

УДК 621.89:678.07

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-11>

ВПЛИВ ШВИДКОЗАГАРТОВАНИХ СПЛАВІВ AL-CO ТА AL-NI НА ПОКАЗНИК АБРАЗИВНОГО СТИРАННЯ ПОЛІЕФІРЕФІРКЕТОНУ

Томіна Анна-Марія Вадимівна,

кандидат технічних наук,

доцент кафедри фізики конденсованого стану

Дніпровського державного технічного університету

ORCID ID: 0000-0001-5354-0674

У роботі досліджено вплив дисперсних швидкозагартованих бінарних сплавів систем Al-Co та Al-Ni. Вміст Co і Ni в Al становив 10 мас. % при оцінюванні показника абразивного стирання поліефірефіркетону марки Victrex150 G. Установлено, що введення даних сплавів у кількості 5–25 мас. % призводить до зменшення цього показника у 1,8 раза, що свідчить про ефективне зміцнення полімерного композиту. Підвищення зносостійкості поліефірефіркетону пояснюється зменшенням пружно-пластичних деформацій у приповерхневих шарах, що сприяє вповільненню процесів зародження та розвитку мікротріщин, а також локальних зон руйнування, підтвердженням чого є зменшення шорсткості поверхні у 1,7 раза. Виявлено, що ефективний вміст дисперсних бінарних сплавів у складі композиту становить 20 мас. %, за якого досягаються мінімальні значення показника абразивного стирання та шорсткості поверхні. Подальше збільшення вмісту дисперсного наповнювача до 25 мас. % призводить до зниження ефективності зміцнення внаслідок агломерації часток сплавів і формування структурних дефектів у полімерній матриці. Підтвердженням цього є зменшення мікротвердості в зоні межі поділу «полімер – наповнювач». Отримані результати свідчать про перспективність використання швидкозагартованих бінарних сплавів систем Al-Co та Al-Ni для створення нових полімерних композитів із високою зносостійкістю до дії абразивних часток. Розроблені композити можуть бути використані для виготовлення зносостійких компонентів сільськогосподарської, металургійної та автомобільної техніки, експлуатація яких відбувається в агресивних умовах, зокрема під впливом високих температур, підвищеної вологості, кислот, лугів та абразивних часток.

Ключові слова: поліефірефіркетон, бінарні сплави, показник абразивного стирання.

Tomina Anna-Mariia. Influence of rapidly quenched Al-Co and Al-Ni alloys on the abrasive wear rate of polyetheretherketone

The paper investigates the effect of dispersed rapidly quenched binary alloys of the Al-Co and Al-Ni systems. The Co and Ni content in Al was 10 wt.% when evaluating the abrasive wear rate of polyetheretherketone grade Victrex 150G. It was established that the introduction of these alloys in the amount of 5–25 wt.% leads to a 1.8-fold reduction in the wear rate, indicating effective strengthening of the polymer composite. The increase in the wear resistance of polyetheretherketone is explained by a decrease in elastic-plastic deformations in the near-surface layers, which contributes to the retardation of the initiation and propagation of microcracks as well as local fracture zones. This is confirmed by a 1.7-fold decrease in surface roughness. It was found that the optimal content of dispersed binary alloys in the composite is 20 wt.%, at which the minimum values of abrasive wear rate and surface roughness are achieved. A further increase in the filler content up to 25 wt.% leads to a decrease in the strengthening efficiency due to agglomeration of alloy particles and the formation of structural defects in the polymer matrix. This is confirmed by a decrease in microhardness in the “polymer – filler” interfacial zone. The obtained results demonstrate the prospects of using rapidly quenched binary alloys of the Al-Co and Al-Ni systems for the development of new polymer composites with high resistance to abrasive wear. The developed composites can be used for the manufacture of wear-resistant components for agricultural, metallurgical, and automotive equipment operated under aggressive conditions, including the influence of high temperatures, increased humidity, acids, alkalis, and abrasive particles.

Key words: polyetheretherketone, binary alloys, abrasive wear rate.

