

УДК 667.637.222

DOI: 10.25140/2411-5363-2020-4(22)-28-34

*Антон Клименко, Володимир Анісімов, Володимир Ситар***РОЗРОБКА ТОНКОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ФЕНІЛОНУ ДЛЯ ЗАХИСТУ ПОВЕРХОНЬ ВІД ГАЗО- ТА ГІДРОАБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ**

*Актуальність теми дослідження.* Завдання збільшення зносостійкості деталей і вузлів тертя зумовлене тенденцією до підвищення їхньої продуктивності, а отже, робочих навантажень, швидкостей, температур та інших параметрів.

*Постановка проблеми.* Для покращення експлуатаційних характеристик вузлів тертя необхідно використовувати матеріали, які поєднують добрі адгезійні та антифрикційні властивості.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Відома значна кількість публікацій про матеріали з підвищеними антифрикційними властивостями та окремо з підвищеними адгезійними властивостями.

*Виділення недосліджених частин загальної проблеми.* Відсутні відомості про матеріали, які поєднували б високі адгезійні властивості та гарні антифрикційні властивості в якості поверхонь, що піддаються газо- та гідроабразивному зношуванню.

*Постановка завдання.* Метою роботи є дослідити сукупність адгезійних та антифрикційних властивостей матеріалів на основі фенілону.

*Виклад основного матеріалу.* Досліджено адгезійну здатність фенілону до класичних матеріалів частин машин та його зносостійкість при газо- та гідроабразивному зношуванні. Ця залежність величини та інтенсивності зношування від куту атаки абразивного матеріалу.

*Висновки відповідно до статті.* Встановлено, що незалежно від режиму роботи найбільше зношування покриттів на основі фенілону відбувалося при кутах 45-60°, та починаючи з кута атаки в 45° змінювався механізм зношування з мікрорізання на вибиття полімеру посередині досліджуваного зразка. При обох режимах роботи покриття на основі фенілону виявилися досить стійкими, що вказує на можливість використання фенілону як покриття для захисту від газоабразивного зношування. Але необхідні подальші дослідження, що будуть більш наближені до реальних умов експлуатації, з пошуком наповнювачів для підвищення зносостійкості та адгезійної здатності покриття на основі фенілону.

*Ключові слова:* фенілон; адгезія; зношування; покриття; поверхня.

*Рис.: 6. Табл.: 2. Бібл.: 6.*

**Актуальність теми дослідження.** Довговічність деталей і вузлів устаткування, пов'язаного з переробкою і транспортуванням абразивних матеріалів, визначається насамперед зносостійкістю їхніх робочих поверхонь. Аналіз досвіду експлуатації показує, що термін працездатності таких деталей машин дуже малий і може становити навіть одну або декілька робочих змін.

**Постановка проблеми.** Жорсткість режимів експлуатації машин, що зумовлена тенденцією до підвищення їхньої продуктивності, а отже, навантажень, швидкостей, температур та інших параметрів, потребує збільшення зносостійкості деталей і вузлів тертя [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Зношування є складним процесом, залежним від двох взаємопов'язаних груп факторів. З одного боку, процес зношування визначається умовами роботи деталі або вузла з урахуванням прикладених навантажень, швидкості переміщення, агресивності середовища й температури експлуатації, з іншого боку, він залежить також від здатності металу протидіяти дії навантажень, що визначається його хімічним складом, термічною обробкою, структурою і отриманими в результаті цього механічними властивостями. Процес зношування деталей або вузлів переважно неоднозначний та залежить від великої кількості факторів. Умови роботи більшості деталей (вузлів) визначають наявність одразу кількох видів зношування, одні з яких призводять безпосередньо до руйнування поверхневого шару, а інші – не викликають безпосереднього відокремлювання частинки матеріалу, однак сприяють прискоренню цього процесу. Систематизація умов роботи, які призводять до зношування деталей, дозволила класифікувати різні види зношування за трьома групами (рис. 1) [2].

Із перелічених видів зношування інтерес становить гідро- та газоабразивне зношування.

