

## ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАНЕСЕННЯ АНТИФРИКЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ НА НЕПОВНІ СФЕРИЧНІ ПОВЕРХНІ ФРИКЦІЙНО-МЕХАНІЧНИМ СПОСОБОМ

*В роботі розглянуті існуючі уявлення про механізм утворення зносостійкого покриття фрикційно-механічним способом. Проаналізований процес нанесення, визначені параметри, які впливають на товщину антифрикційного покриття. Встановлено, що одним із напрямків підвищення ефективності є використання в процесі обробки вібрації інструменту. В результаті проведеного аналізу технологічних можливостей способів нанесення антифрикційного покриття та методів зміцнення, запропоновано новий комбінований спосіб фінішної антифрикційної статико-імпульсної обробки. Для антифрикційної обробки неповних сферичних поверхонь комбінованим способом, запропоновано нову кінематичну схему. На основі розробленої кінематичної схеми і комп'ютерного моделювання з використанням програмного продукту SOLIDWORKS спроектовано технологічне оснащення для реалізації процесу фрикційно-механічного нанесення зносостійкого покриття на неповні зовнішні сферичні поверхні, зокрема автомобільних кульових пальців. Проведені експериментальні дослідження для встановлення раціональних параметрів процесу фрикційно-механічного нанесення латуні Л63 на неповні сферичні поверхні кульового пальця і залежності впливу статичного навантаження та енергії одиночного удару на товщину шару покриття. Результати проведеної роботи планується узагальнити для формування рекомендацій щодо практичної реалізації технології фрикційного нанесення антифрикційного покриття на неповні сферичні поверхні кульових шарнірів.*

*Ключові слова: поверхнєве пластичне деформування, фрикційно-механічне натирання, зносостійке покриття, сферична поверхня, статичне навантаження, енергія, удар.*

M.M. KOSIYUK, S.A. KOSTYUK, M.A. KOSTYUK

Khmelnytsky National University

## TECHNOLOGICAL SUPPORT OF APPLICATION ANTIFRICTION COATING ON INCOMPLETE SPHERICAL SURFACES BY FRICTION-MECHANICAL METHOD

*The paper considered ways to increase wear resistance and quality of working surfaces of machine parts by applying a friction-mechanical method on the friction surface of antifriction coating. The existing ideas about the mechanism formation antifriction wear-resistant coating by friction-mechanical method are considered. The process and the parameters that influence the thickness of antifriction coating are analyzed. It was established that one of the directions of increasing the efficiency of the finishing antifriction treatment process is to provide of the oscillating motions tool. As a result carried out analysis of technological possibilities methods of applying antifriction coating and strengthening methods, a new combined method of finishing antifriction static-pulsed processing is proposed. For antifriction processing of incomplete spherical surfaces in combined method, a new kinematic scheme is proposed. On the basis of the designed kinematic scheme and computer simulation with the use of the software product SOLIDWORKS, technological equipment for the implementation process of friction-mechanical application of wear-resistant coating on the incomplete external spherical surfaces, in particular automobile ballpoint fingers, was designed. Experimental investigations have been carried out to establish rational parameters of the process of friction-mechanical application of brass L63 and the dependence of the influence static load and the energy of a single impact on the thickness of the coating layer. The results of the work are planned to be generalized to formulate recommendations on the practical implementation of the technology of applying antifriction coating on the incomplete spherical surfaces of ball joints.*

*Keywords: surface plastic deformation, friction-mechanical rubbing, wear-resistant coating, spherical surface, static impact, impact action.*

### Постановка проблеми

В сучасній техніці широко застосовуються сферичні трибосистеми, зокрема автомобільні кульові шарніри, які містять деталі з неповними сферичними поверхнями (НСП). Вирішення задачі підвищення їх надійності та довговічності є актуальним завданням. Вихід з ладу деталей машин, як правило, спричинений руйнуванням їх поверхневого шару, тому все більшу увагу приділяють питанням зносостійкості, інженерії робочих поверхонь та змащуванню [1, 2].

