

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.1(98).17358

М. В. КІНДРАЧУК¹, Н. М. СТЕБЕЛЕЦЬКА², М. А. ГЛОВИН¹,
І. В. КОСТЕЦЬКИЙ¹

¹Національний авіаційний університет

²ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ТЕРМОДИНАМІЧНОГО СТАНУ НА ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕВТЕКТИЧНИХ ПОКРИТТІВ

Розглянуто особливості впливу термодинамічного стану на процеси формування триботехнічних властивостей евтектичних покриттів на основі заліза з тугоплавкими карбідами та борідами. Покриття одержували КІБ і газотермічними методами, що забезпечили велику швидкість нагрівання евтектичного сплаву, малий час існування розплаву і наступне швидке охолодження на порівняно холодній підкладці до появи нерівноважних станів, що виявляються у виді зміни механізму евтектичної кристалізації. Встановлено, що в досліджуваних евтектичних покриттях одночасно з рівноважними утворюються нерівноважені фази. Показано, що співвідношенням між цими фазами, а також структурою і, отже, триботехнічними і корозійними властивостями отриманих евтектичних покриттів можна керувати шляхом відпалу. Високотемпературний дифузійний відпал приводить до зміни фазового складу і структури покриттів, а також змінює хімічну активність структурних складових з утворенням окисних плівок. В парі тертя вони відіграють роль твердого мастила, які здатні ефективно знижувати знос не тільки покриття, але і пари тертя в цілому, що дозволяє розширити коло триботехнічних задач, пов'язаних зі зменшенням сумарного зносу пари тертя в умовах граничного тертя.

Ключові слова: евтектичні покриття, відпал, зносостійкість.

Стан проблеми. Практично усі сплави, що використовуються в техніці - сталі, чавуни, сплави на основі алюмінію, титана, міді, хрому, молібдену, вольфраму і т.д., знаходяться в метастабільному стані. Властивості цих сплавів, обумовлені різноманітням метастабільних фаз і структур, мають можливість щодо керування ними шляхом зсуву системи від положення термодинамічно рівноважного до нерівноважних станів [1–4]. З появою джерел високої концентрації енергії (лазерна обробка, газотермічні методи напилювання, електронний промінь, високо частотне індукційне нагрівання і т.д.) можливості керування метастабільними фазами і структурами сплавів істотно розширилися [5–9], у порівнянні з традиційними методами обробки (об'ємне гартування, відпал, відпуск, старіння). Використання таких джерел дозволило реалізувати швидкісний температурний вплив у локальних об'ємах, що відкрило нові можливості поєднання різного ступеня метастабільних станів і створення композицій незвичайних структурно-фазових складів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз результатів сучасних термічних і комбінованих методів обробки існуючих сталей і сплавів показує, що чим більше різноманіття в них метастабільних станів, тим вище можливості керування їхнім поведінням, тобто властивостями [10].

Любий евтектичний сплав, так як і сталі, може знаходитися в різних нерівноважних станах. Ці стани виявляються у виді нерівноважної структури або появи метастабільних фаз, що має місце при створенні екстремальних умов кристалізації з рідкого стану, наприклад, за великих швидкостей охолодження [11]. Зі зміною швидкості охолодження відбувається зміна механізму евтектичної

кристалізації з утворенням трьох типів структур: грубого конгломерату фаз, структур кооперативного росту, тонкого конгломерату фаз [12]. Кожна з перерахованих структур відповідає різному ступеню відхилення від положення термодинамічної рівноваги і контролюється швидкістю роздільної дифузії атомів перед фронтом кристалізації. Найбільш рівноважна структура грубого конгломерату фаз (малі швидкості охолодження), найбільш нерівноважна структура – тонкого конгломерату фаз (максимальні швидкості охолодження). У широкому діапазоні швидкостей охолодження між ними формуються колоніальні структури, обумовлені кооперативним ростом фаз, що складають евтектику. У залежності від ступеня відхилення від термодинамічної рівноваги, ці структури мають різну стабільність – найбільш стабільна структура грубого конгломерату фаз.

За швидкого охолодження з рідкого стану в евтектичних сплавах можлива поява метастабільних фаз. В якості таких фаз виступають хімічні сполуки, що існують на відповідній діаграмі фазових рівноваг, але в іншій температурно-концентраційній області (метастабільні фази I роду), або, сполуки, що не існують на цій діаграмі (метастабільні фази II роду).

