

- Superhard Materials*, 1, 18–35 [in Russian].
- Ivzhenko, V. V., Novikov, N. V., Sarnavskaya, G. F. et al. (2009). Issledovanie uprugogo posledeystviia pri inzhetsionnom lite termoplastichnykh mass na osnove poroshkov SiC, AlN, WC i yego vliianiia na mekhanicheskie svoistva materiala zagotovok izdelii [Investigation of the elastic aftereffect at injection molding of thermoplastic masses on the base of SiC, AlN, WC powders and its influence on the mechanical properties of the preforming material]. *Sverkhtverdyye mater. – Superhard Materials*, 1, 49–57 [in Russian].
 - Ivzhenko, V. V., Kaidash, O. N., Sarnavskaya, G. F. et al. (2016). Poluchenie i svoistva goriachepressovannykh materialov na osnove karbida kremniia s dobavkami karbidov bora i titana [Production and properties of hot-pressed materials based on silicon carbide with addition of boron carbide and titanium]. *Sverkhtverdyye mater. – Superhard Materials*, 5, 25–34 [in Russian].
 - Lee, S. K., & Kim, C. H. (1994). Effects of α -SiC versus β -SiC starting powders on microstructure and fracture toughness of SiC sintered with Al₂O₃-Y₂O₃ additives. *J. Amer. Ceram. Soc.*, Vol. 77, 6, 1655–1658.
 - Fan, J. and Chu, P.K. (2014). Silicon Carbide Nanostructures. Fabrication, structure and properties. Chapter 2 – General Properties of Bulk SiC. *Engineering Materials and Processes*. 9th. 7–114). Springer International Publishing Switzerland.
 - Grigorev, O. N., Gogotsi, G. A., Gogotsi, YU. G., Subbotin, V. I., & Brodnikovskii, N. P. (2000). Poluchenie i svoistva keramiki sistemy SiC-B₄C-MeB₂ [Production and properties of ceramics of the SiC-B₄C-MeB₂ system]. *Poroshkovaia metallurgiiia – Powder metallurgy*, 5/6, 29–42 [in Russian].

УДК 621.921.34 – 419: 004.942

А. С. Беляев, В. С. Чернобай;
Р. С. Шмегера, О. П. Виноградова, кандидати технічних наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул.Автозаводська 2,
04074 м. Київ*

ВПЛИВ МІЖФАЗНОЇ ГРАНИЦІ «АЛМАЗ-МЕТАЛЕВА ЗВ'ЯЗКА» НА КОЕФІЦІЄНТ ТЕРМІЧНОГО РОЗШИРЕННЯ ТА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРОСПЕЧЕНИХ КАМ

Розроблено мікромеханічну модель композиту з недосконалим контактом фаз, яка враховує вплив ступеню недосконалості міжфазної границі “алмаз-металева зв'язка” на коефіцієнт термічного розширення (КТР) та зносостійкість алмазовмісного композиту (КАМ). Міжфазна границя моделюється відповідними контактними умовами на поверхні розділу, а пружно-механічні константи матеріалів фаз визначаються дослідним шляхом або з теоретичних моделей нижчого рівня. Отримані теоретичні дані експериментально підтверджені для зразків електроспечених КАМ на зв'язці NiSn(6%) з включеннями синтетичних алмазів з різними типами покриттів та без. Модель дозволяє якісно оцінити вплив контактної пружності міжфазної границі та розміру включень на КТР. Встановлено, що механічне нанесення хрому на алмазні зерна сприяє підвищенню КТР та зносостійкості КАМ даного класу, за рахунок більш якісного міжфазного зв'язку.

Ключові слова: модель, міжфазна границя, контактна пружність, коефіцієнт термічного розширення, алмазовмісні композити, зносостійкість.

Вступ

Алмазовмісні композити на металевих зв'язках широко використовуються для виробництва бурового та каменеобробного інструменту. Оскільки елементи з КАМ у такому інструменті працюють при значних термосилових навантаженнях, здатність КАМ утримувати алмази у робочому шарі та відводити тепло з робочої зони є суттєвими чинниками, які впливають на якість роботи інструменту. Для наведених факторів впливу стан міжфазної границі «алмаз-зв'язка» є визначальним. Метою даної роботи є розробка способу теоретичної оцінки такого впливу.