Вступ. Сьогодні одним із найпоширеніших видів спрацювання вузлів тертя сільськогосподарської, автомобільної та гірничодобувної техніки є абразивне зношування серійних металевих деталей [1, с. 75], що, своєю чергою, призводить до скорочення терміну ефективної роботи, зростання часу простою обладнання та, як наслідок, збільшення економічних збитків. Ефективним способом розв'язання цієї проблеми є застосування полімерних композиційних

матеріалів (далі – ПКМ), до складу яких входять дисперсні наповнювачі (Нп) різної природи. Як показав аналіз літературних джерел [2–6, с. 20, 42, 72, 388, 559], використання порошків чистих металів (алюмінію, титану, заліза, міді), аморфних сплавів, графіту, каоліну, гідроксид алюмінію, карбонат кальцію, бокситу, діоксиду кремнію, нітриду алюмінію чи бору, оксиду заліза та алюмінію, карбід кремнію чи бору дає змогу отримати матеріали з високими показниками

зносостійкості в різних умовах експлуатації. Особливий інтерес як Нп викликають швидкозагартовані сплави, отримані з рідкого стану. Це зумовлено тим, що високий рівень мікронапружень у кристалічній решітці основному металу ($\Delta a/a \geq 2,5 \cdot 10^{-3}$) забезпечує таким сплавам підвищену стійкість до корозії та зношування, а також високу твердість і міцність. Завдяки високій швидкості охолодження (до $10^5 - 10^6$ K/c) у процесі твердіння формується дрібнодисперсна структура з метастабільними фазами, що сприяє покращенню функціональних властивостей матеріалу. Вказані структурні особливості та комплекс підвищених експлуатаційних властивостей швидкозагартованих сплавів обґрунтовують доцільність пошуку нових складів ПКМ із використанням цих сплавів як дисперсних Нп. З цією метою поставлені такі завдання: розробити ПКМ на основі поліефірефіркетону, наповненого дисперсним (100–160 мкм) сплавом систем Al-Co та Al-Ni у кількості 5–25 мас. %; визначити вплив відсоткового вмісту зазначених Нп на показник абразивного стирання поліефірефіркетону; оцінити перспективність застосування цих Нп для створення ПКМ, призначених для роботи в умовах абразивного зношування.

Методи та методики дослідження. Поліефірефіркетон (далі – ПЕЕК) марки Victrex150 G (фірма виробник – британська компанія ICI) обрано як матрицю для створення нових складів ПКМ. ПЕЕК є напівкристалічним полімером, що містить в основному ланцюзі повторювані мономерні ланки двох ефірних груп й однієї кетонної групи. ПЕЕК належить до суперконструкційних полімерів, оскільки вирізняється унікальною комбінацією властивостей, серед яких – виняткова хімічна інертність, електрична та температурна стійкість, висока зносостійкість, міцність на розтяг і стабільність розмірів, що зберігаються в широкому температурному інтервалі [7, с. 28].

Як дисперсні (100–160 мкм) наповнювачі для ПЕЕК обрано два бінарні сплави систем Al-Co та Al-Ni із відсотковим вмістом Co і Ni в Al 10 мас. %, компоненти яких характеризуються високими антикорозійними, термічними та трибологічними властивостями. Діаграми стану систем Al-Co та Al-Ni зі сторони алюмінію характеризується майже нульовою розчинністю Co чи Ni у ґратці алюмінію: у рівноважному стані вона не перевищує 0,02 мас. % [8–9, с. 776, 1092]. Відомо, що метод гартування з рідкого стану (далі – ГРС), який супроводжується великими швидкостями охолодження $10^6 - 10^8$ K/c, дає змогу істотно загальмувати

рівноважні процеси кристалізації та забезпечити формування нерівноважних структур. За таких умов можливе отримання однофазних сильно пересичених твердих розчинів (далі – СПТР) на основі ГЦК – ґратки алюмінію. Оскільки атомні радіуси Al ($r_{Al} = 0,40494$ нм), Co ($r_{Co} = 0,1260$ нм) та Ni ($r_{Ni} = 0,1240$ нм) суттєво відрізняються, формування СПТР заміщення супроводжується зміною періоду ґратки та значними пружними викривленнями кристалічної решітки алюмінію [3; 4, с. 388, 558].

Виготовлення зразків ПЕЕК та ПКМ на його основі з вмістом бінарних сплавів 5–25 мас. % здійснювали методом сухого змішування в апараті з обертовим електромагнітним полем індукцією 0,12 Тл за допомогою феромагнітних часток, які після змішування вилучали з отриманої суміші методом магнітної сепарації. Суміш завантажували в прес-форму, температура якої становила 523 К, здійснювали її нагрів до $t_1 = 598$ К та витримували за цієї температури 10 хв без навантаження та 10 хв під постійним навантаженням 15 МПа. Далі зразки охолоджували під постійним навантаженням до температури 523 К та вилучали з прес-форми [7, с. 28].