Таким чином, змінюючи швидкість охолодження евтектик, з'являється можливість керувати їхніми властивостями: механічними, фізичними, хімічними, експлуатаційними. Це, наприклад, широко використовується на практиці при підборі оптимального поєднання властивостей евтектоїдних сталей і чавунів [10–12].

Постановка завдання. Шляхом керування різним ступенем метастабільності станів у евтектичних покриттях на основі заліза, зміцнених тугоплавкими карбідами і борідами, здійснити регулювання їхніх триботехнічних властивостей.

Результати досліджень. У литих евтектичних сплавах на основі перехідних металів з тугоплавкими фазами проникнення, унаслідок малої взаємної розчинності, практично, поєднуються вихідні властивості фаз, що утворюють її [10; 11]. Фази проникнення мають високу температуру плавлення, твердість, міцність, пружність, хімічну та термодинамічну стійкість і зносостійкість. Поєднання фаз проникнення з менш твердою, але більш пластичною металевою матрицею додає таким евтектикам унікальні властивості. Так, сплави на основі заліза з тугоплавкими карбідами і борідами в литому стані (табл. 1, 2) мають високу зносостійкість у поєднанні з високою корозійною стійкістю, міцністю, технологічністю [12]. Вони не містять дефіцитних або дорогих компонентів. Ці властивості відкривають широкі можливості для використання зазначених евтектик у вузлах тертя машин і механізмів.

Таблиця 1

Хімічний склад евтектичних сплавів

Марка сплаву	Хімічний склад, мас. %									
	Cr	Ni	Ti	V	Al	Cu	B	C	Mn	Fe
ВТН	15,0	7,7	3,2	7,9	5,6	–	1,4	1,9	–	56,8
ХТН	20	8,0	2,5	–	5,6	–	2,6	–	–	61,3
ХВС	13,0	–	–	12,0	–	1,0	–	2,9	–	71,1

Таблиця 2

Фазовий склад евтектичних сплавів

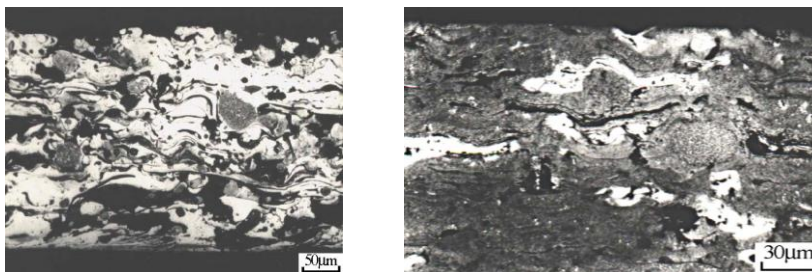
Фазовий склад		Кількість фаз в евтектиці, мас. %
Матриця	Зміцнююча фаза	
12X18H9T	TiB ₂ +VC	TiB ₂ -4,6; VC-9,8
12X18H9T	TiB ₂ + CrB ₂	TiB ₂ -4,4; CrB ₂ -7,5
30X13	VC	VC-17,0

У розглянутих евтектичних сплавах у литому стані фази приривнення утворюють зміцнюючий каркас, що несе основне навантаження при навантаженні. Металева матриця (твердий розчин на основі заліза) виконує функцію передачі і перерозподілу напруг між окремими гілками несучого каркасу з фаз приривнення. Оскільки взаємна розчинність фаз у цих сплавах обмежена, з'являється можливість окремого легування залізної матриці металами, що можуть додавати їй необхідні властивості. Наприклад, легування хромом підвищує корозійну стійкість твердого розчину на основі заліза, а легування нікелем призводить до стабілізації γ -заліза, що зберігає високі пластичні і міцнісні характеристики. На цьому принципі засноване легування широко розповсюджених нержавіючих сталей аустенітного класу типу 18-8 (18 відсотків хрому і 8 відсотків нікелю). Металева матриця розглянутих евтектик легована за тим же принципом, тобто має досить високу корозійну стійкість і високу пластичність, характерні для сталей типу 18-8.