В основу теоретичного підходу покладено мембранну модель міжфазної поверхні, у якій недосконала міжфазна границя моделюється заданням відповідних контактних умов на поверхні розділу. Контактна пружність є параметром цієї континуальної моделі і являє собою кількісну характеристику міжфазної границі композиту. Для її оцінки використано коефіцієнт термічного розширення композиту, який є структурно-чутливим параметром. Його вимірювання і наступний аналіз дозволяють зробити висновок про стан міжфазної границі алмаз-зв'язка і працездатність створеного на основі КАМ алмазного інструменту.

Теоретична модель

Постановка задачі. В якості мікромеханічної моделі розглянуто композит матричного типу з ізотропними фазами, пружні властивості яких задано модулем Юнга $E^{(i)}$ і коефіцієнтом Пуасона $\nu^{(i)}$. Індекс $i = 0$ використано для матриці, $i = 1$ – для включень. Постановка модельної крайової задачі для оцінки ефективної пружності композиту з адгезійним контактом включає рівняння пружної рівноваги, умови зовнішнього навантаження та умови адгезійного контакту на поверхні розділу S . Останні задано у вигляді

$$T_n^{(0)} = T_n^{(1)} = D_n (u_n^{(0)} - u_n^{(1)}), \quad (2)$$

де T_n – нормальна компонента вектору нормальних напружень \mathbf{T} , D_n – контактна пружність, u_n – переміщення.

В роботі розвинуто підхід, який базується на схемі усереднення Максвела і дозволяє одержати прямий аналог формули Хасельмана-Джонсона для ефективних пружних властивостей композита матричного типу зі сферичними включеннями і недосконалим контактом фаз.

Мікромеханічна модель для оцінки ефективної пружності та термічного розширення композиту. Запропонований Максвелом [1] підхід до визначення ефективних властивостей структурно-неоднорідних матеріалів базується на порівнянні асимптотик збурень від представницького об'єму реального композиту і еквівалентного однорідного включення з задалегідь невідомими ефективними властивостями. Що важливо, умова рівності вказаних асимптотик еквівалентна умові рівності відповідних дипольних моментів [2]. При цьому, дипольний момент представницького об'єму дорівнює сумі дипольних моментів кожного окремого включення. Це дозволяє сформулювати схему усереднення по Максвелу для пружності у вигляді:

$$\sum_i \mathbf{t}^{(i)}(\mathbf{C}_i) = \mathbf{t}(\mathbf{C}^*); \quad \sum_i V_i = cV_{eq}; \quad (1)$$

де c – об’ємний вміст включень в композиті, \mathbf{t} –тензор дипольних моментів включень, V_i – об’єм i -того включення, V_{eq} – об’єм еквівалентного включення. З цих рівнянь тензор ефективної пружності композиту \mathbf{C}^* (тензор, у загальному випадку) визначається однозначним чином. Макроскопічна пружна поведінка ізотропного композиту повністю визначається двома ефективними константами, зокрема модулями об’ємного стиску k^* та зсуву μ_1^* :

$$k^* = \frac{(C_{1111}^* + 2C_{1122}^*)}{3}; \quad \mu_1^* = \frac{(C_{1111}^* - C_{1122}^*)}{2} = C_{1212}^*$$

Для визначення ефективного коефіцієнту термічного розширення для КАМ з недосконалим контактом фаз, скористаємось мультипольним підходом [3], який базується на розвиненні переміщень і напружень в ряд по гармонікам з невідомими коефіцієнтами, у поєднанні зі схемою Максвела (1). Тепер достатньо розглянути нагрів композиту на ΔT за відсутності зовнішніх навантажень. Відповідна одночастковій моделі крайова задача є центрально-симетричною, що суттєво спрощує її аналіз. Так, мультипольні розклади переміщень та напружень містять лише одну гармоніку. Їх підстановка у (2) після певних алгебраїчних перетворень дозволяє отримати вираз для ефективного об’ємного модуля у вигляді

$$\frac{k^*}{k_0} = \frac{1 + \frac{4\mu_0}{3k_0} c A_{00}^{(1)}}{1 - c A_{00}^{(1)}}, \quad (3)$$

де $A_{00}^{(1)}$ - коефіцієнт при першій гармоніці розвинення у ряд переміщень у включеннях. При всебічному розтягу $E_{11} = E_{22} = E_{33} = 1$ $A_{00}^{(1)}$ є єдиним ненульовим коефіцієнтом і дорівнює

$$\frac{A_{00}^{(1)}}{R^3} = \left[\frac{3k_1 R D_n}{2\mu_0(3k_1 + R D_n)} - \frac{3k_0}{2\mu_0} \right] / \left[2 + \frac{3k_1 R D_n}{2\mu_0(3k_1 + R D_n)} \right].$$