Стійкість розроблених ПКМ і чистого ПЕЕК до дії жорстко закріплених часток абразиву з дисперсністю 100 мкм досліджували з використанням машини HECKERT. Дослідження морфології поверхонь тертя та їх мікрогеометрії (R_a , мкм) здійснювали за допомогою мікроскопа БІОЛАМ-М та щупового профілометра 170621. За допомогою мікротвердоміра ПМТ–3М визначали мікротвердість та характер взаємодії бінарних сплавів із ПЕЕК на межі поділу «полімер – наповнювач» [4, с. 558].

Основною інженерною характеристикою, що відображає стійкість матеріалу до абразивного зношування, є показник абразивного стирання V_i , мм³/м, який розраховували за формулою:

$$V_i = \frac{\Delta m \cdot 1000}{\rho_{\text{екс}} \cdot L},$$

де Δm – вагове зношування зразка, г;

$\rho_{\text{екс}}$ – експериментальна густина зразка, г/см³;

L – шлях, який проходить зразок за один цикл випробування, м.

Результати. Із даних, наведених на рис. 1, видно, що введення обох бінарних сплавів призводить до зменшення показника абразивного стирання поліефірефіркетону марки Victrex150 G у 1,8 раза.

Зростання стійкості ПЕЕК до впливу жорстко закріплених часток абразиву можна пояснити тим, що введення твердого (HV = 800 МПа) дисперсного Нп сприяє зміцненню поверхневого

шару ПКМ і, як наслідок, зменшенню пружнопластичної деформації в приповерхневих шарах [10, с. 97] навела посилання, яке це пояснює. Це, своєю чергою, уповільнює розвиток мікротріщин та локальних зон руйнування [11, с. 210]. Підтвердженням такого висновку є зменшення шорсткості поверхні (див. рис. 2) у 1,7 раза [12, с. 2762].

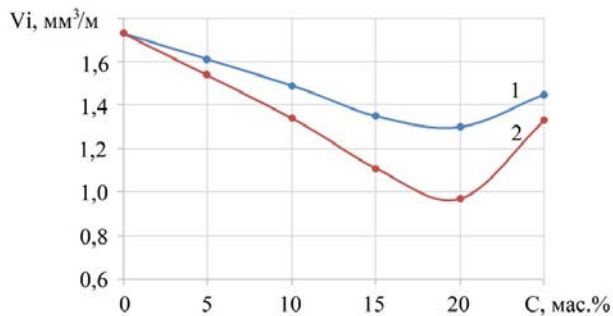


Рис. 1. Вплив вмісту (C, мас.%) бінарного сплаву Al-Co (1) та Al-Ni (2) на показник абразивного стирання (V_i , мм³/м) поліефірефіркетону

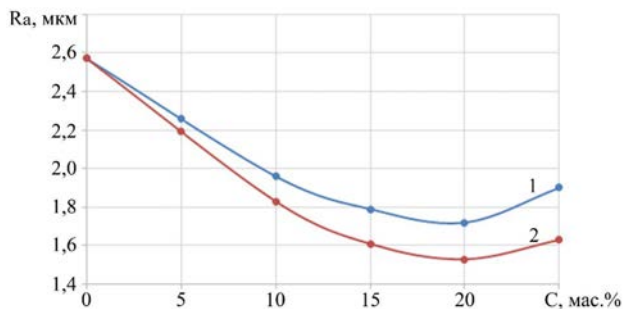


Рис. 2. Вплив вмісту (C, мас.%) бінарного сплаву Al-Co (1) та Al-Ni (2) на шорсткість поверхні (R_a , мкм) поліефірефіркетону

Додатковим підтвердженням підвищення опору абразивному зношуванню є результати порівняльного аналізу поверхонь тертя чистого ПЕЕК та композитних матеріалів (рис. 3). На поверхні тертя ПЕЕК спостерігаються глибокі борозни проорювання, що свідчить про легке проникнення твердих часток абразиву в матеріал і розвиток інтенсивного мікрорізання. Це вказує на низьку здатність полімеру чинити опір абразивному впливу. Водночас поверхні тертя ПКМ з умістом 20 мас. % сплавів Al-Co або Al-Ni характеризуються значно меншим ступенем пошкодження: глибина та щільність борозен істотно знижуються. Отримані результати свідчать про ефективну дію зміцнювальної фази, яка сприймає частину прикладеного навантаження та перешкоджає проникненню дисперсних (100 мкм) твердих часток абразиву [13, с. 30].