Завдяки вище перерахованим особливостям евтектичні сплави на основі заліза з тугоплавкими карбідами і боридами поєднують у собі властивості легованого твердого розчину на основі γ -заліза і високі міцнісні та триботехнічні властивості фаз приривнення. Використання триботехнічних матеріалів у литому стані має обмежене застосування, оскільки при терті працюють поверхневі і приповерхні шари.

Покриття із зазначених вище евтектик, одержували КІБ (конденсація, стимульована іонним бомбардуванням) і газотермічними методами. Переважне використання мікрокраплинної складової продуктів дугового розпилення литого катода в методі КІБ дозволяє зберегти його фазовий склад в покритті. Таким чином, можна чекати в одержуваних покриттях високих триботехнічних і корозійних властивостей, властивих евтектичним сплавам у литому виді.

Необхідно відзначити, що особливістю обраних технологій, є велика швидкість нагрівання евтектичного сплаву, малий час існування розплаву (частки секунди) і наступне швидке охолодження на порівняно холодній підкладці. Ці особливості призводять до появи нерівноважних станів, що виявляються у виді зміни механізму евтектичної кристалізації. Замість колоніальних структур, властивих литому станові, утворюються структури тонкого конгломерату фаз (рис. 1), і з'являється велика кількість метастабільних фаз (табл. 3, 4).



а

б

Рис. 1. Структура детонаційного евтектичного покриття ВТН: а – вихідний (напилений) стан з великою кількістю областей тонкого конгломерату фаз («білі шари»); б – відпал покриття при $T = 0,75 T_{пл}$, $\tau = 0,5$ годин

Рентгеноструктурний фазовий аналіз показує, що в досліджуваних евтектичних покриттях поряд з рівноважними фазами, що існують на діаграмі фазових рівноваг, утворюються нерівноважні фази I і II роду (див. табл. 3).

Склад і кількість метастабільних фаз визначають триботехнічні і корозійні властивості досліджуваних покриттів. Співвідношенням між рівноважними і нерівноважними фазами (див. табл. 3, 4), а також структурою і, отже, властивостями отриманих евтектичних покриттів можна керувати шляхом відпалу.

Таблиця 3

Фазовий склад евтектичних покриттів

Евтектика	Фазовий склад		
	Вихідний	Відпал $0,75 T_{пл}$	
		0,5 год	5 год
ВТН	$\alpha' + \gamma' + \gamma + VC + TiC + VC' + CrB_2$	$\gamma' + VC + CrB_2 + \gamma + TiC'$	$\gamma' + \gamma + VC + VC'$
ХВС	$\alpha + \gamma' + \gamma + VC' + Cr_{23}C_6 + Cr_3C_2$	$\alpha + \gamma' + VC' + Cr_3C_2 + Cr_{23}C_6$	$\alpha + \gamma' + VC' + Cr_{23}C_6$
ХТН	$\alpha' + \gamma + TiC'$	$\alpha' + \gamma' + TiC'$	$\alpha' + \gamma' + TiC' + CrB_2 + TiB_2$

Таблиця 4

Фазовий склад евтектичних покриттів ВТН за різних температур відпалу

№ з/п	Температура відпалу, К	Фазовий склад	
		Матриця	Зміцнююча фаза
1	Вихідний	α	TiC
2	448	α	TiC
3	488	α	TiC
4	533	α	$V_2C + VC$
5	603	γ	$V_2C + VC$
6	633	γ	$TiB_2 + Fe_3V_3C$
7	748	γ	$TiB_2 + Fe_3V_3C$
8	803	γ	$TiB_2 + Fe_3V_3C + \theta$
9	953	γ	$TiB_2 + Fe_3V_3C + Fe_{23}(C,B)_6 + Fe_3C$
10	1023	γ	$TiB_2 + Fe_3V_3C + Fe_{23}(C,B)_6 + Fe_3C$

На рис. 2 наведені мікроставовості складових вихідних (напилених) і відпалених евтектичних газотермічних покриттів. Високотемпературний дифузійний відпал при ($0,75 T_{пл}$) приводить як до зміни фазового складу покриттів, так і до зміни їхньої структури (див. табл. 3, рис. 1, б). Крім того, відпал змінює хімічну активність структурних складових евтектичних покриттів (збільшення травимості, у порівнянні з вихідним, напиленим станом) і високотемпературну окислюваність.

