

DOI: 10.20535/kpissn.2025.2.331048

УДК 621.793

О.В. Кушев<sup>1\*</sup>, О.Є. Терент'єв<sup>1</sup>, В.Т. Варченко<sup>1</sup>, Т.М. Чевичелова<sup>1</sup>,  
Р.Є. Костюнік<sup>2</sup>, О.П. Уманський<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України,

<sup>2</sup> Державне некомерційне підприємство «Державний університет  
«Київський авіаційний інститут», м. Київ, Україна

\*Відповідальний автор: aleks.tmu@gmail.com

### МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ КОМПОЗИЦІЙНОГО ПЛАЗМОВОГО ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ НІКЕЛЬ-ГРАФІТУ ШЛЯХОМ ДОДАВАННЯ МІДНИХ СПЛАВІВ

**Проблематика.** У статті розглянуто можливість розширення сфер застосування плазмових покриттів на основі системи нікель-графіт завдяки додаванню до складу безолов'яних мідних сплавів, що мають спорідненість до нікелевої оболонки порошку системи нікель-графіт і, окрім збереження триботехнічних властивостей нікель-графіту, можуть забезпечити потрібний рівень когезії покриття.

**Мета дослідження.** Метою роботи є дослідження впливу вмісту мідного сплаву БрАЖ10-4 після його додавання у нікель-графіт (НПГ-75) на триботехнічні характеристики композиційного плазмового покриття.

**Методика реалізації.** У межах роботи для визначення впливу вмісту мідного сплаву в нікель-графіті на триботехнічні властивості плазмового композитного покриття проведено випробування на тертя і зношування зразків із масовою часткою мідного сплаву БрАЖ10-4 35, 50, 75 та 90 % у плакований нікелем графіт НПГ-75 (масова частка нікелю становить 75 %). Як еталон використовували подвійний сплав мідь-цинк Л90.

**Результати дослідження.** Експериментально встановлено, що плазмові покриття на основі НПГ-75 з додаванням масової частки БрАЖ10-4 50 % мають зносостійкість, більшу у 10 разів щодо чистого НПГ-75 за значно меншого (0,36) за еталон Л90 (0,52) коефіцієнта тертя. Намазування на контртіло зі сталі 45 (твердість 45-48 HRC) при цьому найменше серед трибопар, що були досліджені в межах цієї роботи. Зменшення вмісту мідного сплаву до масової частки 35 % недоцільне, оскільки призводить до інтенсифікації зношування матеріалу покриття і його намазування на контртіло. Подальше збільшення вмісту порошку БрАЖ10-4 у складі спричиняє скоплення у зоні контакту, про що свідчить різке (у 10 разів) підвищення зносу зразків покриття, зростання температури у зоні контакту і збільшення приблизно у 2 рази коефіцієнта тертя.

**Висновки.** Оптимальна масова частка БрАЖ10-4 у плазмовому покритті на основі НПГ-75 становить близько 50 %. Матеріал із таким складом дозволяє зменшити з 0,52 (Л90) до 0,36 коефіцієнт тертя у парі зі сталлю 45. Масове зношення сталевого контртіла також значно знижується через, ймовірно, зміну механізму зношування з адгезійного (скоплення) на окисне зношування. Це дозволяє суттєво розширити сфери застосування матеріалу Ni-C + БРАЖ10-4 в авіаційній і космічній техніці.

**Ключові слова:** нікель-графіт; композиційний порошок; плазмове покриття; хімічний склад; структура, тертя та зношення.

#### Вступ

Композитні плазмові покриття, виконані на основі порошку системи нікель-графіт, характеризуються досить високою термостійкістю і гарними антифрикційними властивостями. Такі покриття застосовують переважно як ущільню-

вальні матеріали газотурбінних двигунів. Враховуючи унікальні властивості графіту утворювати на поверхнях тертя шар твердого термостійкого змащувального матеріалу, нікель-графітові композити є привабливим для використання в багатьох трибопарах, утім, їх використання ускладнене невеликою твердістю таких матеріалів.