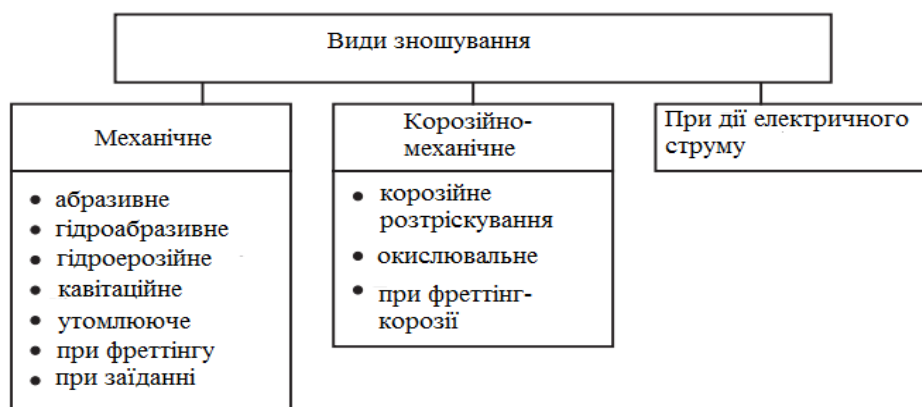


Рис. 1. Класифікація видів зношування

Зношування матеріалів під дією твердих часток у потоках рідини чи газу, незважаючи на різні стани середовищ, мають багато спільного. Вплив абразивної частинки, яка переноситься повітряним чи рідинним потоком, на поверхню тертя супроводжується або ударом із наступним утворенням лунок, або ковзанням, що формує подряпини. Рівень динамічного впливу і макрорельєф поверхні тертя передусім залежить від орієнтації газо- чи гідроабразивного потоку до поверхні, або так званим кутом атаки (рис. 2) [2].

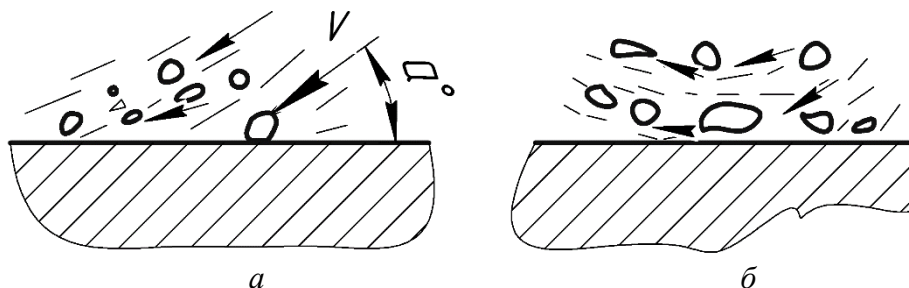


Рис. 2. Схеми зношування:  
а – газоабразивного; б – гідроабразивного

Аналіз відмов вузлів і деталей обладнання показує, що надійність і довговічність машин і апаратів здебільшого лімітується не загальною міцністю деталей, а зношуванням найбільш навантажених поверхонь.

Зміцнення поверхонь зазвичай пов'язують із підвищенням міцнісних властивостей металу поверхневого шару. Більшість методів зміцнення як поверхневого шару, так і виробу загалом викликають збільшення в металі кількості дефектів кристалічної будови. Зі збільшенням щільності дефектів у кристалічній ґратці їх переміщення під дією зрушуючих зусиль загальмовується, зростають напруження, необхідні для зсування однієї частини кристала щодо іншої, що сприяє підвищенню показників міцності [3].

Однак збільшення кількості дислокацій і дефектів кристалічної ґратки може призвести до переходу в крихкий стан та небезпеки виникнення та розвитку тріщин. Також недоліком є велика трудомісткість процесу зміцнення та висока вартість деяких способів. Тому виникає необхідність у пошуку нових прогресивних способів підвищення зносостійкості. Одним із таких способів є нанесення полімерних покриттів.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Перспективною групою полімерних матеріалів є ароматичні поліаміди. Найбільш цікавим представником ароматичних поліамідів є фенілон.