Утворення окисних плівок за високих температур на повітрі відіграє важливу роль у триботехнічних властивостях, особливо при терті ковзання без мастила. Окисні плівки, що утворюються при терті, їхній склад, структура, товщина, адгезія відіграють роль твердого мастила, змінюють триботехнічні характеристики. Окисні плівки здатні ефективно знижувати знос не тільки покриття, але і пари тертя в цілому. Таким чином, змінюючи ступінь нерівноважного стану досліджуваних евтектичних покриттів можна керувати триботехнічними властивостями пари тертя. Це дуже важлива якість, оскільки, у даний час відома досить обмежена кількість евтектичних металевих систем (на основі свинцю), триботехнічними властивостями яких можна керувати шляхом

зміни ступеня метастабільного стану [13-14]. Недоліком таких систем є низька міцність, що не дозволяє використовувати їх у вузлах тертя з високими контактними навантаженнями. Оскільки досліджувані евтектичні покриття в якості основи містять тверді розчини на основі заліза, зміцнені тугоплавкими фазами проникнення, контактні навантаження в цих покриттях можуть бути істотно вищі. Це дозволяє використовувати передбачувані евтектичні покриття для вирішення більш широкого кола задач триботехніки.

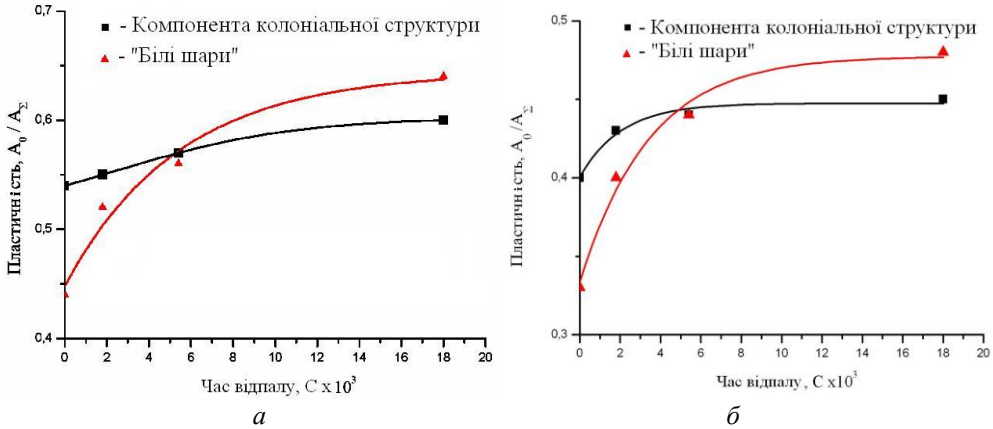


Рис. 2. Зміна мікроставовостей структурних складових газотермічних евтектичних покриттів ВТН (*a* – детонаційне) і (*б* – плазмове) у залежності від часу відпалу за температури $0,75T_{пл}$

Змащення в парі тертя з евтектичними покриттями дещо згладжує процеси, що відбуваються при сухому терті ковзання, сприяючи при цьому реалізації принципів самоорганізації структури тертьових матеріалів.

Висновки. Таким чином, газотермічні і КІБ евтектичні покриття на основі заліза з тугоплавкими карбідами і боридами мають нерівноважну структуру і містять метастабільні фази, що визначають їх триботехнічні властивості при сухому терті ковзання. Ці ж принципи можна використовувати в умовах наявності мастила між тертьовими поверхнями.

Шляхом зміни ступеня нерівноважності термодинамічного стану вивчених евтектичних покриттів (відпал) можна керувати їх триботехнічними і корозійними властивостями.

Застосування вивчених евтектичних покриттів дозволяє розширити коло триботехнічних задач, пов'язаних зі зменшенням сумарного зносу пари тертя в умовах граничного тертя.

Список літератури

1. М. А. Филиппов, В. С. Литвинов, Ю. Р. Немировский (1988) Стали с метастабильным аустенитом. М.: Металлургия, 256.
2. Л.С. Малинов, И.Е. Мальшева (2001) Получение в структуре сталей и чугунов метастабильного аустенита с целью повышения абразивной и ударно-абразивной износостойкости. Вісник ПДТУ: зб. 208 наук. праць. Маріуполь: ПДТУ, 11, 96-100. Сер. : Технічні науки.
3. А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов (2021) Основы лазерного термоупрочнения сплавов. Директ-Медиа, 158.