Одним із шляхів підвищення зносостійкості та якості робочих поверхонь деталей машин є удосконалення існуючих та створення нових комбінованих технологічних методів впливу на поверхню, що обробляється. Перспективним напрямком підвищення зносостійкості поверхонь деталей трибоспряджень є створення наноструктурованих антифрикційних покриттів фрикційним способом. Фрикційно-механічне нанесення зносостійкого матеріалу, має складну природу, залежить від багатьох факторів на різних етапах технологічного процесу і потребує науково обґрунтованих рекомендацій щодо технології, обладнання та режимів його роботи [3–5]. Тому розробка та дослідження технології фрикційного нанесення зносостійкого покриття на неповні сферичні поверхні є актуальною задачею як для теорії, так і для практики цього процесу.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відкриття вибіркового перенесення при терті лягло в основу розробки методів підвищення зносостійкості поверхонь тертя і довговічності деталей, одним з яких є фінішна антифрикційна безабразивна обробка (ФАБО) [3–6]. Сутність ФАБО полягає в тому, що поверхню тертя деталей покривають тонким шаром латуні, міді або бронзи. Антифрикційне покриття (АП) наносять шляхом тертя латунного, мідного

або бронзового прутка (інструменту) об поверхню заготовки (рис. 1), змашуючи при цьому поверхню тертя технологічною рідиною. При терті матеріал прутка (інструменту) переноситься на поверхню заготовки, внаслідок чого вона набуває високих антифрикційних властивостей.

Глибокі уявлення про механізм утворення АП фрикційно-механічним натиранням широко представлені в роботах [3–10]. При цьому процес фрикційно-механічного нанесення покриттів розглядаються як такий, що супроводжується двома конкуруючими між собою явищами: утворення покриття і його руйнування. Однією з умов отримання покриттів є введення в зону контакту при нанесенні покриттів спеціального технологічного середовища, яке створює умови для схоплювання металів. На відміну від сухого тертя, коли в зоні контакту відбувається інтенсивне зростання температури і схоплювання супроводжується вириванням окремих частинок з поверхні інструменту, використання технологічної рідини забезпечує утворення суцільного, міцно зчепленого покриття.

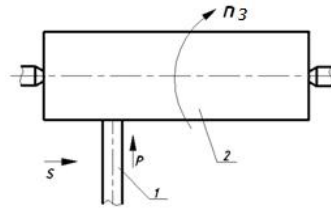


Рис. 1. Схема фрикційно-механічного нанесення АП

1 – інструмент; 2 – заготовка;  $P$  – зусилля притиснення натирають елемента;  $n$  – частота обертання заготовки;  $S$  – поздовжня подача інструменту.

Як показано у роботі [8] підвищити якість АП можливо шляхом поєднання ФАБО і поверхневого пластичного деформування поверхні, що обробляється.

У роботах [9,10] зазначено, що одним з шляхів інтенсифікації нанесення покриттів при ФАБО є задіяння чотирьох каналів активації контактних поверхонь (хімічного, термічного, механічного і пов'язаного з пластичною деформацією). Встановлено, що підвищити якість і продуктивність процесу ФАБО можливо за рахунок застосування вібрації (осциляції) інструменту. Такий варіант ФАБО названий фінішною антифрикційною безабразивною вібраційною обробкою (ФАБВО).

**Мета роботи** – удосконалення технології та розробка обладнання для реалізації процесу фрикційно-механічного нанесення зносостійкого покриття на неповні зовнішні сферичні поверхні деталей кульових шарнірів, зокрема автомобільних кульових пальців.

#### Виклад основного матеріалу дослідження

На основі результатів проведеного аналізу технологічних можливостей ФАБО та методів зміцнення, способів і конструкцій обладнання для нанесення покриттів і зміцнення НСП запропоновано новий комбінований спосіб фінішної антифрикційної статико-імпульсної обробки (ФАСІО).

На рис.2 зображена схема нанесення антифрикційних покриттів на неповну сферичну поверхню способом, що пропонується. Заготовка 1 обертається з частотою  $n_3$ . Інструмент 2, що обертається з частотою  $n_1$ , притискається до неповної сферичної поверхні заготовки із забезпеченням постійної статико-імпульсної дії зусиллями  $P_c$  і  $P_i$  та його коливного руху відносно центру сферичної поверхні заготовки на кут  $\alpha$  подачею  $S_\alpha$ .