**Пропозиція для цитування цієї статті:** О.В. Кушев, О.Є. Терент'єв, В.Т. Варченко, Т.М. Чевичелова, Р.Є. Костюнік, О.П. Уманський, "Метод підвищення зносостійкості композиційного плазмового покриття на основі нікель-графіту шляхом додавання мідних сплавів", *Наукові вісти КПИ*, № 2, с. 39–44, 2025. doi: 10.20535/kpissn.2025.2.331048

**Offer a citation for this article:** O.V. Kushchev, O.E. Terentjev, V.T. Varchenko, T.M. Chevichelova, R.E. Kostyunik, O.P. Umanskyi, "Method for increasing the nickel-graphite-based composite plasma coating wear resistance by adding copper alloys", *KPI Science News*, no. 2, pp. 39–44, 2025. doi: 10.20535/kpissn.2025.2.331048

Підвищення вмісту нікелю у складі порошку є найпростішим способом збільшення твердості й когезії нікель-графітових плазмових покриттів, але це спричиняє суттєве погіршення їх антифрикційних характеристик, оскільки нікель не є антифрикційним матеріалом.

Широко відоме використання як антифрикційних матеріалів сплавів на мідній основі, зокрема бронз. Олов'яні бронзи мають достатню твердість (близько 75 НВ), але їх термостійкість зазвичай обмежена властивостями певних легуючих елементів, що утворюють окрему фазу в гетерогенній структурі матеріалу, і становить близько 250–300 °C [1, 2]. Значно більш термостійкими є безолов'яні бронзи (наприклад, мідний сплав БрАЖ10-4, DIN 17665 CuAl10Ni5Fe4), що здатні витримувати близько 400–500 °C [3, 4]. Утім, твердість таких сплавів також значно більша (220 НВ та вище) за олов'яні бронзи, що висуває ряд вимог до відповідного матеріалу трибопари.

Відоме використання у вузлах тертя матеріалів, утворених спеченим порошком мідного сплаву та графіту [5, 6, 7]. Вони характеризуються значною (75–85 %) пористістю, що не може не впливати негативно на когезію, швидкість зношування та коефіцієнт тертя [8].

Автори запропонували розширити сфери застосування плазмових покриттів на основі системи нікель-графіт завдяки додаванню до складу безолов'яних мідних сплавів, що мають спорідненість до нікелевої оболонки, порошку системи нікель-графіт і, окрім збереження триботехнічних властивостей нікель-графіту, можуть забезпечити потрібний рівень когезії покриття.

У межах дослідницької роботи виготовлено й досліджено на триботехнічні властивості зразки, в яких масова частка мідного сплаву в нікель-графіті становить 35, 50, 75 та 90 %.

### Постановка задачі

Триботехнічні характеристики пар тертя можуть бути підвищені завдяки використанню композитів на основі металів і твердого змашувального матеріалу. Автори статті для підвищення зносостійкості вузлів тертя запропонували використати метод створення композиційного плазмового покриття на основі плакованого нікелем графіту (НПГ-75) з додаванням мідного сплаву з масовою часткою БрАЖ10-4 від 35 до 90 %.

### Методи дослідження

Під час проведення дослідження використано порошки плакованого графіту НПГ-75

виробництва ТОВ «Композиційні системи» (м. Запоріжжя). За основу композиційних порошків обрано графіт марки ГАК-1 (99 % С, ТОВ «Заваллівський графіт», Україна), а також порошок мідного сплаву БрАЖ10-4 (DIN 17665 CuAl10Ni5Fe4).

Товщину плакувального шару порошку НПГ-75 обирали так, щоб вона забезпечувала потрібну масову частку компонентів (75 % нікелю та 25 % графіту) і становила від 6,4 до 12,3 мкм.

Щоб збільшити адгезійний зв'язок матеріалу покриття і сталевій основі, а також вирівняти коефіцієнти термічного розширення, на підкладку наносили проміжний шар з терморегулюючого матеріалу ПГ-Ю5Н (склад: 95 % Ni + 5 % Al (ISO 9001: 2008)) зернистістю від –100 до +40 мкм, товщина підшару становить близько 100 мкм.

Для змішування порошків було використано обладнання, що реалізує принцип «п'яної бочки».