4. M. Kindrachuk, M. Pashechko, W. Panarin, K. Lenik, M. Barszcz, O. Tisov, A. Kornienko (2017) Theoretical fundamentals of deposition and technologies of wear resistant eutectic coatings. Lublin: Politechnika Lubelska, 112.

5. А. П. Чейлях (2003) Экономно легированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии. Харьков: Национальный научный центр Харьковский физико-технический институт, 212.

6. М.В. Кіндрачук, В.В. Харченко, О.В. Тісов, І.А. Гуменюк, Н.М. Стебелецька, А.О. Юрчук, А.Л. Гловин (2021) Підвищення зносостійкості плазових евтектичних покриттів термоциклованням лазером. Проблеми тертя та зношування, 1 (90), 78–85.

7. Ю. Н. Таран-Жовнир (1998) Стрoение эвтектик и создание новых сплавов эвтектического типа. Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. К.: Наукова думка, 176 – 197.

8. Е. И. Марукович, М.И. Карпенко (2005) Износостойкие сплавы. М.: Машиностроение, 428.

9. Л.Ю. Іонова (2017) Области формування повністю та обмежено метастабільних та подвійних евтектик, що невідображуються у метастабільних діаграмах. Металознавство та обробка металів, 2, 33 – 37.

10. М.М. Ямшинський, Г.Є.Федоров, К.С. Радченко (2015) Прогнозування ливарних і механічних властивостей жаростійких сталей. Металл и литье України, 10 (269) 16 - 22.

11. М.С. Ковальченко, П.І. Лобода (2008) Бор, карбид бора, бориди и материалы на их основе. Неорганическое материаловедение. Материалы и технологии. К. Т. 2, кн. 1.

12. А. К. Шурин, В. Е. Панарин, М. В. Кіндрачук (1981) Износостойкость нержавеющей эвтектичных сплавов с фазами внедрения. Проблемы трения и изнашивания. К.: Техника, 19, 17-28.

13. М.В. Кіндрачук, О.В. Тісов, Н.М. Стебелецька (2014) Розробка градієнтних покриттів для накладок гальмівних пристроїв. Технологічний аудит та резерви виробництва. Харків, 3/2 (17), 7-16.

14. А. Г. Косторнов, О. І. Фушич (2005) Вплив складу порошкового підшипникового сплаву на основі міді та його службові характеристики. Порошковая металлургия, 3, 4, 120–126.

Стаття надійшла до редакції 08.02.2023.

Кіндрачук Мирослав Васильович — член-кореспондент НАН України, докт. техн. наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел/факс: +38 044 406 77 73, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>.

Стебелецька Наталія Миронівна – канд. техн. наук, доцент кафедри прикладної механіки та технічного сервісу ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут» Тернопільська область, м. Бережани, вул. Академічна, 20, 47501, E-mail: stebeletska@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2726-0932>.

Гловин Михайло Андрійович – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національного авіаційного університету, проспект Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, +38(044)4067773, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2525-9767>.

Костецький Іван Володимирович – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національного авіаційного університету, проспект Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, +38(044)4067773, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2815-0230>.

M. V. KINDRACHUK, N. M. STEBELETSKA, M. A. HLOVYN, I. V. KOSTETSKYI

REGULARITIES OF THE INFLUENCE OF THERMODYNAMIC STATE ON THE TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF EUTECTIC COATINGS

The influence of the thermodynamic state on the form processes of tribotechnical properties eutectic coatings on the iron base containing refractory carbides and borides are considered. Coverage was received KIB and gas-thermal methods, which ensured a high rate of heating eutectic coatings, a short time for the creation of the melt and the subsequent rapid cooling on a relatively cold substrate until the appearance of non-equilibrium states, which are manifested in the form of a change in the mechanism of eutectic crystallization. It was established that in the studied eutectic coatings, non-equilibrium phases are formed at the same time as equilibrium phases. It is shown that the ratio between these phases, as well as the structure and, therefore, the tribotechnical and corrosion properties of the obtained eutectic coatings can be controlled by annealing. High-temperature diffusion annealing leads to a change in the phase composition of coatings and their structure, and also changes the chemical activity of the structural components of eutectic coatings with the formation of oxide films. In the friction pair, they play the role of a solid lubricant, which can effectively reduce the wear of not only the coating, but also the friction pair as a whole, which allows to expand the range of tribotechnical tasks related to reducing the total wear of the friction pair in conditions of extreme friction.

