uprochnyayushchie pokrytiya diskretnoj struktury / B.A. Lyashenko, A.YA. Movshovich, A.I. Dolmatov // *Naukoemkie tekhnologii. Tekhnologicheskie sistemy*. – 2001. – № 4. – S. 17– 25.
4. Lyashenko B.A. Rozrobka novih znosostijkih pokrytij dlya pidvishchennya ekspluatacijnih harakteristik detalej mekhanizmiv / B.A. Lyashenko, V.S.Antonyuk, O.B. Soroka, A.V. Rutkovskij // *Zb. Dinamika, micnist' i nadijnist' sil'skogospodars'kih mashin: mizhnar. nauk.-tekhn. konf. – Ternopil'. : TDTU im. I. Pulyuya . – 2004. - S. 381-386.*
5. Osobennosti globulyarnoj struktury elektroiskrovyyh pokrytij na splave VK8 / I.A. Podchernyaeva, O.V. Stepanova, A.D. Panasyuk i dr. // *Poroshkovaya metallurgiya*. – 2008. – № 5/6. – S. 77–84.
6. Korbut E.V. Perspektivy elektroiskrovogo uprochneniya tverdospalnogo rezhushchego instrumenta / E.V. Korbut, B.A. Lyashenko, I.I. Podchernyaeva, D.V. YUchenko // *Procesi mekhanichnoï obrobki v mashinobuduvanni*. – 2012. – Vip.12. – S. 67-80.
7. Ignatovich S. R. Opredelenie mikromekhanicheskikh harakteristik poverhnosti materialov s ispol'zovaniem nanoindentometra «Mikron-gamma» / S.R. Ignatovich, I.M. Zakiev, V.I. Zakiev // *Vestnik HNADU*. 2008. №42. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-mikromekhanicheskikh-harakteristik-poverhnosti-materialov-s-ispolzovaniem-nanoindentometra-mikron-gamma> (дата обращения: 28.08.2021).