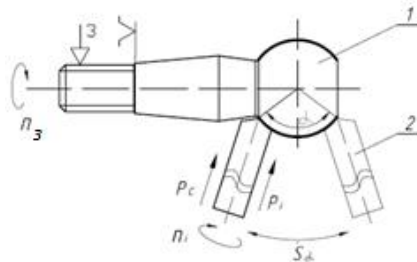


Рис. 2.Схема нанесення антифрикційних покриттів на неповну сферичну поверхню

Кут коливання  $\alpha$  визначається за формулою:

$$\alpha = 180 - (\beta_1 + \beta_2) = 180 - \left( \frac{\arcsin d_1}{2R_{сф}} + \arcsin d_2 \right) \quad (1)$$

де  $R_{сф}$  – радіус сферичної поверхні, що обробляється;  $d_1$  і  $d_2$  – діаметри торцевих зрізів;  $\beta_1$  і  $\beta_2$  – кути повороту радіус вектора, що визначають неповну сферичну поверхню заготовки.

Даний спосіб передбачає нанесенням антифрикційного покриття з одночасним зміцненням поверхневого шару НСП основного матеріалу заготовки пальця кульової опори.

Для проведення досліджень, перевірки працездатності запропонованої кінематичної схеми, розроблено її комп'ютерну імітаційну модель. Комп'ютерне моделювання процесу обробки проводилось у середовищі SOLIDWORKS з використанням системи SOLIDWORKS Motion для проведення кінематичного та динамічного аналізу.

Окремі фрагменти результатів проведених досліджень наведено на рис. 3.

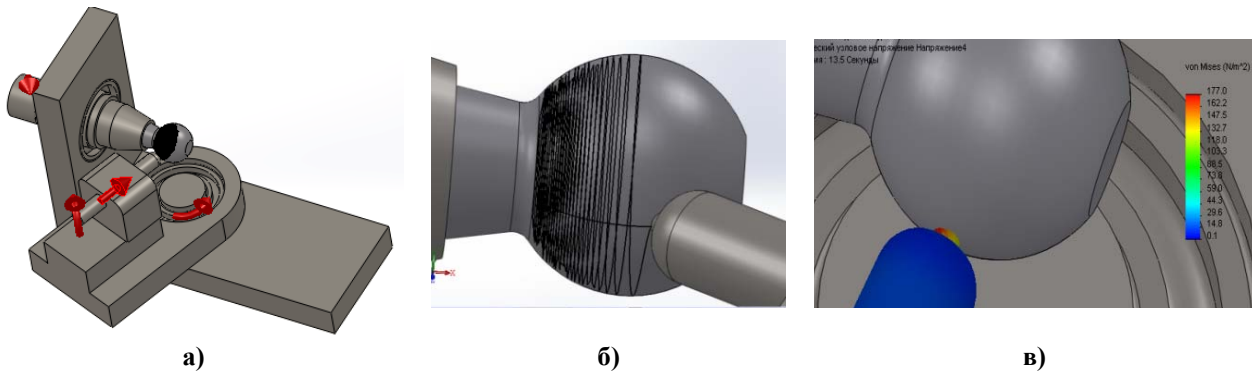


Рис. 3. Комп'ютерна модель та дослідження кінематичної схеми ФАСІО  
 а – модель обробки, б – траєкторія руху інструмента, в – напружено-деформований стан інструмента

Запропоновано пристрій для забезпечення процесу ФАСІО НСП, загальний вид якого наведений на рис. 4.