Key words: eutectic coatings, annealing, resistance

References

1. M. A. Filippov, V. S. Litvinov, Yu. R. Nemirovskiy (1988) *Stali s metastabilnym austenitom*. M.: Metallurgiya, 256.
2. L.S. Malynov, Y.E. Malysheva (2001) *Poluchenie v strukture stali y chuhunov metastabilnogo austenita s tselyu povysheniya abrazivnoj i udarno-abrazivnoj iznosostoykosti*. *Visnyk PDTU: zb. 208 nauk. prats.* – Mariupol: PDTU, 11, 96-100. Ser.: *Tekhnichni nauky*.
3. A. G. Grigoryants, A. N. Safonov (2021) *Osnovy lazernogo termouprochneniya splavov*. Direct - Media, 158.
4. M. Kindrachuk, M. Pashechko, W. Panarin, K. Lenik, M. Barszcz, O. Tisov, A. Kornienko (2017) *Theoretical fundamentals of deposition and technologies of wear resistant eutectic coatings*. Lublin: Politechnika Lubelska, 112.
5. A. P. Cheilyah (2003) *Ekonomno legirovannyye metastabilnyie splavy i uprochnyayuschie tehnologii*. Harkov.- *Natsionalnyi nauchnyi tsentr Harkovskii fiziko-tehnicheskii institut*, 212.
6. M.V. Kindrachuk, V.V. Kharchenko, O.V. Tisov, I.A. Humeniuk, N. M. Stebeleetska, A.O. Yurchuk, A.L. Hlovyn (2021) *Pidvyshennia znosostijkosti plazmovykh pokryttiv termotsykljuvanniam lazerom*, *Problemy tertia ta znoshuvannia*, 1 (90), 4-18.
7. Yu. N. Taran-Zhovnyr (1998) *Stroeniie evtektik i sozdaniie novykh splavov evtekticheskogo tipa*. *Suchasne materialoznavstvo XXI storichchia*. K.: Naukova dumka, 176 – 197.
8. Ye. I. Marukovich, M.I. Karpenko (2005) *Iznosostoikiye splavy*. M.: *Mashynostroenie*, 428.
9. L.Yu. Ionova (2017) *Oblasti formuvannia povnistiu ta obmezhenno metastabilnykh ta podvijnykh evtektik, shcho nevidobrazhuiutsia u metastabilnykh diahramakh*. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2, 33 – 37.
10. M.M. Yamshynskiy, G.Ye.Fedorov, K.S. Radchenko (2015) *Prohnozuvannia lyvanykh i mekhanichnykh vlastyvostei zharostiikykh stali*. *Metall i litye Ukrainy*, 10 (269) 16-22.
11. M.S. Kovalchenko, P.Y. Loboda (2008) *Bor, karbyd bora, borydy y materyaly na ykh osnove*. *Neorhan. materyalovedenye. Materyaly i tehnolohyy*. K. T. 2, kn. 1.
12. A. K. Shurin, V. E. Panarin, M. V. Kindrachuk (1981) *Iznosostoykost nerzhaveyuschih evtektichnih splavov s fazami vnedreniya*. *Problemy treniia i iznashivaniia*, 19, 17-28.

13. M.V. Kindrachuk, O.V. Tisov, N.M. Stebeletska (2014) Rozrobka gradijentnykh pokryttiv dlia nakladok galmivnykh prystrojiv. Tekhnolohichniy audit ta rezervy vyrobnytstva. Harkiv, 3/2 (17), 7-16.

14. A. G. Kostornov, O. I. Fushich (2005) Vplyv skladu poroshkovoho pidshipnikovoho splavu na osnovi midi ta yogo sluzhbovi harakterystyky. Poroshkovaia metallurgija, 3,4, 120–126.

Kindrachuk Myroslav Vasyliovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>.

Stebeletska Nataliia Myronivna – candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mechanics and Technical Service SS NULES of Ukraine “Berezhany Agrotechnical Institute”, St. Akademichna, 20, Berezhany, Ukraine, 47501, E-mail: stebeletska@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2726-0932>.

Hlovyn Mykhailo Andriyovych – PhD student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2525-9767>.

Kostetskyi Ivan Volodymyrovych – PhD student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2815-0230>.