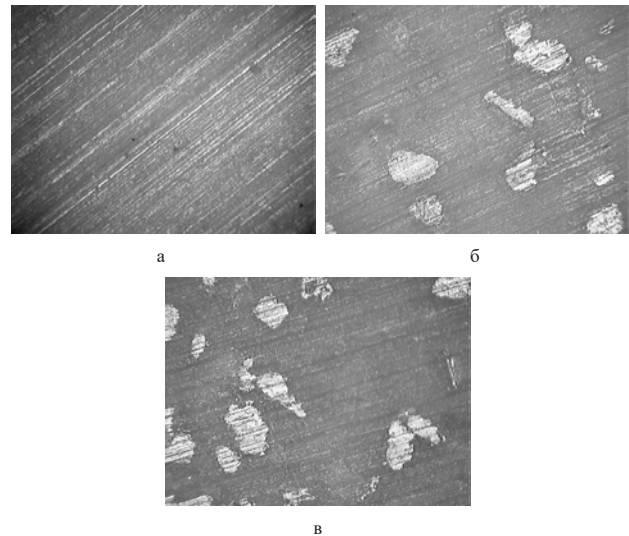


Рис. 3. Поверхні тертя: поліефірефіркетону (а); композиту на його основі, що містить 20 мас. % сплаву Al-Co (б) і Al-Ni (в)

Слід зазначити, що найменші значення показника абразивного стирання досягаються за вмісту 20 мас. % сплавів Al-Co або Al-Ni. Подальше підвищення їх концентрації до 25 мас. % у складі ПЕЕК призводить до зниження зносостійкості ПКМ під час контакту з жорстко закріпленими абразивними частками. Імовірно причиною такого ефекту є зростання кількості структурних дефектів у полімерній матриці, що негативно впливає на її здатність ефективно сприймати механічні навантаження. Формування зазначених дефектів, імовірно, зумовлене агломерацією дисперсних часток бінарних сплавів під дією вандерваальсових сил, унаслідок чого утворюються скупчення з внутрішніми порожнинами [14, с. 45]. Такі агломерати характеризуються зменшеною площею контакту наповнювача з полімерною фазою, що знижує ефективність міжфазної взаємодії. Зазначене узгоджується з результатами вимірювання мікротвердості на межі поділу «полімер – наповнювач» (рис. 4) [15, с. 785].

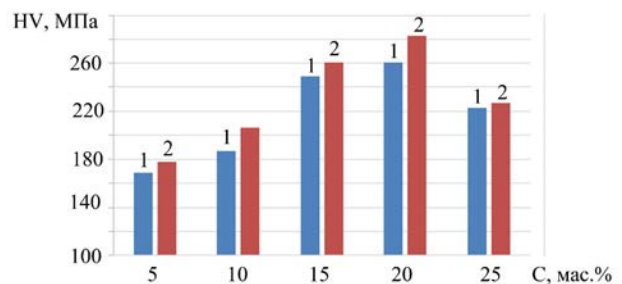


Рис. 4. Залежність мікротвердості (HV, МПа) на межі поділу «полімер – наповнювач» поліефірефіркетону від умісту (C, мас. %) бінарного сплаву Al-Co (1) та Al-Ni (2)

Зазначимо, що найбільше на покращення показника абразивного стирання ПEEK впливає введення бінарного сплаву системи Al-Ni. Це зумовлено кращою адгезією (рис. 4) на межі поділу «полімер – наповнювач», і, як наслідок, виникнення формування сильних міжфазних молекулярних зв'язків, які забезпечують високі трибологічні властивості [15, с. 785].

Висновки. Аналіз результатів отриманих досліджень показав:

1. Установлено, що введення бінарних сплавів систем Al-Co та Al-Ni до складу поліефірефіркетону забезпечує зниження показника абразивного стирання у 1,8 раза, що підтверджує ефективність зміцнення композиту матеріалу.

2. Зростання зносостійкості ПEEK зумовлено зменшенням пружно-пластичних деформацій

у приповерхневих шарах, що сприяє гальмуванню процесів зародження мікротріщин і формування локальних зон руйнування.

3. Ефективний уміст Нп у складі ПКМ становить 20 мас. %, за якого досягаються мінімальні значення показника абразивного стирання та шорсткості поверхні (приблизно у 1,7 раза).

4. Подальше підвищення вмісту сплавів до 25 мас. % призводить до зниження ефективності зміцнення внаслідок агрегації часток і формування структурних дефектів у полімерній матриці.