Відомо, що фенілон має чудові фізико-механічні показники та добре проявив себе як антифрикційний матеріал. Тому великий інтерес становить використання фенілону як захисного покриття з дослідженням його адгезійних властивостей до класичних матеріалів проточних частин машин та його зносостійкості.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження сукупності адгезійних та антифрикційних властивостей матеріалів на основі фенілону.

**Методика досліджень.** Полімерні покриття отримували шляхом нанесення на металеву поверхню розчину з наступним випаровуванням розчинника. Як субстрат обрано металеві матеріали, які застосовують для отримання зносостійких функціональних поверхонь. Як розчинник використовували диметилформамід (ДМФА).

Рівень адгезії фенілонового покриття до субстрату встановлювали методом нерівномірного відшарування на спеціально розробленій установці, що дозволяє визначити зусилля, яке необхідно прикласти для відшарування плівки певної ширини від металевої поверхні при постійній швидкості відшарування (рис. 3).

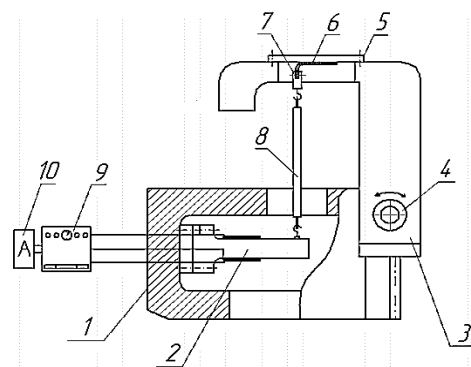


Рис. 3. Схема установки для визначення міцності адгезійного з'єднання при відшаруванні:

1 – станина; 2 – тензометрична балка; 3 – рухома каретка; 4 – руків'я привода каретки; 5 – підложка покриття; 6 – досліджуване покриття; 7 – затискач; 8 – тяга; 9 – тензометричний підсилювач; 10 – реєструючий прилад (мікроамперметр)

Зносостійкість покриттів оцінювали в умовах жорсткого газоабразивного зношування потоком піску з розміром часток 0,5–0,9 мм при швидкості 76 м/с згідно з ГОСТ 23.201-78 на відцентровому прискорювачі твердих часток під різними кутами атаки абразиву: 15°, 30°, 45°, 60° і 90°. Відповідно до загальноприйнятої класифікації видів зношування [4] такі умови випробувань належать до високошвидкісного контактно-динамічного навантаження (швидкість потоку частинок >60 м/с).

Досліджено вплив природи наповнювача та модифікатора на зносостійкість розроблених покриттів.

**Виклад основного матеріалу.** Відомо, що фенілон має низький рівень адгезії до сталевих субстратів. Авторами роботи [5] досліджено адгезійну здатність фенілону до металевих субстратів різної природи, але серед них не було матеріалів, з яких виготовляються ротори промислових центрифуг. Тому дослідження адгезії до цих матеріалів становить інтерес.

Для встановлення адгезійної здатності фенілонового покриття використовувались субстрати з класичних матеріалів (40X, 08X18H9T, 12X18H10T та їхні аналоги). Результати представлені на рис. 4.

Як можна побачити на рис. 4, рівень адгезійної міцності не є достатнім для того, щоб покриття добре трималося. Тому було вирішено обміняти субстрати згідно з [6].