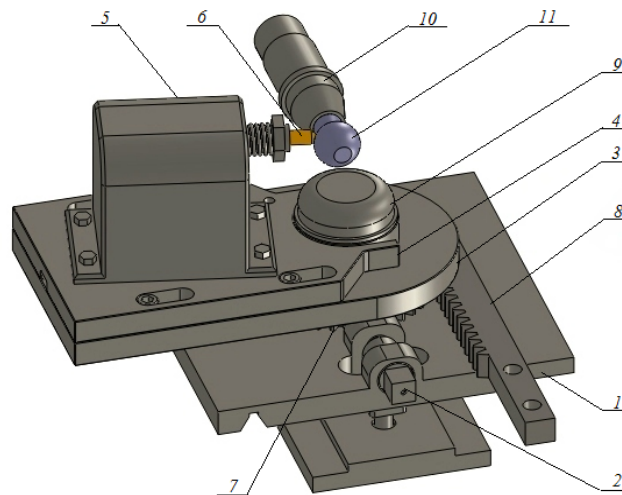


Рис. 4. Пристрій для ФАСІО НСП

Пристрій для нанесення антифрикційного покриття на зовнішні неповні сферичні поверхні виконано у вигляді поворотного столу, що містить платформу 1, яка встановлюється на призматичні напрямні станини токарного верстату. Платформа 1 виконана з можливістю поздовжнього переміщення і фіксації за допомогою механізму фіксації 2. На платформі 1 розміщено поворотний стіл 3 до якого прикріплено плиту 4 із закріпленим на ній механізмом статико-імпульсної дії 5 з індивідуальним приводом та інструментом 6, виконаного з можливістю поперечного переміщення відносно осі обертання заготовки. Налаштування інструмента 6, здійснюється по шаблону, закріпленому в патроні токарного верстата (не показано). Кінематичний зв'язок поворотного столу із супортом токарного верстату здійснюється за допомогою зачеплення зубчастого вінця 7 та рейки 8.

Робота з використанням пристрою для нанесення антифрикційного покриття на зовнішні неповні сферичні поверхні здійснюється наступним чином. Заготовку 11 встановлюють у патрон токарного верстату 10. Інструмент налаштовують по шаблону та фіксують у потрібному положенні. При включенні поздовжньої подачі супорт токарного верстату починає рухатися у напрямку передньої бабки (не показано). Рейка 8, яка закріплена на супорті і має з ним кінематичний зв'язок передає рух на зубчатий вінець 7, закріплений на підшипниковому вузлі 9 і обертає його відносно осі, яка закріплена на платформі 1, нерухомо зафіксованій на призматичних напрямних токарного верстата. При цьому інструмент 6 встановлений у шпиндель механізму статико-імпульсної дії 5, починає обходити зовнішню сферичну поверхню по заданому радіусу, обертаючись навколо власної осі з частотою  $n_i$  з одночасним статико-імпульсним навантаженням неповної сферичної поверхні, що обробляється.

Проведено експериментальні дослідження запропонованої технології та обладнання для фрикційно-механічного нанесення зносостійкого покриття на неповні зовнішні сферичні поверхні автомобільних кульових пальців. На рис. 5 представлено загальний вигляд кульового пальця, на неповну сферичну

поверхню, якого фрикційно-механічним способом наносилися покриття із латуні Л63. Проведено оцінку залежності впливу енергії одиничного удару та статичного навантаження на товщину шару антифрикційного покриття.

Експериментальний стенд дозволяв забезпечувати статичне навантаження  $F_{ст}$  на інструмент в межах 75-150 Н і енергію одиничного удару  $W$  в межах 0,5-2 Дж.

Товщина покриття вимірювалась на мікросліфах за допомогою цифрового мікроскопу моделі SIGETA CAM-05. Частота обертання інструменту була постійною  $n_1=300$  об/хв. Частота обертання заготовки  $n_2=160$  об/хв.

За отриманими експериментальними значеннями побудовано графік залежності:  $h=f(W, F_{ст})$ , (рис. 6).



Рис. 5. Загальний вигляд зразка кульового пальця, на НСП якого нанесено шар латуні Л63

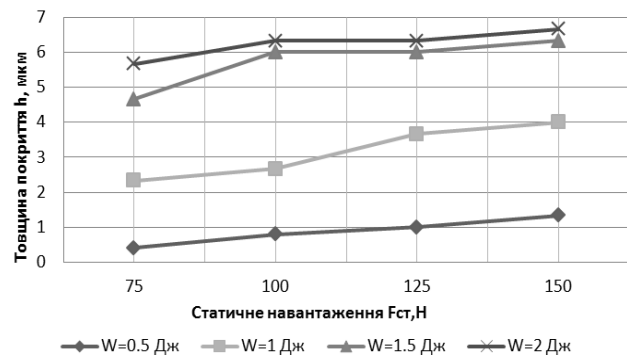


Рис. 6. Графічні залежності впливу енергії одиничного удару ( $W$ ) та статичного навантаження ( $F_{ст}$ ) на товщину шару ( $h$ ) антифрикційного покриття

При проведенні експериментальних досліджень встановлено, що запропонований спосіб ФАСІО дозволяє наносити покриття товщиною до 7 мкм на поверхні з  $R_a > 1.25$  мкм, збільшувати його щільність, а також зміцнювати поверхневий шар основного матеріалу заготовки.

