

УДК 539.538: 539.621

DOI: 10.18372/0370-2197.2(91).15524

М. В. ЧЕРНЕЦЬ, А. О. КОРНІЄНКО, А. О. ІЩЕНКО, О. В. РАДІОНЕНКО

¹Національний авіаційний університет, Київ²Приазовський державний технічний університет, Маріуполь

ТРИБОЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПОЗИТНОГО АНТИФРИКЦІЙНОГО ПОЛІМЕРУ ДК6 ТА ДК6+БРОНЗА ДЛЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ КОВЗАННЯ

Наведено методикку модельних трибоекспериментальних досліджень композитів ДК6 та ДК6+Бронза в парі зі сталлю 45 при терті ковзання за схемою торцевого тертя. Встановлено експериментально їх індикатори зносостійкості, за якими визначено характеристики їх зносостійкості при сухому терті ковзання, як базові характеристики математичної моделі дослідження кінетики зношування матеріалів при терті ковзання. Також за даними проведених досліджень побудовано їх діаграми зносостійкості, як графічні індикатори зносостійкості у прийнятому діапазоні питомих сил тертя. Встановлено, що ДК6, наповнений бронзовим порошком, матиме вищу зносостійкість від композиту ДК6 до 38% при достатньо значних питомих силах тертя. Подано також результати визначення коефіцієнтів тертя ковзання. Встановлено, що у трибопарі композит ДК6+Бронза – сталь буде децю нижчий коефіцієнт тертя ковзання (до 6%), ніж у трибопарі композит ДК6 – сталь.

Ключові слова: методика визначення експериментальних індикаторів зносостійкості, сухе тертя ковзання, полімерні композити підвищеної твердості ДК6 та ДК6+Бронза, характеристики їх зносостійкості, металополімерна пара тертя, коефіцієнт тертя ковзання

Вступ. Для оцінки зносостійкості матеріалів, зокрема у гібридних поєднаннях, в практиці застосовують різні методики і силові схеми проведення трибоекспериментальних досліджень. Умови їх проведення та схеми подано у стандарті ISO 7148-2 [1]. Однією з широко вживаних схем є схема торцевого тертя. Її перевага над іншими, поданими у цьому стандарті схемам, полягає у забезпеченні постійних умови тертя і зношування протягом усього експерименту. Тому результати таких досліджень найбільш об'єктивно відображають абсолютні та відносні характеристики (показники, індикатори) зносостійкості матеріалів досліджуваних трибопар при прийнятих умовах, що дозволяє проводити їх порівняльну оцінку. Тут використовують, як абсолютні – лінійне, масове та об'ємне зношування, так і відносні характеристики зносостійкості матеріалів – інтенсивність та швидкість зношування, інші специфічні показники зносостійкості. Вказані кількісні характеристики зносостійкості матеріалів визначаються при питомих нормальних навантаженні у трибопарі.

Згідно стандарту ISO 7148-2 тестування зношування матеріалів у трибоекспериментальних дослідженнях проводять при визначеній величині контактної тиску у трибопарі. Однак у розрахункових методах зношування трибомеханічних систем ковзання зазначені відносні числові характеристики зносостійкості, які визначено при одному рекомендованому стандартному навантаженні, не можуть бути використані обґрунтовано для більшого діапазону зміни навантаження трибоконтакту. Для цього слід провести модельні трибоекспериментальні дослідження трибопар в достатньо широкому діапазоні зміни навантажень і за їх результатами встановити базові характеристики (індикатори) зносостійкості,

передбачені у математичних моделях кінетики зношування трибосистем. Власне така необхідність виникає у авторських розрахункових методах підшипників ковзання і різного виду зубчастих передач з металевих матеріалів [2 – 7] та цього виду металополімерних вузлів тертя [8 – 11].

У статті подано результати досліджень за методикою модельних трибоекспериментів [2, 8, 9] по встановленню показників (індикаторів) зносостійкості полімерних композитів ДК6 [12] та ДК6+Бронза у парі зі сталлю 45, які використовуються для трибомеханічних систем ковзання.

Експериментальне дослідження зносостійкості. Для дослідження зносостійкості вказаних полімерних композитів використано схему торцевого тертя (три композитні стержні – сталевий диск), при якій забезпечуються незмінні умови тертя і зношування протягом експерименту. Практична реалізація трибоекспериментів була виконана на машині тертя, схема якої подана на рис. 1.