Порівнюючи отримане співвідношення (3) із аналогічними виразами для еквівалентного включення з властивостями k^* та α^* , отримаємо формулу для КТР:

$$\alpha^* = \alpha_0 + \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{(1/k_e - 1/k_0)} \left(\frac{1}{k^*} - \frac{1}{k_0} \right) \quad (4)$$

де $k_e = \frac{3k_1 R D_n}{(3k_1 + R D_n)}$.

Дослідні дані

З метою дослідження впливу міжфазних границь на КТР та зносостійкість, методом інтенсивного електроспінання, були виготовлені зразки КАМ: на основі матриці $NiSn(6\%)$ з алмазами марки АС 300Т зернистістю 400/315 мкм без покриття та з покриттями гідриду титану (TiH_2) та хрому (Cr), нанесеними механічним способом; на основі матриці $NiSn(6\%)$ з алмазами марки АС160Т зернистістю 400/315 мкм з покриттям корбідом титану TiC , нанесеним іонно-плазмовим методом.

Коефіцієнт термічного розширення КАМ. На рис.1 приведено значення КТР, отримані

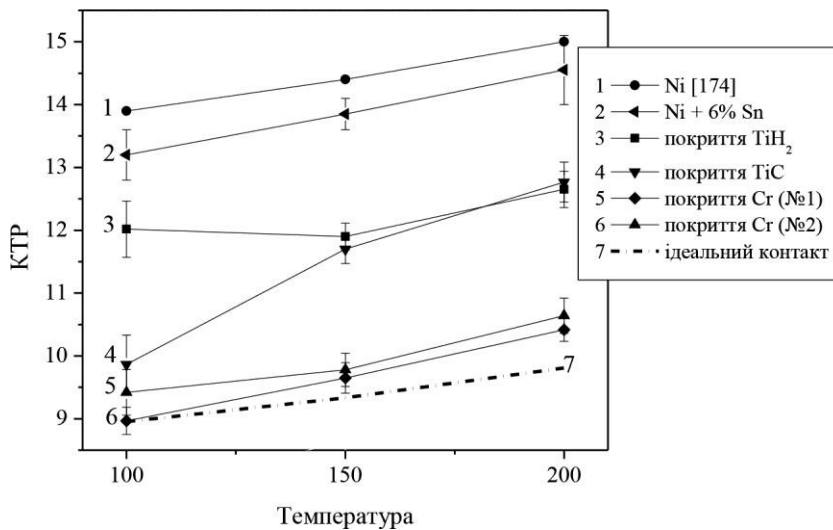


Рис. 1. Залежність коефіцієнта термічного розширення матеріалу зв'язки Ni6%Sn і КАМ від температури і матеріалу покриття

температури (погіршення контакту). КАМ з алмазами покритими хромом (лінії 5, 6) мають найменший КТР з усіх досліджених, що говорить про гарний контакт між фазами, який є максимально наближеним до ідеального.

Зносостійкість КАМ. Випробування на зносостійкість породоруйнівних елементів з КАМ проводили згідно методики наведеній у [4]. В якості елемента, для руйнування використали міцний сірий пісковик Торезького родовища України ІХ категорії буримості (твердість по штампу $P_{ш} = 2,90$ ГПа), який має стабільні фізико-механічні властивості, високу абразивність та твердість. Інтенсивність зносу I (мг/м) розраховувалася як співвідношення втрати маси породоруйнівного елемента $\Delta m = m_n - m_k$ до величини проходки L на елемент, де m_n та m_k (мг) – маса зразка відповідно до і після випробування:

$$I = \frac{\Delta m}{L}; \quad L = \frac{\pi D n}{60} t$$

де D – діаметр керну, м; n – частота обертання шпинделя станка, хв^{-1} ; t – тривалість руйнування, хв. Було виконано два дослідних випробування КАМ на зносостійкість, при заглибленні 0,5 мм. та 1 мм. Одержані дослідні дані наведено в таблицях 1 та 2.