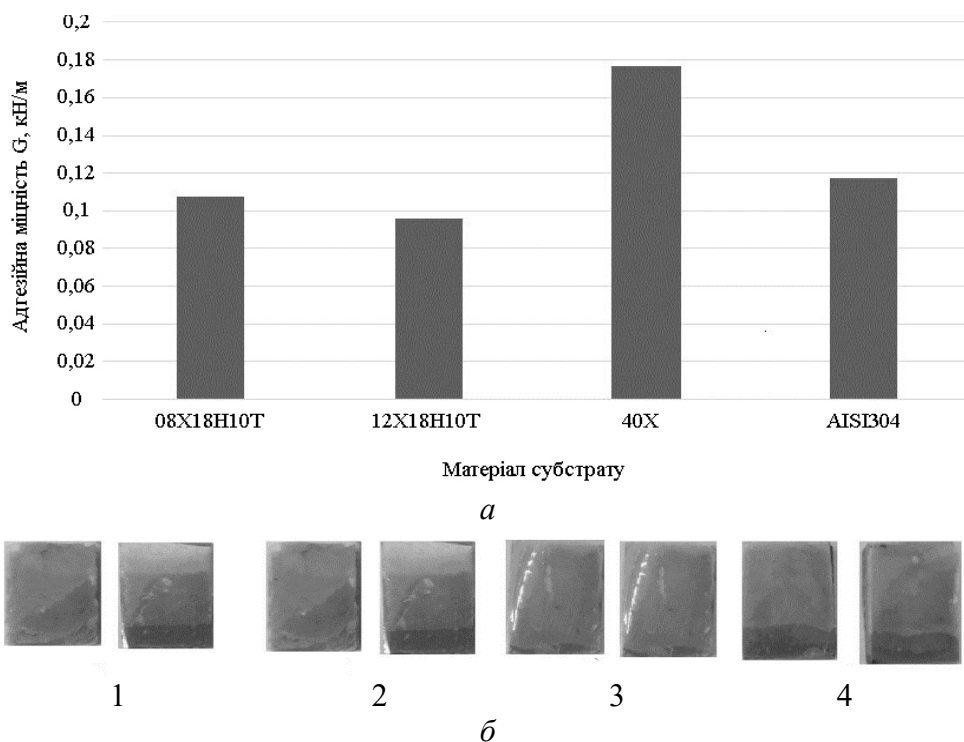


Рис. 4. Адгезія фенілону до класичних матеріалів проточних частин машин:  
 а – гістограма адгезійної міцності; б – фото зразків;  
 1 – 12X18H10T; 2 – 08X18H9T; 3 – AISI 304; 4 – 40X

Встановлено, що максимальне зношування фенілону, незалежно від режиму роботи, відбувається при куті атаки в  $45\text{--}60^\circ$ , що необхідно враховувати при експлуатації. Результати досліджень представлені на рис. 5 та 6 і табл. 1 та 2.