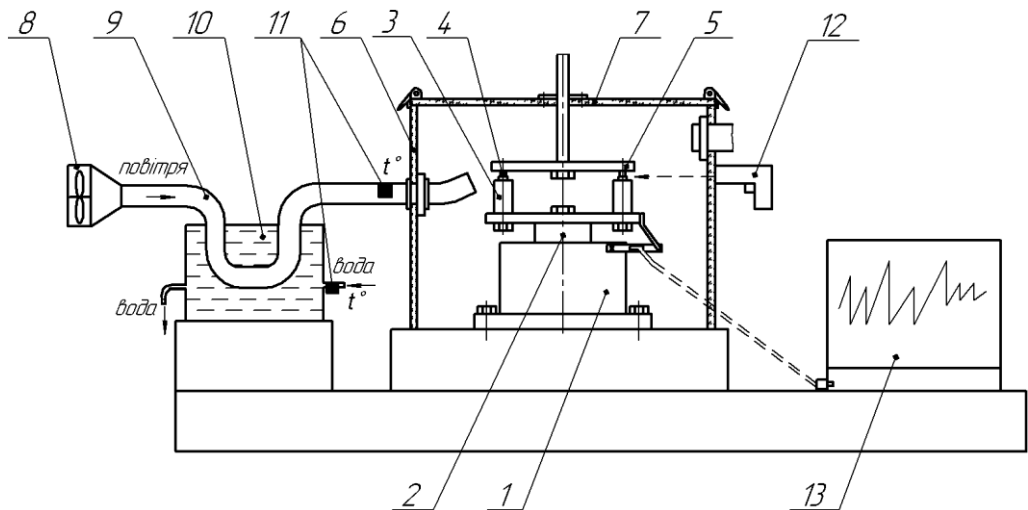


Рис. 1. Схема експериментальної установки торцевого тертя: 1 – корпус вузла тертя з упорним підшипником ковзання; 2 – рухома вісь зі зразкотримачами; 3 – зразкотримач; 4 – полімерний зразок; 5 – контрзразок; 6 – бокс; 7 – знімна кришка; 8 – нагнітач повітря; 9 – повітревідвід; 10 – водяний теплообмінник; 11 – термодатчики; 12 – пірометр; 13 – комп'ютер

Дослідження металополімерних пар проводились при сухому терті за наступною програмою: контактний тиск $p = 2, 4, 6$ МПа, швидкість ковзання $v = 0,4$ м/с, тривалість експерименту $t = 5$ год., діаметр пальцевого зразка $d = 3$ мм. У результаті експерименту визначено лінійне зношування h_i зразків.

В наступному обчислено дослідні індикатори зносостійкості – функції зносостійкості Φ_i таким чином:

$$\Phi_i = L_i / h_i, \quad (1)$$

де $L = vt$ – шлях тертя.

Питому силу тертя τ , рівень якої визначає швидкість зношування елементів досліджуваної трибосистеми, обчислено за формулою Амонтона-Кулона

$$\tau = fp, \quad (2)$$

де τ_i – дискретні величини питомих сил тертя при ступенях $i = 1, 2, 3$ навантаження, f – коефіцієнт тертя ковзання; p – номінальний контактний тиск.

З метою використання результатів модельних трибоекспериментальних досліджень у авторському розрахунковому методі [2 - 11] для оцінки зношування трибомеханічних систем ковзання проведено визначення базових характеристик зносостійкості для математичної моделі дослідження кінетики зношування матеріалів при терті ковзання [2, 3, 6, 8] за дискретними дослідними індикаторами зносостійкості – функціями зносостійкості $\Phi_i(\tau_i)$. Для цього проведено їх апроксимацію такого виду функцією [2, 3]:

$$\Phi_k(\tau) = B_k \frac{\tau_{k0}^{m_k}}{(\tau - \tau_{k0})^{m_k}}, \quad (3)$$

де B_k, m_k, τ_{k0} – характеристики зносостійкості матеріалів досліджуваної трибопари, які визначаються за методом найменших квадратів, $k = 1; 2$ – нумерація елементів трибопари.

Подана характеристична функція зносостійкості $\Phi_k(\tau)$ прийнята базовим інтегральним параметром розробленої згаданої математичної моделі зношування.