Таблиця 1. Випробування породоруйнівних елементів з КАМ на зносостійкість при заглибленні 0,5 мм

№ елемента із КАМ	Зусилля притиску вставки, Н	Контактні напруження МПа	Втрата маси, мг	Інтенсивність зношування по масі, I , мг/км
1	200	3	4	5
1 – АС 300Т без покриття	200	2,76	69,0	70,8
2 – АС 300Т з механічно нанесеним покриттям TiH ₂	200	2,76	87,0	94,2

дослідним шляхом, в діапазоні температури від 100 до 200°C для чистого нікелю [5] (крива 1), зв'язки Ni6%Sn (крива 2) та КАМ з алмазами, покритими TiH₂ (крива 3), TiC (крива 4) і Cr (криві 5 і 6).

Штрих-пунктирна лінія 7 побудована відповідно до теоретичної моделі (4) в припущенні, що механічний контакт між фазами є ідеальним. Як і варто було очікувати з огляду на малий КТР ($1,0 \cdot 10^{-6}$ [1/К]) і великий модуль Юнга (1150 ГПа) алмазу, в останньому випадку КТР композиту є найменшим і зростає по мірі збільшення

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5
3 – АС160Т з іоно-плазмовим покриттям <i>Ti</i>	200	2,76	77,0	91,1
4 – АС 300Т з механічно нанесеним покриттям <i>Cr</i>	200	2,76	45,0	56,3

Таблиця 2. Випробування породоруйнівних елементів з КАМ на зносостійкість при заглибленні 1,0 мм

№ елементу із КАМ	Зусилля притиску вставки, Н	Контактні напруження МПа	Втрата маси, мг	Інтенсивність зношування по масі, <i>I</i> , мг/км
1 – АС 300Т без покриття	230	3,17	329	506,2
2– АС 300Т з механічно нанесеним покриттям <i>TiH₂</i>	230	3,17	189	337,5
3– АС160Т з іоно-плазмовим покриттям <i>Ti</i>	300	4,14	139	293,7
4– АС 300Т з механічно нанесеним покриттям <i>Cr</i>	250	3,45	114	271,4

Як видно з табл. 1, найвищу зносостійкість має зразок №4 з покриттям хрому, така ж тенденція зберігається і для даних таблиці 2, які відповідають заглибленню зразка в породу на 1,0 мм. Тут абсолютна величина інтенсивності зношування суттєво (до 5 разів) більша, оскільки в даному випадку величина навантаження на зразок була закритичною і відповідала режиму так званого блокованого різання. Але навіть в такому «критичному» випадку вплив типу покриття і обумовлених ним властивостей міжфазної границі є очевидним.

Аналіз та порівняння отриманих результатів

Теоретична модель (4) не тільки дозволяє розрахувати ефективний КТР композиту при різних контактних умовах між фазами, але і отримати теоретичні значення ефективного КТР композиту як функції радіусу включень для ряду значень контактної пружності D_n (рис. 2.) На цьому ж графіку, чорними кружечками позначено дослідні дані по КТР при $T = 150\text{ }^\circ\text{C}$ для композита з 100% концентрацією $c = 0,25$ алмазів зернистістю 400/315 (середній радіус $R = 180\text{ мкм}$), покритими хромом, карбідом титану та гідридом титану. Наведені дані демонструють суттєву залежність коефіцієнту термічного розширення композиту як від зернистості алмазів (питомої площі поверхні розділу фаз), так і від якості міжфазного контакту.