Щоб підвищити адгезію, перед нанесенням покриттів поверхню сталевих зразків піддавали струминно-абразивній обробці порошком електрокорунду зернистістю F22–F24 (ISO 8486-86) з метою її очищення, активації та надання шорсткості ( $R_z = 63–80$ ). Відстань, на якій здійснювалась обробка поверхні, становить 90–150 мм, кут – від 60° до 90°. Тиск повітря становив 0,5–0,7 МПа.

Плазмові покриття наносили у відкритій атмосфері (APS) на установці УПУ-3Д у захисній камері з маніпулятором 15ВБ і плазмотроном F4-MB фірми Metco на зразки зі сталі 45 (зарубіжні аналоги – AISI 1045, JIS S45C, DIN C45, за міжнародним стандартом EN 10277-2 – сталь 1.1191). Як плазмоутворювальний газ використовували суміш аргону з воднем.

Дослідження морфології композиційного порошку і структури отриманих плазмових покриттів проведено на шліфах поперечного перерізу на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И.

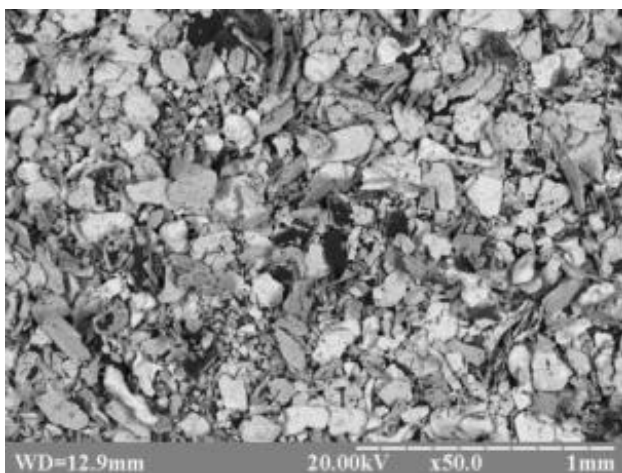
Дослідження на тертя і зношування проводили на машині для випробовування матеріалів на тертя і зношування М-22М відповідно до вимог ГОСТ 26614-85 «Матеріали антифрикційні порошкові. Метод визначення триботехнічних властивостей». Для проведення порівняльних трибологічних випробувань як базову трибопару було використано таку пару: зразок Л90 (зарубіжні аналоги – ASTM CW501L, DIN CuZn10) і контрзразок сталь 45.

Як пару тертя досліджуваного матеріалу було використано сталевий контрзразок зі ста-

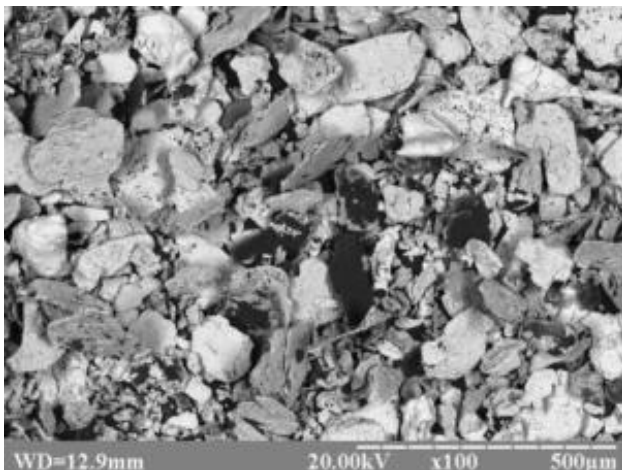
лі 45 термооброблений до твердості 45-48HRC. Швидкість тертя становила 4 м/с, питоме навантаження на контакт — 15 кг/см<sup>2</sup>, шлях тертя — 1000 м.

### Аналіз отриманих результатів

Щоб отримати вихідний матеріал, придатний для формування композиційних покриттів плазовим методом, було підготовлено суміш, яка складалася з порошків плакованого нікель-графіту з масовою часткою нікелю 75 % (НПГ-75) та мідного сплаву. Морфологію отриманої суміші порошків зображено на рис. 1.