Головними параметрами ФАСІО є величина статичного навантаження інструмента  $F_{ст}$ , енергія одиничного удару  $W$ , величина якої визначає глибину залягання деформації та зміну величини коефіцієнта тертя, що впливає на якість і твердість сформованого покриття.

Із збільшенням енергії одиничного удару  $W$  зростає степінь деформування та твердість зміцненого поверхневого шару, що в свою чергу визначає його фізико-механічні властивості.

Величина енергії одиничного удару  $W$  повинна знаходитись у певних межах, оскільки при малій енергії забезпечується початок пластичного деформування мікрооб'ємів поверхневого шару з малим ступенем зміцнення, а при збільшенні енергії до критичної, відбувається процес перенаклепу (злуцування тонких шарів покриття) та погіршується якість нанесеного покриття.

Для ефективного використання ударного імпульсного навантаження під час обробки необхідно забезпечити постійний контакт інструмента і заготовки із заданим статичним навантаженням. Це дозволяє підвищити ефективність використання енергії ударного імпульсу  $W$  та коефіцієнт корисної дії процесу ФАСІО.

Імпульсне навантаження інструмента дає можливість блискавично підвищити коефіцієнт тертя (заготовка-інструмент), що призводить до інтенсифікації процесу руйнування матеріалу інструмента з вбиванням частинок латуні у нерівності мікрорельєфу заготовки.

Для забезпечення протікання процесу ФАСІО і нанесення якісного покриття з високими показниками адгезії між матеріалами заготовки та покриття, необхідно своєчасно подавати у зону обробки спеціальну технологічну рідину, яка змочує та активує поверхні, руйнуючи оксидну плівку для покращення умов схоплювання металів. Основним компонентом технологічної рідини є гліцерин, який сприяє протіканню процесу вибіркового перенесення при терті пари сталь-латунь.

Запропонований пристрій дозволяє керувати товщиною нанесеного антифрикційного покриття з одночасним зміцненням поверхневого шару основного матеріалу заготовки. Оцінка мікротвердості проводилась на універсальному мікротвердомірі ПМТ-3. Спостерігається підвищення мікротвердості до 30%.

До особливостей процесу з ФАСІО слід віднести: низьку витрату матеріалу покриття та механічної енергії при натиранні, високу стабільність і якість антифрикційного покриття. Підвищити якість АП та продуктивність процесу ФАСІО можливо за рахунок збільшення кількості одночасно працюючих інструментів та забезпечення оптимальних режимів.

#### Висновки

В роботі запропоновано новий комбінований спосіб нанесення антифрикційного покриття фрикційно-механічним натиранням на неповні зовнішні сферичні поверхні. На основі розробленої кінематичної схеми і комп'ютерного моделювання з використанням програмного продукту SOLIDWORKS спроектовано технологічне оснащення. З використанням системи SOLIDWORKS Motion проведено його кінематичний та динамічний аналіз.

При проведенні експериментальних досліджень побудовані графічні залежності впливу енергії одиничного удару та статичного навантаження на товщину шару антифрикційного покриття. Встановлено, що процес фрикційно-механічного формування АП є екологічно безпечним і економічно обґрунтованим. Результати проведеної роботи планується узагальнити для формування рекомендацій щодо практичної реалізації технології фрикційного нанесення антифрикційного покриття на неповні сферичні поверхні кульових шарнірів.