У результаті відповідної обробки експериментальних даних визначено характеристики зносостійкості досліджуваних композитів в парі зі сталлю:

- ДК6: $B_{\text{ДК6}} = 6.55 \cdot 10^{11}$, $m_{\text{ДК6}} = 2.5$, $\tau_0 = 0.05$ МПа,
- ДК6+Бронза: $B_{\text{ДК6+}} = 3.7 \cdot 10^{11}$, $m_{\text{ДК6+}} = 2.3$, $\tau_0 = 0.05$ МПа.

На рис. 2 показано як дані експериментальних досліджень (індикаторів зносостійкості $\Phi_i(\tau_i)$) обох композитів відповідними маркерами, так і зображено діаграми їх зносостійкості $\Phi(\tau) \sim \tau$, як графічні індикатори порівняльної зносостійкості цих матеріалів у досліджуваному діапазоні питомих сил тертя.

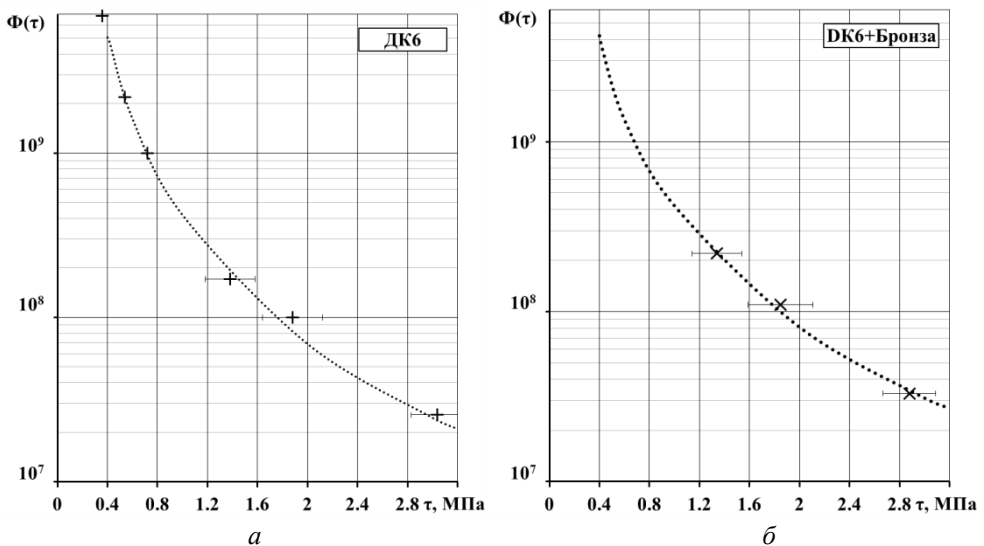


Рис. 2. Діаграми зносостійкості полімерних композитів ДК6 та ДК6+Бронза

Експериментальні значення функції зносостійкості Φ_i ДК6, подані зліва вверху на рис. 1. *a*, отримані у результаті досліджень при граничному терті при коефіцієнті тертя $f = 0.06 \dots 0.07$.

На рис. 3 подано порівняння обох діаграм зносостійкості досліджених композитів.

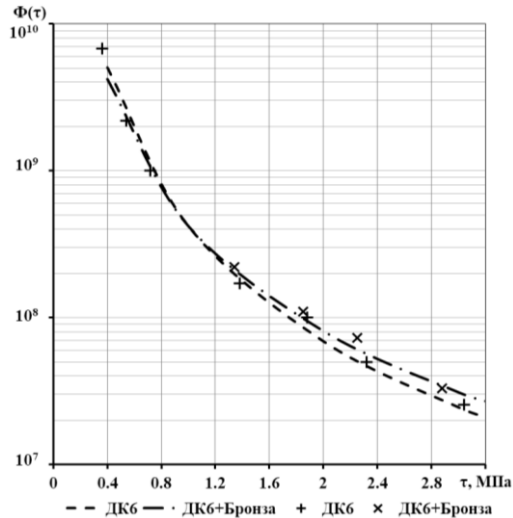


Рис. 3. Порівняння графічних індикаторів зносостійкості полімерних композитів ДК6 та ДК6+Бронза

При збільшенні навантажень на трибосистему, тобто більших питомих силах тертя, зносостійкість композиту ДК6+Бронза перевищуватиме зносостійкість композиту ДК6 до 38%. За поданими порівняльними графічними індикаторами (діаграмами) зносостійкості легко встановити відносну зносостійкість досліджених матеріалів при довільній величині питомих сил тертя. Також шляхом екстраполяції можливо встановити передбачувану зносостійкість матеріалу при більших питомих силах тертя, ніж вони були при трибоекспериментальних дослідженнях (маркери). Вказана властивість графічного індикатора зносостійкості матеріалу є вельми корисною, оскільки при трибоекспериментальних дослідженнях часом важко, а то і неможливо, забезпечити вищі значення питомих сил тертя, які реально виникають у триботехнічних системах ковзання.