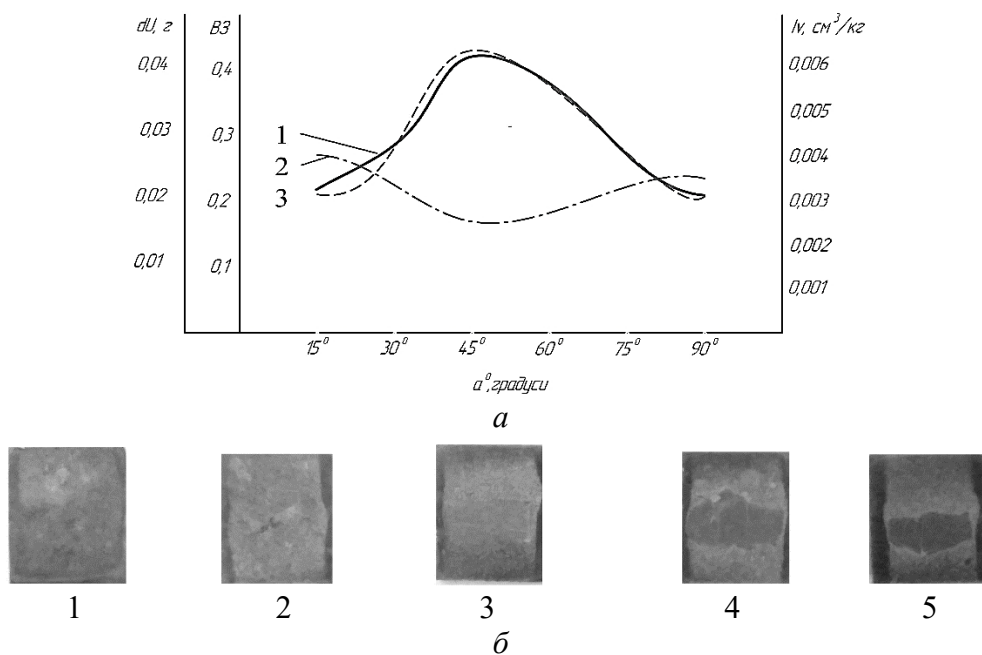


Рис. 5. Вплив кута атаки абразиву на величину зношування ( $dU$ ), інтенсивність зношування ( $Iv$ ), відносну зносостійкість ( $B3$ ) та поверхню покриття  $n = 6000 \text{ хв}^{-1}$ :  
 а – графік залежностей, 1 –  $dU(\alpha)$ ; 2 –  $B3(\alpha)$ ; 3 –  $Iv(\alpha)$ ;  
 б – фото зразків; 1 –  $15^\circ$ ; 2 –  $30^\circ$ ; 3 –  $45^\circ$ ; 4 –  $60^\circ$ ; 5 –  $90^\circ$

Таблиця 1

Зносостійкість покриттів на основі фенілону при різних кутах атаки абразиву  
при  $n = 6000 \text{ хв}^{-1}$

Густина композита $\text{г/см}^3$	Кут атаки, градуси	Зношування		Відносна зносостійкість (відносно 12Х18Н10Т)	Інтенсивність зношування, $\text{см}^3/\text{кг}$
		$\text{г}$	$\text{см}^3$		
1,350	15	0,02125	0,0157	0,267	0,00314
	30	0,0279	0,02066	0,233	0,00413
	45	0,04105	0,0304	0,170	0,00608
	60	0,0381	0,0282	0,183	0,00564
	90	0,02075	0,0154	0,246	0,00308

Таблиця 2

Зносостійкість покриттів на основі фенілону при різних кутах атаки абразиву  
при  $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$

Густина композита $\text{г/см}^3$	Кут атаки, градуси	Зношування		Відносна зносостійкість (відносно 12Х18Н10Т)	Інтенсивність зношування, $\text{см}^3/\text{кг}$
		$\text{г}$	$\text{см}^3$		
1,350	15	0,0076	0,00562	0,210	0,00014
	30	0,01285	0,0095	0,172	0,000238
	45	0,01665	0,01233	0,148	0,00031
	60	0,01345	0,00996	0,171	0,00025
	90	0,00585	0,00433	0,175	0,00011

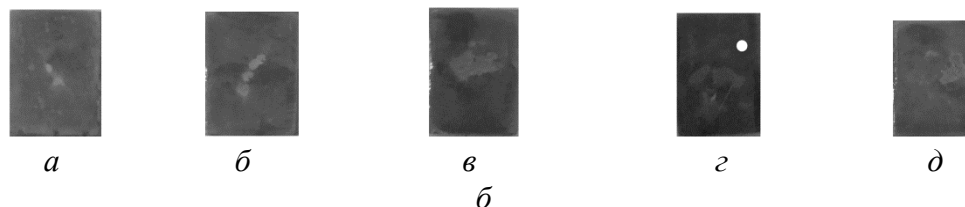
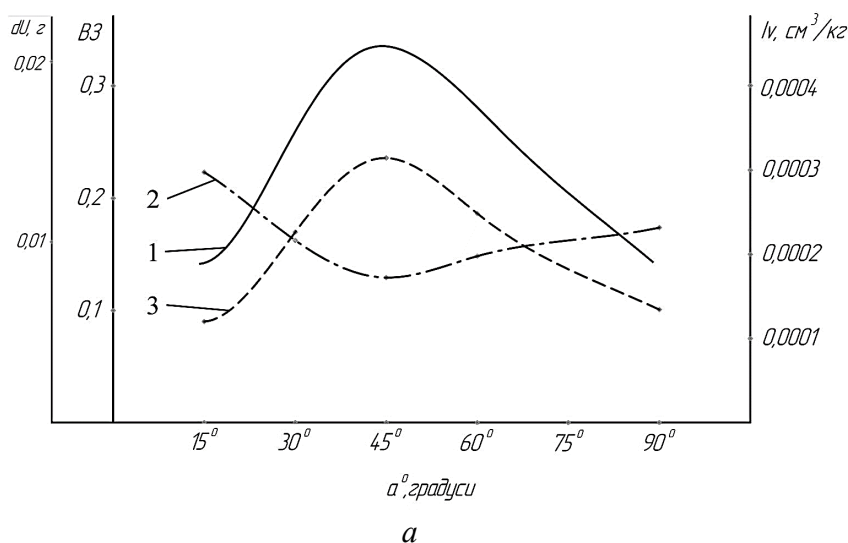