*a*



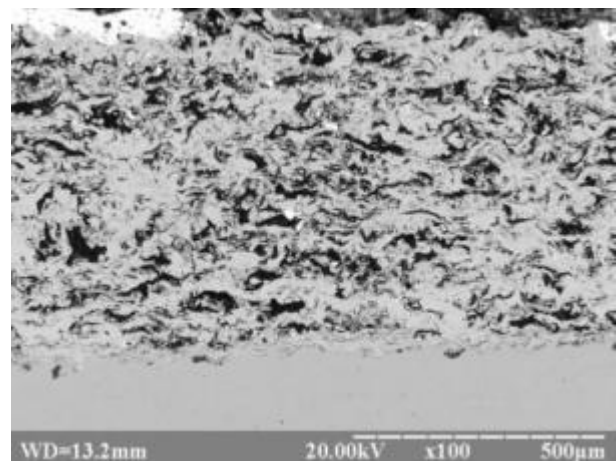
*б*

Рис. 1. Морфологія суміші порошків НПГ-75 та БрАЖ10-4 зі збільшенням x50 (*a*) та x100 (*б*)

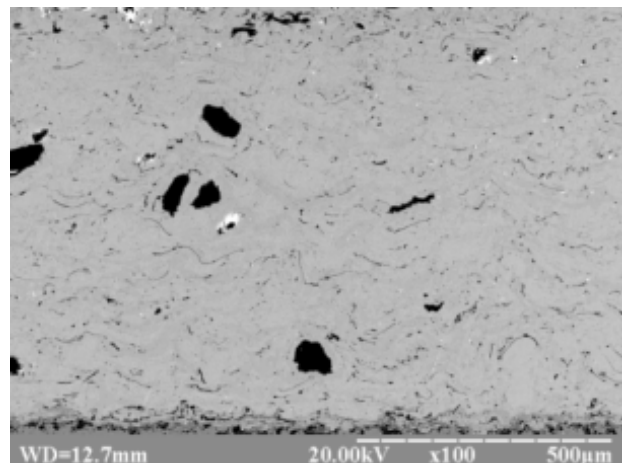
Розмір частинок у сплаві БрАЖ10-4 перебуває в діапазоні від 20 до 150 мкм, у НПГ-75 від 100 до 160 мкм.

З метою визначення складу, який зможе забезпечити в обраній системі оптимальні триботехнічні властивості (коефіцієнт тертя і зносостійкість), підготовлено чотири типи сумішей, що характеризуються різним співвідношенням компонентів покриття, а саме НПГ-75 та мідного сплаву БрАЖ10-4. Масова частка мідного сплаву у запропонованих зразках становила 35, 50, 75 та 90 %.

З отриманих порошків плазовим методом було нанесено чотири типи покриттів, приклади структур поперечних шліфів яких показано на рис. 2. Покриття наносили на підкладку зі сталі.



*a*



*б*

Рис. 2. Структура композиційного плазового покриття на основі НПГ-75 (збільшення x100), що містить у складі: *a* — масову частку порошку БрАЖ10-4 50 %; *б* — масову частку порошку БрАЖ10-4 90 %

Як видно з рис. 2, структура покриття двофазна, складається з металевої матриці із включенням графіту. Нікелева плакувальна оболонка

порошку НПГ-75 не виражена, що може свідчити про високий рівень когезії отриманого покриття.

Варто зазначити, що зі збільшенням масової частки мідного сплаву у покритті змінюється структура, а ламелі стають менш вираженими.

Виходячи зі структури покриття можна передбачити, що зі збільшенням масової частки нікель-графіту має зростати ефективність змащування трибоконтакту графітовою фазою. Наслідком цього буде суттєво менше зношування сталевго контртіла або масоперенесення на нього матеріалу покриття за помірного зношування зразка зі значним (масова частка 25 % і більше) вмістом НПГ-75.

Щоб визначити протизношувальні властивості запропонованих покриттів, було проведено випробування шести типів зразків, з-поміж яких були латунь Л90, плазмове покриття із НПГ-75 й чотири типи композитних плазмових покриттів на основі нікель-графіту з додаванням мідного сплаву у співвідношенні (масова частка, %) НПГ-75/БрАЖ10-4: 65/35, 50/50, 25/75 та 10/90. Отримані результати триботехнічних випробувань показано на рис. 3, 4 й 5.