Важливою характеристикою процесу трибоконтактної взаємодії при терті ковзання є коефіцієнт тертя ковзання f , величини якого встановлено при проведенні трибоекспериментальних досліджень. Відповідно на рис. 4 наведено їх зміну зі зростанням контактних тисків, де верхні криві відповідають f_{\max} , середні – $f_{\text{сер}}$, нижні – f_{\min} .

При зростанні питомого навантаження спостерігається різке зниження коефіцієнтів тертя обох композитів. Має місце варіація значень f , особливо при менших тисках.

На рис. 5 подано середні значення коефіцієнтів тертя ковзання f .

У випадку композиту ДК6+Бронза, наповненого бронзовим порошком, спостерігається дещо менший середній коефіцієнт тертя у всьому діапазоні зміни контактних тисків (до 6%), при вищій зносостійкості.

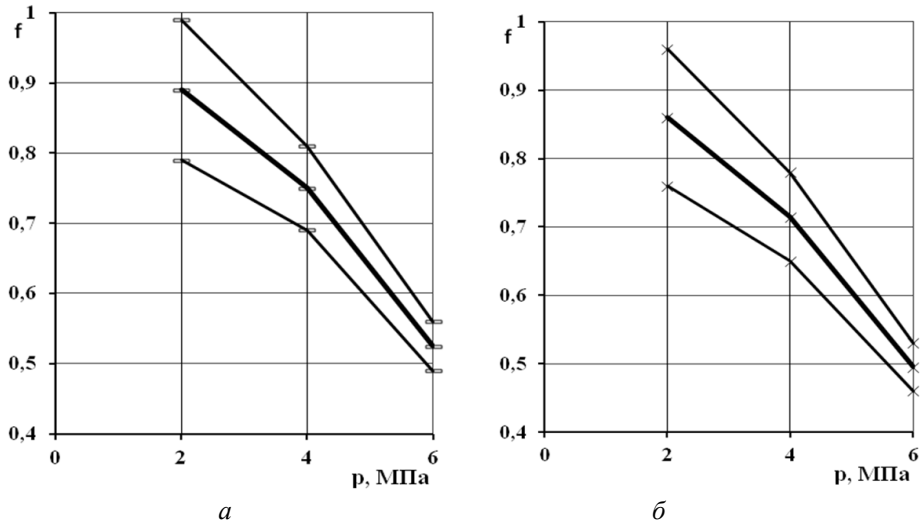


Рис. 4. Залежність коефіцієнту тертя ковзання від контактного тиску:
 a – ДК6, b – ДК6+Бронза

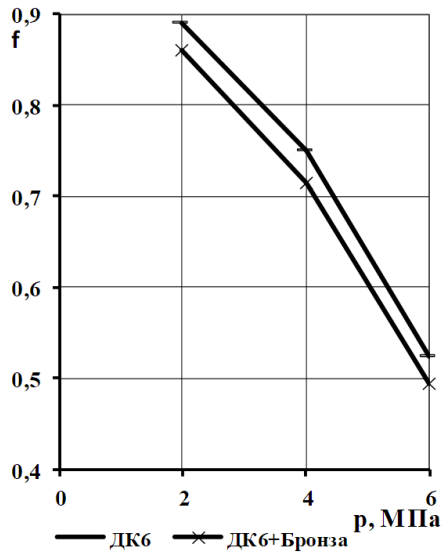


Рис. 5. Зміна середнього коефіцієнту тертя

Висновки. Проведені модельні трибоекспериментальні дослідження композитних матеріалів при терті ковзання за поданою методикою вказують на кращі триботехнічні властивості композиту ДК6+Бронза, наповненого бронзовим порошком, від базового композиту ДК6. А встановлені характеристики їх зносостійкості B, m, τ_0 можливо використати для прогнозування зношування і довговічності металополімерних підшипників ковзання чи напрямних за вказаним розрахунковим методом, в основу якого покладено математичну трибокінетичну модель дослідження кінетики зношування матеріалів при терті ковзання.