### Література

1. Ющенко К.А. Инженерия поверхности / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. – К. : Наукова думка, 2007. – 557с.
2. Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей / Суслов А.Г., Безъязычный В.Ф., Панфилов Ю.В. и др. / под ред. Суслова. А.Г. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.
3. Польшер Г. Основы трения и изнашивания / Г. Польшер, Ф. Майснер ; пер. с нем. – М. : Машиностроение, 1984. – 256 с.
4. Избирательный перенос в тяжелонагруженных узлах трения / под общ. ред. Д.Н. Гаркунова. – М. : Машиностроение, 1982. – 207 с.
5. Гаркунов Д. Н. Триботехника. Конструирование, изготовление, эксплуатация машин / Д. Н. Гаркунов. – М. : Машиностроение, 2002. – 632 с.
6. Гаркунов Д.Н. Новое научное открытие в трибологии на основе самоорганизации / Д.Н. Гаркунов, Э.Л. Мельников, А.В. Щедрин // Научные труды Академии проблем качества. – 2016. – С. 348–356.
7. Балабанов В.И. Нанесение трением наноразмерных антифрикционных покрытий на детали / В.И. Балабанов, В.Ю. Болгов, С.А. Ищенко // Нанотехнологии, экология, производство. – 2010. – № 1(3). – С. 104–107.
8. Сорокин В.М. Упрочнение поверхностей валов совмещенным натиранием антифрикционных покрытий и ППД / В.М. Сорокин, С.С. Танчук, А.В. Михеев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 2. – С. 38–43.
9. Черкун В.В. Повышение износостойкости внешних цилиндрических поверхностей трения деталей гидроагрегатов путем применения финишной антифрикционной безабразивной вибрационной обработки (ФАБВО) / В. В. Черкун // Вібрації в техніці та технологіях. – 2013. – № 2. – С. 138–140.
10. Шепеленко И. В. Образование антифрикционного покрытия финишной антифрикционной безабразивной вибрационной обработкой / И. В. Шепеленко, В. В. Черкун // Вібрації в техніці та технологіях. – 2013. – № 3. – С. 99–104.

### References

1. 1.Yushchenko K.A. Inzheneriia poverkhni / K.A. Yushchenko, Yu.S. Borysov, V.D. Kuznetsov, V.M. Korzh. – K.: Naukova dumka, 2007.– 557 p.
2. Suslov A.H. Ynzheneryia poverkhnosty detalei / A.H.Suslov, Bezъязыchnyi V.F., Panfilyov Yu.V. / Pod red. Suslova. A.H. – M.: Mashynostroeniye, 2008. – 320 p.
3. 3.Poltser H. Osnovy treniya y yznashyvaniya / H. Poltser, F. Maisner. – M.: Mashynostroeniye, 1984. – 256 p.
4. Yzbyratelnyi perenos v tiazhelona hruzhennykh uzlakh treniya /Pod obshch.red. D.N. Harkunova. – M.:Mashynostroeniye, 1982. – 207p.
5. 5.Harkunov D. N. Trybotekhnika. Konstruyrovaniye, yzgotovleniye, e'kspluatatsiya mashyn / D. N. Harkunov. – M. : Mashynostroeniye, 2002. – 632 p
6. 6.Harkunov D.N., Melnykov E.L., Shchedryn A.V. Novoe nauchnoe otkrytiye v trybologyy na osnove samoorganizatsyy// Nauchnye trudy Akademyy problem kachestva. 2016. pp. 348-356.
7. Balabanov V.Y. Naneseniye treniyem nanorazmernykh antyfrityktsyonnykh pokrytyi na detaly / V .Y. Balabanov, V.Yu. Bolhov, S.A. Yshchenko // Nanotekhnologyy, ekologiya, proyzvodstvo. - 2010. No. 1, pp. 104–107.
8. 8.Sorokyn V.M. Uprochneniye poverkhnostei valov sovmeshchennym natiraniyem antyfrityktsyonnykh pokrytyi y PPD/ V.M.Sorokyn, S.S.Tanchuk, A.V.Mykheev y dr.// Uprochniayushcheye tekhnologyy y pokrytya. – 2011. No. 2, pp. 38–43.
9. 9.Cherkun V.V. Povysheniye yznosostoikosty vneshnykh tsylindricheskykh poverkhnostei treniya detalei hydroahrehatov putem pryimeneniya fynyshnoi antyfrityktsyonnoi bezabrazyvnoi vybratsyonnoi obrabotky (FABVO) / V. V. Cherkun // Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. - 2013. - № 2. - S. 138-140. No. 2, pp. 138–140.
10. Shepelenko Y. V. Obrazovaniye antyfrityktsyonnoho pokrytya fynyshnoi antyfrityktsyonnoi bezabrazyvnoi vybratsyonnoi obrabotkoi / Y. V. Shepelenko, V. V. Cherkun // Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. - 2013. - № 3. - S. 99-104. No. 3, pp. 99–104.

Рецензія/Peer review : 13.05.2018 р. Надрукована/Printed :13.07.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Олександренко В.П.