Рис. 6. Вплив кута атаки абразиву на величину зношування ( $dU$ ), інтенсивність зношування ( $Iv$ ), відносну зносостійкість ( $BЗ$ ) та поверхню покриття  $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$ :  
а – графік залежностей; 1 –  $dU(\alpha)$ ; 2 –  $BЗ(\alpha)$ ; 3 –  $Iv(\alpha)$ ;  
б – фото зразків; 1 –  $15^\circ$ ; 2 –  $30^\circ$ ; 3 –  $45^\circ$ ; 4 –  $60^\circ$ ; 5 –  $90^\circ$

Також для обох режимів роботи характерна зміна механізму зношування при кутах атаки 45–90°.

При обох режимах роботи покриття на основі фенілолу виявилися досить стійкими, що вказує на можливість використання фенілолу як покриття для захисту від газоабразивного зношування.

**Висновки відповідно до статті.** Встановлено, що незалежно від режиму роботи найбільше зношування покриттів на основі фенілолу відбувалося при кутах 45–60°, та починаючи з кута атаки в 45° змінювався механізм зношування з мікрорізання на вибиття полімеру посередині досліджуваного зразка.

При обох режимах роботи покриття на основі фенілолу виявилися досить стійкими, що вказує на можливість використання фенілолу як покриття для захисту від газоабразивного зношування. Але необхідні подальші дослідження, що будуть більш наближені до реальних умов експлуатації, з пошуком наповнювачів для підвищення зносостійкості та адгезійної здатності покриття на основі фенілолу.

#### Список використаних джерел

1. Пенкин Н. С., Капралов Е. П., Маляров П. В. Повышение износостойкости горно-обогатительного оборудования : монография. Москва : Недра, 1992. 265 с.
2. Виноградов В. Н., Сорокин Г. М. Износостойкость сталей и сплавов : уч. пособ. для вузов. Москва : Нефть и газ, 1994. 417 с.
3. Сорокин Г. М. Трибология сталей и сплавов: учебник для вузов. Москва : Недра, 2000. 317 с.
4. Газоабразивне зношування епоксидних композитів / Полоз О. Ю., та ін. *Вопросы химии и химической технологии*. 2012. № 1. С. 75–80.
5. Ситар В. І., Клименко А. В., Колесник Є. В. Адгезія фенілонових покриттів до металевих матеріалів різної природи. *Вопросы химии и химической технологии*. 2013. № 2. С. 37–41.
6. Спосіб нанесення полімерного покриття на металеву поверхню : пат. 107878 Україна : МПК В05D 1/38 (2006.01). № а 2013 09410 ; заявл. 29.07.2013 ; опубл. 25.02.2015, Бюл. № 4.

#### References

1. Penkin, N. S., Kapralov, E. P., & Malyarov P.V. (1992). *Povyshenie iznosostojkosti gorno-obogatitel'nogo oborudovanij [Increasing the wear resistance of mining and processing equipment]*. Nedra.
2. Vinogradov, V. N., & Sorokin, G. M. (1994). *Iznosostojkost staley i splavov [Wear resistance of steels and alloys]*. Neft i gaz.
3. Sorokin, G. M. (2000). *Tribologija staley i splavov [Tribology of steels and alloys]*. Nedra.
4. Poloz, O. Ju., Lypyskyi, S. H., Kushchenko, S. M., Semenets, O. A., & Ebich, Yu. R. (2012). *Hazoabrazivne znoshuvannia epoksydnykh kompozytiv [Gas-abrasive cleaning of epoxy composites]*. *Voprosy himii i himicheskoi tehnologii – Chemistry and chemical technology issues*, 1, pp. 75–80.
5. Sytar, V. I., Klymenko, A. V., & Kolesnyk, Ye. V. (2013). *Adheziia fenilonovykh pokryttiv do metalovykh materialiv riznoi pryrody [Adhesion of phenylene coatings to metallic materials of different nature]*. *Voprosy himii i himicheskoi tehnologii – Chemistry and chemical technology issues*, 2, pp. 37–41.
6. Klymenko, A. V., Sytar, V. I., Kolesnyk, Ye. V. (2015). *Sposib nanesennia polimernoho pokryttia na metalevu poverkhniu [The method of applying a polymer coating on a metal surface]*. Patent 107878 (UA), МПК В05D 1/38 (2006.01).