Список літератури

1. International Standard ISO 7148-2. Plain bearings – testing of the tribological behaviour of bearings materials. Part 2. Testing of polymer – based bearing materials. 10.01.2012.

2. Чернець М., Пашечко М., Невчас А. Методи прогнозування та підвищення зносостійкості триботехнічних систем ковзання. В 3-х томах. Т.1. Дослідження та розрахунок трибосистем ковзання, методи підвищення довговічності і зносостійкості. - Дрогобич: КОЛО, 2001.– 492 с.
3. Чернець М.В. Трибоконтактні задачі для циліндричних з'єднань з технологічною некрутлістю. – Люблін: Вид. Люблінської політехніки, 2013. – 274 с.
4. Чернець М., Келбінські Ю. Вплив нахилу зубів косозубих циліндричних передач на трибомеханічні, силові на кінематичні характеристики // Проблеми трибології. – 2006. - №4. – С. 3 – 7.
5. Чернець М.В., Ярема Р.Я. Прогнозування довговічності черв'ячних передач з архімедовим та евольвентним черв'яком // Проблеми трибології. – 2011. – №2. – С. 21 – 25.
6. Chernets M., Chernets Ju. Generalized method for calculating the durability of sliding bearings with technological out-of-roundness of details // Proc. JMachE. Part J: Journal of Engineering Tribology . -2015. – Vol. 229, №2. – pp. 216 – 226.
7. Chernets M., Chernets Ju. The simulation of influence of engagement conditions and technological teeth correction on contact strength, wear and durability of cylindrical spur gear of electric locomotive // Proc. JMachE. Part J: Journal of Engineering Tribology, 2017; Vol. 231, No 1, p.57 – 62.
8. Чернец М.В., Шилько С.В., Пашечко М.И., Барщ М. Износостойкость стекло – и угленаполненных полиамидных композитов для металлополимерных зубчатых передач // Трение и износ. – 2018. – Т. 39, № 5. – С. 457-461.
9. Chernets, M., Kindrachuk, M., Kornienko, A., Yurchuk, A. Experimental Estimation of Wear Resistance of Polyamide Composites, Reinforced by Carbon and Glass Fibres Used in Metal-Polymer Gearings. Acta Mechanica et Automatica, 2020, 14(4), pp. 206–210.
10. Czerniec M., Kornienko A. Prediction of the Service Life of Metal-Polymer Gears Made of Glass and Carbon Fibre-Reinforced Polyamide, Considering the Impact of Height Correction // Advances in Science and Technology Research Journal. - 2020, Vol. 14, Issue 3. - pages 15–21.
11. Чернець М. В., Корнієнко А. О., Федорчук С. В., Радіоненко О. В. Розрахункова оцінка ресурсу циліндричних і плоских металлополімерних напрямних ковзання при граничному терті // Проблеми тертя та зношування. – 2020. – №4. – С. 4 – 11.
12. Стругинский Б.В., Радионенко А.В., Ищенко Е.А. Триботехнические исследования полимерных композитов, применяемых при восстановлении направляющих станков // Проблеми тертя та зношування: –2015. – Вип.№2 (67). – С. 4 – 10.

Стаття надійшла до редакції 07.05.2021.

Чернець Мирон Васильович – докт. техн. наук, професор, Національний авіаційний університет, Київ, Україна; myron.czerniec@gmail.com

Корнієнко Анатолій Олександрович – канд. техн. наук, доцент, Національний авіаційний університет, Київ, Україна, anatoliy_k@ukr.net

Ищенко Анатолій Олексійович - д-р техн. наук, професор кафедри «Механічне обладнання заводів чорної металургії», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», ischenko50@ukr.net

Радіоненко Олександр Васильович - канд. техн. наук, доцент кафедри «Технологія машинобудування» ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», radav50mar@gmail.com.