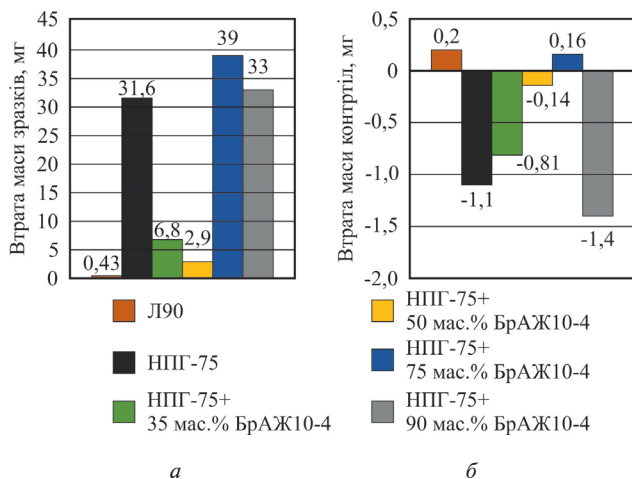


Рис. 3. Масове зношування зразків (а) і контрзразків (б) у результаті досліджень на зношування

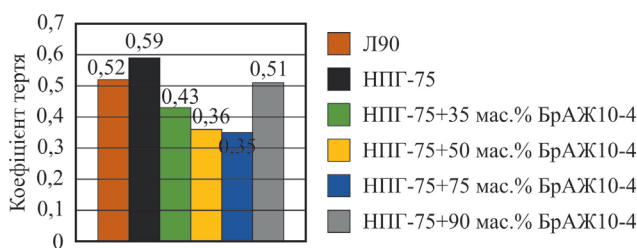


Рис. 4. Залежність коефіцієнта тертя зразків по сталі 45 від вмісту БрАЖ10-4 у покритті на основі НПГ-75

Як можна бачити з рис. 4, плазмове покриття на основі НПГ-75 дозволяє зменшити зношення сталевго контрзразка. Спостерігалося активне намазування матеріалу покриття на контрзразок, що призводило до збільшення його маси після тертя на 1,1 мг порівняно з вихідною. Утім, руйнування зразка покриття дуже інтенсивне. Коефіцієнт тертя більший, ніж у вихідної трибопарі «сталі 45 – Л90», що може свідчити про адгезійний характер зношування через схоплення нікелевої фази покриття зі сталевим контрзразком.

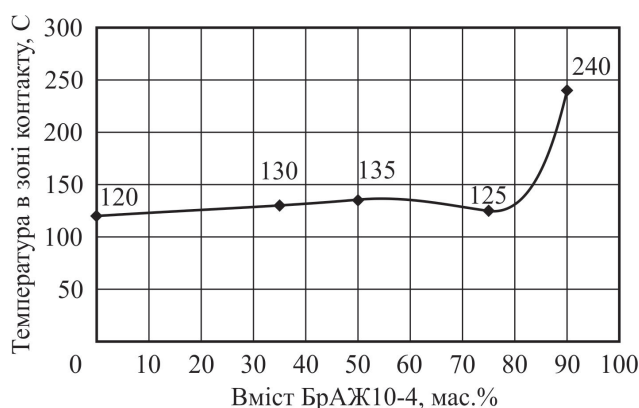


Рис. 5. Температура в зоні трибоконтакту залежної від вмісту БрАЖ10-4 у покритті на основі НПГ-75

Введення порошку БрАЖ10-4 у склад покриття масовою часткою 35 % дозволяє більш ніж у 4,5 рази зменшити зношування покриття і приблизно на 27 % знизити коефіцієнт тертя. При цьому спостерігається все ще значне намазування продуктів зношування на сталеве контртіло – приріст маси становив 0,81 мг.