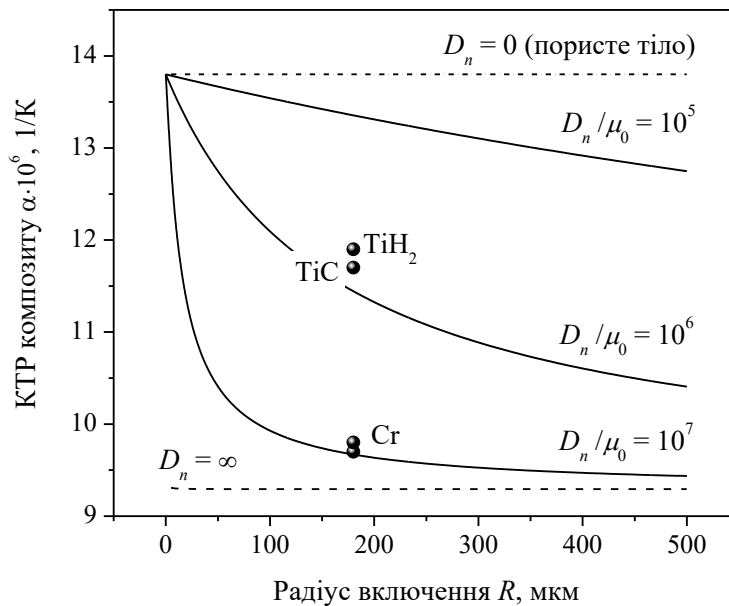


Рис.2. Залежність ефективного КТР КАМ від розміру включень. Нижня пунктирна пряма відповідає $D_n = \infty$ (ідеальний контакт), нижня штрих-пунктирна пряма – $D_n = 0$ (відсутність контакту); кружки – дослідні дані

На основі дослідних даних по КТР композита, шляхом розв’язання зворотної задачі, можна оцінити контактну пружність міжфазної границі. В таблиці 3. приведено значення ефективного КТР композиту, який містить алмазні кристали зернистістю 400/315 з покриттям, та перераховані за формулою (4) значення D_n/μ_0 [1/м].

Таблиця 3. Залежність КТР композиту α^* і контактної пружності D_n/μ_0 міжфазної границі КАМ від температури і матеріалу покриття

№	Алмази	$T = 100^\circ\text{C}$		$T = 150^\circ\text{C}$		$T = 200^\circ\text{C}$	
		α^* , [1/К]	D_n/μ_0 , [1/м]	α^* , [1/К]	D_n/μ_0 , [1/м]	α^* , [1/К]	D_n/μ_0 , [1/м]
1	покриття TiH_2	$12,0 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^5$	$11,9 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^5$	$12,6 \cdot 10^{-6}$	$6,3 \cdot 10^5$
2	покриття TiC	$9,9 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^6$	$11,7 \cdot 10^{-6}$	$7,9 \cdot 10^5$	$12,8 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^5$
3	покриття Cr (№1)	$9,4 \cdot 10^{-6}$	$7,1 \cdot 10^6$	$9,8 \cdot 10^{-6}$	$7,2 \cdot 10^6$	$10,6 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^6$
4	покриття Cr (№2)	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^7$	$9,7 \cdot 10^{-6}$	$9,0 \cdot 10^6$	$10,4 \cdot 10^{-6}$	$6,1 \cdot 10^6$

Розрахунки показують, що у випадку покриття алмазного зерна хромом значення D_n є на порядок вище ніж для титану. Цей результат є певною мірою неочікуваним, оскільки наявні літературні дані говорять про добру адгезію титану до алмазу. Імовірною причиною є те, що вибрані нами термобарочасові параметри процесу інтенсивного електроспінання для дослідних зразків КАМ не забезпечили надійного з’єднання алмазів з матрицею. Зокрема, негативні наслідки могла мати дисоціація TiH_2 з утворенням вільного водню у вигляді

пороутворення або гідрогенізації алмазних граней, яка призводить до катастрофічного зменшення роботи адгезії алмазу з металом [6]. Отримані значення D_n для покриття хрому є найбільш близькими до досконалого міжфазного контакту.

Отже зразки КАМ з алмазми покритими хромом мають найнижчий ефективний КТР, що обумовлено якісним міжфазним контактом який характеризується найвищим значенням контактної пружності.

Висновки

Розроблено мікромеханічну модель композиту з недосконалим контактом фаз для оцінки впливу контактної пружності міжфазної границі на коефіцієнт термічного розширення композиту. Модель дозволяє, шляхом вирішення оберненої задачі, кількісно оцінити значення контактної пружності міжфазної границі. Виконано і дослідно підтверджено теоретичну оцінку впливу розміру включень та ступеню недосконалості міжфазної границі на коефіцієнт термічного розширення. Дослідним шляхом доведено, що механічне нанесення хрому на алмазні зерна є на даний час найбільш ефективним способом підвищення зносостійкості та КТР електроспечених КАМ даного класу.

Разработана микромеханическая модель композита с несовершенным контактом фаз, учитывающая влияние степени несовершенности межфазной границы «алмаз – металлическая связка» на коэффициент термического расширения (КТР) и износостойкость алмазосодержащего композита (КАМ). Межфазная граница моделируется соответствующими контактными условиями на поверхности раздела, а упруго-механические константы материалов фаз определяются опытным путем либо из теоретических моделей низшего уровня. Полученные теоретические данные экспериментально подтверждены для образцов электроспеченных КАМ на связке NiSn (6%) с включениями синтетических алмазов с различными типами покрытий и без. Модель позволяет качественно оценить влияние контактной упругости межфазной границы и размера включений на КТР. Установлено, что механическое нанесение хрома на алмазные зерна способствует повышению КТР и износостойкости КАМ данного класса за счет более качественного межфазного контакта.