5. Результати мікроструктурного аналізу поверхонь тертя підтвердили зменшення глибини та щільності борозен у композитах з бінарними сплавами, що свідчить про підвищення здатності матеріалу протидіяти абразивному зношуванню.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Борак К., Рябчук О., Рябчук П. Механізм абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин. *Інновації в агропромисловому комплексі, машинобудуванні та транспорті: збірник тез доповіді Міжнародної науково-практичної конференції* (м. Рівне, 9–10 квітня 2025 р.). Рівне: НУВГП, 2025. С. 75–81. URL: <http://repozitory.zhatk.zt.ua/handle/123456789/876>
2. Yeriomina Ye. A., Lysenko O. B., Nosenko V. K., Yarovyi Ya. E. Study of the influence of quick-hardened alloy on the properties of metal polymers. *Journal of Physics and Electronics*. 2021. № 1 (29). P. 41–44. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/jphei_2021_29%281%29__7
3. Bashev V. F., Tomin S. V., Kalinina T. V., Kushnerov O. I., Bondar N. P. Effect of binary Al-Ni alloy on the rate of abrasive wear of ultra-high molecular weight polyethylene. *Functional Materials*. 2024. № 4(31). P. 557–560. <http://dx.doi.org/10.15407/fm31.02.557>
4. Bashev V. F., Tomina A.-M. V., Mykyta K. A., Kalinina T. V., Riabtsev S. I., Kushnerov O. I. The influence of a rapidly-quenched filler on the wear resistance of ultrahigh molecular weight polyethylene. *Functional Materials*. 2024. № 3(31). P. 387–390. <http://dx.doi.org/10.15407/fm31.03.387>
5. Застосування полімерних композитів в АПК / Кобець А. С. та ін. Дніпро : Журфонд, 2022. 356 с. URL: <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/7031>
6. Кабат О. С., Пікула І. І. Композити на основі фторполімерів і метод їх перероблення у виробі. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2025. № 2. P. 67–74. <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2025-159-2-67-74>
7. Buria O. I., Tomina A.-M. V., Nachovnyi I. I. Influence of carbon fiber on tribotechnical characteristics of polyetheretherketone. *Problems of Tribology*. 2020. № 4/98 (25). P. 27–32. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-98-4-27-32>
8. Čelko L., Klakurková L., Švejcar J. Diffusion in Al-Ni and Al-NiCr interfaces at moderate temperatures. *Defect and Diffusion Forum Vols*. 2010. Vol. 297–301. P. 771–777. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.297-301.771>
9. Sfikas A. K., Gonzalez S., Lekatou A.G., Kamnis S., Karantzalis A. E. A critical review on Al-Co alloys: fabrication routes, microstructural evolution and properties. *Microstructural tailoring of metals and alloys*. 2022. № 12(7). P. 1092. <https://doi.org/10.3390/met12071092>
10. Lapčík L., Mañas D., Lapčíková B., Vašina M., Staněk M., Čépe K., Vlček J., Waters K.E., Greenwood R.W., Rowson N.A. Effect of filler particle shape on plastic-elastic mechanical behavior of high density poly(ethylene)/mica and poly(ethylene)/wollastonite composites. *Chemical Engineering*. 2017. Vol. 141. P. 92–99.
11. Zsidai L., Káta L. Abrasive wear and abrasion testing of PA 6 and PEEK composites in small-scale model system. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2016. № 6. P. 197–214. URL: https://acta.uni-obuda.hu/Zsidai_Katai_70.pdf
12. Tijum R., Vellinga W.P., De Hosson J.Th.M. Surface roughening of metal-polymer systems during plastic deformation. *Acta Materialia*. 2007. № 8(55). P. 2757–2764. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.12.013>
13. Денисенко М. І., Рубльов В. І. Підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин з використанням точкового зміцнення. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету*. 2011. № 2(24). С. 28–35. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2011_24%282%29__8

14. Zare Y., Rhee K. Y., Hui D. Influences of nanoparticles aggregation/agglomeration on the interfacial/interphase and tensile properties of nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 122. P. 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.04.008>
15. Yeriomina Ye. A., Burya A. I. Investigating the influence of overmolecular structure on the properties of metal-containing polymers. *Functional Materials*. 2020. № 4(27). P. 781–785. <https://doi.org/10.15407/fm27.04.781>

REFERENCES:

1. Borak, K., Riabchuk, O., & Riabchuk, P. (2025). *Mekhanizm abrazynovoho znoshuvannia robochykh orhaniv gruntoobrobnykh mashyn* [Mechanism of abrasive wear of working bodies of tillage machines]. In *Innovations in the agro-industrial complex, mechanical engineering and transport (Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Rivne, Ukraine, April 9–10, 2025, 75–81* [in Ukrainian].
2. Yeriomina, Ye. A., Lysenko, O. B., Nosenko, V. K., & Yarovyi, Ya. E. (2021). Study of the influence of quick-hardened alloy on the properties of metal polymers. *Journal of Physics and Electronics*, 1(29), 41–44. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/jphel_2021_29%281%29__7
3. Bashev, V. F., Tomin, S. V., Kalinina, T. V., Kushnerov, O. I., & Bondar, N. P. (2024). Effect of binary Al-Ni alloy on the rate of abrasive wear of ultra-high molecular weight polyethylene. *Functional Materials*, 4(31), 557–560. <http://dx.doi.org/10.15407/fm31.02.557>
4. Bashev, V. F., Tomina, A.-M. V., Mykyta, K. A., Kalinina, T. V., Riabtsev, S. I., & Kushnerov, O. I. (2024). The influence of a rapidly-quenched filler on the wear resistance of ultrahigh molecular weight polyethylene. *Functional Materials*, 3(31), 387–390. <http://dx.doi.org/10.15407/fm31.03.387>
5. Kobets, A. S., et al. (2022). *Zastosuvannia polimernykh kompozytiv v APK* [Application of polymer composites in the agro-industrial complex]. Dnipro, Ukraine: Zhurfond. Retrieved from <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/7031> [in Ukrainian].
6. Kabat, O. S., & Pikula, I. I. (2025). *Kompozyty na osnovi ftorpolimeriv i metod yikh pereroblennia u vyroby* [Composites based on fluoropolymers and methods of their processing into products]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (2), 67–74. <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2025-159-2-67-74>. [in Ukrainian].
7. Buria, O. I., Tomina, A.-M. V., & Nachovnyi, I. I. (2020). Influence of carbon fiber on tribotechnical characteristics of polyetheretherketone. *Problems of Tribology*, 4(98 (25), 27–32. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-98-4-27-32>
8. Čelko, L., Klakurková, L., & Švejcar, J. (2010). Diffusion in Al-Ni and Al-NiCr interfaces at moderate temperatures. *Defect and Diffusion Forum Vols*, 297–301, 771–777. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.297-301.771>
9. Sfikas, A. K., Gonzalez, S., Lekatou, A. G., Kamnis, S. & Karantzalis, A. E. (2022). A critical review on Al-Co alloys: fabrication routes, microstructural evolution and properties. *Microstructural tailoring of metals and alloys*, 12(7), 1092. <https://doi.org/10.3390/met12071092>
10. Lapčík, L., Maňas, D., Lapčíková, B., Vašina, M., Staněk, M., Čépe, K., Vlček, J., Waters, K. E., Greenwood, R. W., & Rowson, N. A. (2017). Effect of filler particle shape on plastic-elastic mechanical behavior of high density poly(ethylene)/mica and poly(ethylene)/wollastonite composites. *Chemical Engineering*, 141, 92–99.
11. Zsidai, L., & Kátai, L. (2016). Abrasive wear and abrasion testing of PA 6 and PEEK composites in small-scale model system. *Acta Polytechnica Hungarica*, 6, 197–214. Retrieved from https://acta.uni-obuda.hu/Zsidai_Katai_70.pdf
12. Tijum, R., Vellinga, W. P., & De Hosson, J. Th. M. (2007). Surface roughening of metal-polymer systems during plastic deformation. *Acta Materialia*. 8(55), 2757–2764. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.12.013>
13. Denysenko, M. I., & Rubliov, V. I. (2011). *Pidvyshchennia dovhovichnosti robochykh orhaniv gruntoobrobnykh mashyn z vykorystanniam tochkovoho zmitsnennia* [Increasing the durability of tillage machine working bodies using spot strengthening]. *Proceedings of the Kirovohrad National Technical University*, 2(24), 28–35. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2011_24%282%29__8 [in Ukrainian].
14. Zare, Y., Rhee, K. Y., Hui D. (2017). Influences of nanoparticles aggregation/agglomeration on the interfacial/interphase and tensile properties of nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 122, 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.04.008>
15. Yeriomina, Ye. A., Burya, A. I. (2020). Investigating the influence of overmolecular structure on the properties of metal-containing polymers. *Functional Materials*, 4(27), 781–785. <https://doi.org/10.15407/fm27.04.781>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 03.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026