Збільшення масової частки мідного сплаву у покритті до 50 % призвело до подальшого підвищення зносостійкості (приблизно у 10 разів) покриття, при цьому намазування продуктів тертя на контрзразок зменшилось приблизно у 5 разів (приріст маси контртіла зменшився з 0,81 мг до 0,14 мг), а коефіцієнт тертя найнижчий з-поміж досліджених у роботі трибопар, що може свідчити про зміну характеру зношування з адгезійного на окисний.

Подальше підвищення вмісту мідного сплаву у складі покриття масовою часткою до 75 та 90 % спричинило значне збільшення зношування зразка покриття та інтенсифікацію намазування на контртіло (приріст маси найбільший серед усіх трибопар), й підвищення температури у зоні контакту і коефіцієнта тертя, що є свідченням схоплення у процесі тертя.

## Висновки

У роботі з метою підвищення зносостійкості вузлів тертя автори запропонували метод формування композиційного плазмового покриття на основі плакованого нікелем графіту (НПГ-75) з додаванням мідного сплаву БрАЖ10-4 масовою часткою від 35 до 90 %.

Додавання БрАЖ10-4 у склад покриття на основі НПГ-75 масовою часткою 35 % дозволяє зменшити приблизно на 27 % коефіцієнт тертя щодо покриття з чистого НПГ-75. При цьому спостерігається активне зношування матеріалу покриття і його намазування на контртіло.

Зі збільшенням масової частки мідного сплаву до 50 % у складі порошку на основі Ni-C спостерігається тенденція поліпшення основних триботехнічних характеристик покриттів: зносостійкість збільшується у 10 разів, а значення коефіцієнта тертя зменшується з 0,59 до 0,36. Намазування на контртіло при цьому найменше серед трибопар, що були досліджені у межах цієї роботи. Це дозволяє суттєво розширити сфери застосування матеріалу Ni-C + БрАЖ10-4 в авіаційній та космічній техніці.

Подальше збільшення масової частки порошку БрАЖ10-4 у складі недоцільне, оскільки

призводить до виникнення схоплення у зоні контакту, про що свідчить суттєве (у 10 разів) підвищення зношування зразків покриття, зростання температури у зоні контакту та зростання приблизно у 2 рази коефіцієнта тертя.

Такі принципові відмінності триботехнічних характеристик запропонованих трибопар швидше за все виникають через те, що змінюється механізм зношування з адгезійного (схоплення) на окисне зношування. У наступних роботах доцільно продовжити дослідження впливу на триботехнічні характеристики покриттів системи нікель-графіт інших антифрикційних мідних сплавів і дослідити хімічний склад продуктів, що утворюються у зоні тертя.

Щоб визначити механізми формування плазмового покриття системи плакований нікелем графіт-мідний сплав у наступних роботах має сенс дослідити змочування компонентів, що входять до складу плазмового покриття.

## Подяка

Публікація містить результати досліджень, проведених за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт № 2023.04/0066.

## References

- [1] K.M. Zohdy, M.M. Sadawy, M. Ghanem, "Corrosion behavior of leaded-bronze alloys in sea water", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 147, Iss. 3, 15 October 2014, pp. 878–883. doi.org: 10.1016/j.matchemphys.2014.06.033
- [2] Yang Li, Kang He, Chengwei Liao, Chunxu Pan, "Measurements of mechanical properties of  $\alpha$ -phase in Cu–Sn alloys by using instrumented nanoindentation", *Journal of Materials Research*, January 2012, no. 27 (01), pp. 192–196. doi.org: 10.1557/jmr.2011.299
- [3] J. S. Carlton. FREng, in *Marine Propellers and Propulsion* (Fourth Edition), 2018. doi.org: 10.1016/C2014-0-01177-X
- [4] J. Freudenberger, L. Tikana, W.F. Hosford. Alloys: Copper. *Encyclopedia of Condensed Matter Physics* (Second Edition), 2024, Vol. 5, pp. 601–634. doi.org: 10.1016/B978-0-323-90800-9.00116-5.
- [5] ASTM B438 Standard Specification for Sintered Bronze Bearings (Oil-Impregnated), (2004 EDITION), 10 p.
- [6] R. Selver, Remzi Varol. Some thermal and physical characteristics of sintered tin bronze bearings, January 2002, *Metall* 57(1-2):28-32. Retrieved from: [https://www.researchgate.net/publication/288103212\\_Some\\_thermal\\_and\\_physical\\_characteristics\\_of\\_sintered\\_tin\\_bronze\\_bearings](https://www.researchgate.net/publication/288103212_Some_thermal_and_physical_characteristics_of_sintered_tin_bronze_bearings)
- [7] K. Ramasamy, K. Subramanian, G. Sozhan, Su. Venkatesan, "Studies on mechanical properties of the sintered bronze-graphite composites", *International Journal of Rapid Manufacturing*, January 2019, 8(1/2):16, Published Online: December 18, 2018, pp. 16–33. doi.org: 10.1504/IJRAPIDM.2019.097028
- [8] Rasha Hussein, Haydar Al-Ethari, Talib A. Jasim. Microstructure, hardness, and wear rate of hot squeezed Cu-10Sn-graphite composite prepared by stir casting. Microstructure, Hardness, and Wear Rate of Hot Squeezed Cu-10Sn-Graphite Composite Prepared by Stir Casting, July 2023, Conference: 4th International Scientific Conference of Engineering Sciences and Advances Technologies At: University of Babylon, doi.org: 10.1063/5.0163884