UDC 667.637.222

Anton Klymenko, Volodymyr Anisimov, Volodymyr Sytar

### DEVELOPMENT OF THIN-LAYER COATINGS BASED ON PHENYLON FOR PROTECTING SURFACES FROM GAS AND HYDROABRASIVE WEAR

**Relevance of the research topic.** The task of increasing the wear resistance of parts and friction units is due to the tendency to increase their productivity and, consequently, workloads, speeds, temperatures and other parameters.

**Formulation of the problem.** To improve the performance of friction joints, it is necessary to use materials that combine good adhesive and antifriction properties.

**Analysis of recent research and publications.** There are a significant number of publications on materials with high antifriction properties and separately with high adhesion properties.

**Selection of unexplored parts of the general problem.** There is no information on materials that would combine high adhesive properties and good antifriction properties as surfaces that are under gas and hydroabrasive wear.

**Setting objectives.** The aim of this research is to investigate the combination of adhesive and antifriction properties of phenylon-based materials.

**Presenting main material.** The adhesion ability of phenylon to classical materials of machines parts and its wear resistance at gas and hydroabrasive wear are investigated. The dependence of intensity of wearing from the angle of attack of the abrasive material is given.

**Conclusions in accordance to the article.** It was found that, independently of the mode of operation, the greatest wear of phenylon-based coatings occurred at angles of 45°-60°, and starting from the angle of attack of 45 ° changed the mechanism of wear from microcutting to knocking out the polymer in the middle of the test sample.

In both modes of operation, phenylon-based coatings were quite stable, which indicates the possibility of using phenylone as a coating to protect against gas-abrasive wear. But further research is needed, which will be closer to the real operating conditions, with the search for fillers to increase the wear resistance and adhesion of the coating based on phenylon.

**Key words:** phenylon; adhesion; wear, coating; surface.

**Fig.:** 6. **Table:** 2. **References:** 6.

**Клименко Антон Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інноваційної інженерії, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (просп. Гагаріна, 8, м. Дніпро, 49000, Україна).

**Klymenko Anton** – PhD in Technical Science, Associate Professor of innovative Engineering Department, Ukrainian State University of Chemical Technology (8 Gagarin Av., 49000 Dnipro, Ukraine).

**E-mail:** 03udhtu021990@ukr.net

**SCOPUS Author ID:** 57190270871

**Анісімов Володимир Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інноваційної інженерії, Державний вищий навчальний заклад Український державний хіміко-технологічний університет (просп. Гагаріна, 8, м. Дніпро, 49000, Україна).

**Anisimov Volodymyr** – PhD in Technical Science, Associate Professor of Innovative Engineering Department, Ukrainian State University of Chemical Technology (8 Gagarin Av., 49000 Dnipro, Ukraine).

**E-mail:** wwwovilon@gmail.com

**SCOPUS Author ID:** 57210901317

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4037-9698>

**Ситар Володимир Іванович** – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри інноваційної інженерії, Державний вищий навчальний заклад Український державний хіміко-технологічний університет (просп. Гагаріна, 8, м. Дніпро, 49000, Україна).

**Sytar Volodymyr** – PhD in Technical Science, Professor, Professor of Innovative Engineering Department, Ukrainian State University of Chemical Technology (8 Gagarin Av., 49000 Dnipro, Ukraine).

**E-mail:** v.sytar@ua.fm