Ключевые слова: модель, межфазная граница, контактная упругость, коэффициент термического расширения, алмазосодержащие композиты, износостойкость.

A. S. Belyaev, V. S. Chernobai, R. S. Shmegeera, O. P. Vinogradova

EFFECT OF THE DIAMOND-METAL BINDER INTERFACE ON THE THERMAL EXPANSION COEFFICIENT AND WEAR RESISTANCE OF ELECTROSINTED DIAMOND COMPOSITES

The micromechanical model of a composite with an imperfect interface is developed. It considers the effect of the degree of imperfection of the diamond-metal interface on the coefficient of thermal expansion (CTE) and wear resistance of the diamond composite. The interphase boundary is modeled by the corresponding contact conditions at the interface and the elastic-mechanical constants of the phase materials are determined experimentally or from theoretical models of the lowest level. The obtained theoretical data were experimentally confirmed for the samples of composites produced by electrosintering method on a NiSn(6%) bond with inclusions of synthetic diamonds with different types of coatings and without coating. This model can evaluate the effect of the contact elasticity of the interface and the size of the inclusions on the CTE. It exhibits that the mechanical covering of chromium to diamond grains leads to an increase of CTE and wear resistance of diamond composites of this class, due to a better interfacial contact.

Key words: model, interphase boundary, contact elasticity, coefficient of thermal expansion, diamond-containing composites, wear resistance.

Література

1. Maxwell J. C. Treatise on Electricity and Magnetism. Vol. 1. – Oxford: Clarendon Press

- (1st edition.), 1873 . – 425 p.
2. Kushch V. I., Sevostianov I. Effective elastic moduli of a particulate composite in terms of the dipole moments and property contribution tensors // *International Journal of Solids and Structures*. – 2015. – 53. – P. 1–11.
 3. Kushch V. I. *Micromechanics of composites: multipole expansion approach*. – Elsevier, 2013. – 489 p.
 4. Інтенсивність зношування породоруйнівних елементів з КАМ в залежності від хімічного складу та способу нанесення покриттів на алмазні зерна / А. Л. Майстренко, А. П. Загора, Р. С. Шмегера та ін. // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: Изд-во ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2017. – Вып. № 20. – С. 469 – 481.*
 5. Hidnert P. Thermal Expansion of Some Nickel Alloys // *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. – 1957. – 58. – N 2. – P. 89–92.
 6. Monachon C., Weber L. Influence of diamond surface termination on thermal boundary conductance between Al and diamond // *Journal of Applied Physics*. – 2014. – 113. – 183504.
- Надійшла 12.06.18*

References

1. Maxwell, J. C.(1873). *Treatise on Electricity and Magnetism*. (Vols 1–3; vol. 1). Oxford: Clarendon Press (1st edition).
2. Kushch, V. I., Sevostianov, I. (2015). Effective elastic moduls of a particulate composite in terms of the dipole moments and property contribution tensors. *International Journal of Solids and Structures* 53, 1–11.
3. Kushch V. I. (2013). *Micromechanics of composites: multipole expansion approach*. Elsevier.
4. Maystrenko, A.L., Zakora, A.P., Shmegera, R.S., et. al. (2017). Intensivnist znoshuvannia porodoruivnykh elementiv z KAM v zalezhnosti vid himichnogo skladu ta sposobu nanesennia pokryttiv na almazni zerna [The intensity of wear of rock cutting tools from diamond composites, depending on the chemical composition and method of coating the diamond grains]. *Porodorazrushayushchii I metalloobrativayushchii instrument – tekhnika I tekhnologiya ego izgotovleniya i primineniya – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications, Vol. 20, 469–481 [in Ukrainian]*.
5. Hidnert, P. (1957). Thermal Expansion of Some Nickel Alloys. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. Vol. 58, 2, 89–92.
6. Monachon, C., Weber, L. (2014). Influence of diamond surface termination on thermal boundary conductance between Al and diamond. *Journal of Applied Physics*. Vol.113, 18, 183504.