O.V. Kushchev, O.E. Terentjev, V.T. Varchenko, T.M. Chevichelova, R.E. Kostyunik, O.P. Umanskyi

METHOD FOR INCREASING THE NICKEL-GRAPHITE-BASED COMPOSITE PLASMA COATING WEAR RESISTANCE BY ADDING COPPER ALLOYS

**Background.** The article considers the possibility of expanding the areas of application of plasma coatings based on the nickel-graphite system by adding lead-free copper alloys to the composition, which have an affinity for the nickel shell of the nickel-graphite powder and, in addition to preserving the tribotechnical properties of nickel-graphite, can provide the necessary level of the coating cohesion.

**Objective.** The paper aims to study the effect of the content of the copper alloy CuAl10Ni5Fe4 when added to nickel-graphite (NPG-75) on the tribotechnical characteristics of the composite plasma coating.

**Methods.** As part of the work to determine the influence of the copper alloy content in nickel-graphite on the tribotechnical properties of the plasma composite coating, friction and wear tests were conducted on samples with 35, 50, 75 and 90 wt. % copper alloy CuAl10Ni5Fe4 in nickel-clad graphite NPG-75 (75 wt. % nickel). The double copper-zinc alloy CuZn10 was used as a standard.

**Results.** It has been experimentally established that plasma coatings based on NPG-75 with the addition of 50 wt. % CuAl10Ni5Fe4 have wear resistance increased by 10 times compared to pure NPG-75 with a friction coefficient significantly lower (0.36) than the CuZn10 standard (0.52). The coating on the counterbody of DIN C45 (hardness 45-48 HRC) is the smallest among the friction pair that were investigated in this work. Reducing the copper alloy content to 35 wt. % is impractical, since this results in active wear of the coating material and its spreading onto the counter body. Further increase in the content of CuAl10Ni5Fe4 powder in the composition leads to the occurrence of seizure in the contact zone, as evidenced by a sharp (10-fold) increase in the wear of the coating samples, an increase in the temperature in the contact zone, and a ~2-fold increase in the friction coefficient.

**Conclusions.** The optimal content of CuAl10Ni5Fe4 in a plasma coating based on NPG-75 is about 50 wt. %. This material allows you to reduce the friction coefficient from 0.52 (CuZn10) to 0.36 when paired with steel DIN C45. The mass wear of the steel counterbody is also significantly reduced, probably due to a change in the wear mechanism from adhesive (seizing) to oxidative wear. This allows us to significantly expand the scope of application of the Ni-C + CuAl10Ni5Fe4 material in aviation and space technology.

**Keywords:** nickel-graphite; composite powder; plasma coating; chemical composition; structure; friction and wear.

Рекомендована Радою  
Навчально-наукового інституту матеріалознавства  
та зварювання імені Є.О. Патона КНУ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
11 листопада 2024 року

Прийнята до публікації  
30 червня 2025 року