M. V. CHERNETS, A. O. KORNIENKO, A. O. ISHCHEKO, O. V. RADIONENKO

TRIBOEXPERIMENTAL STUDIES OF COMPOSITE ANTIFRICTION POLYMER DK6 AND DK6 + BRONZE FOR TRIBOTECHNIC SLIDING SYSTEMS

The method of model triboexperimental researches of composites DK6 and DK6 + Bronze in pair with steel 45 at sliding friction according to the scheme of end friction is given. Their wear-resistance indicators were experimentally established, according to which the characteristics of their wear resistance at dry sliding friction were determined, as the basic characteristics of the mathematical model of studying the wear kinetics of materials at sliding friction. Also, according to the research, their wear resistance diagrams are constructed as graphical indicators of wear resistance in the accepted range of specific friction forces. It was found that DK6 filled with bronze powder will have a higher wear resistance than DK6 composite up to 38% at a sufficiently specific friction forces. The results of determining the coefficients of sliding friction are also given. It was found that in the tribocouple composite DK6 + Bronze - steel the coefficient of sliding friction will be slightly lower (up to 6%) than in the tribocouple composite DK6 - steel.

Keywords: method of determining experimental indicators of wear resistance, dry sliding friction, polymer composites of high hardness DK6 and DK6 + Bronze, characteristics of their wear resistance, metal-polymer friction pair, sliding friction coefficient

Referenses

1. International Standard ISO 7148-2. Plain bearings – testing of the tribological behaviour of bearings materials. Part 2. Testing of polymer – based bearing materials. 10.01.2012.
2. Chernets M., Pashechko M., Nevchas A. Metody prohnozuvannia ta pidvyshchennia znoso-stiikosti trybotekhnichnykh system kovzannia. V 3-kh tomakh. T.1. Doslidzhennia ta rozrakhunok trybosystem kovzannia, metody pidvyshchennia dovhovichnosti i znosostiikosti. - Drohobych: KOLO, 2001.– 492 s.
3. Chernets M.V. Trybokontaktni zadachi dlia tsylindrychnykh ziednan z tekhnolohichnoiu nekrulhlistiu. – Lublin: Vyd. Liublinskoi politekhniki, 2013. – 274 s.
4. Chernets M., Kelbinski Yu. Vplyv nakhyly zubiv kosozubykh tsylindrychnykh peredach na trybomekhanichni, sylovi na kinematychni kharakterystyky // Problemy trybolohii. – 2006. - №4. – S. 3 – 7.
5. Chernets M.V., Yarema R.Ia. Prohnozuvannia dovhovichnosti cherviachnykh peredach z arkhimedovym ta evolventnym cherviakom // Problemy trybolohii. – 2011. – №2. – S. 21 – 25.
6. Chernets M., Chernets Ju. Generalized method for calculating the durability of sliding bearings with technological out-of-roundness of details // Proc. JMechE. Part J: Journal of Engineering Tribology . -2015. – Vol. 229, №2. – pp. 216 – 226.
7. Chernets M., Chernets Ju. The simulation of influence of engagement conditions and technological teeth correction on contact strength, wear and durability of cylindrical spur gear of electric locomotive // Proc. JMechE. Part J: Journal of Engineering Tribology, 2017; Vol. 231, No 1, p.57 – 62.
8. Chernets M.V., Shylko S.V., Pashechko M.Y., Barshch M. Yznosostoikost steklo – y uhlenapolnennikh polyamydnykh kompozytov dlia metallopolymernykh zubchatikh peredach // Trenye y yznos. – 2018. – T. 39, № 5. – S. 457-461.
9. Chernets, M., Kindrachuk, M., Kornienko, A., Yurchuk, A. Experimental Estimation of Wear Resistance of Polyamide Composites, Reinforced by Carbon and Glass Fibres Used in Metal-Polymer Gears. Acta Mechanica et Automatica, 2020, 14(4), pp. 206–210.
10. Czerniec M., Kornienko A. Prediction of the Service Life of Metal-Polymer Gears Made of Glass and Carbon Fibre-Reinforced Polyamide, Considering the Impact of Height

Correction // *Advances in Science and Technology Research Journal*. - 2020, Vol. 14, Issue 3. - pages 15–21.

11. Chernets M.V., Korniienko A.O., Fedorchuk S.V., Radionenko O.V. Rozrakhunkova otsinka resursu tsylindrychnykh i ploskykh metalopolimernykh napriamnykh kovzannia pry hra-nychnomu terti // *Problemy tertia ta znoshuvannia*. – 2020. – №4. – S. 4 – 11.

12. Strutynskyi B.V., Radyonenko A.V., Yshchenko E.A. Trybotekhnicheskye yssledovaniia polymernikh kompozytov, pryeniaemikh pry vosstanovleny napravliaiushchykh stankov // *Problemy tertia ta znoshuvannia*: –2015. – Vyp.№2 (67). – S. 4 – 10.