

References

1. Mykhalichko, B., Hlovyak, T., Myskiv, M. (1995). Synthesis and structure of the complex $Rb_{11}[Cu_{15}Cl_{16}Br_6(Cu^{II}Cl_6)CuC\equiv CH]$ containing copper monoatsetilenid. Zhurnal neorganicheskoy khimii, 40 (5), 757–762.
2. Ushakov, A. E., Klenin, Yu. G., Sorina, T. G. et al (2009). Pat. 2420542 RU, MPK C 08 L 63/00. Method of producing fire-resistant binder for composite material produced in pultrusion process, fire-resistant binder and article. № 2009116498/05; zajavl. 04.05.2009; opubl. 10.11.2010.
3. Grygorenko, O. M., Yakovleva, R. A., Yefanova, V. V. et al (2007). Pat. 84988 UA, MPK C 08 L 63/00. Epoxy composite with lowered smoke formation. № a200705094; zajavl. 08.05.2007; opubl. 10.12.2008.
4. Yakovleva, R. A., Grygorenko, A. N., Bezugly, A. N. (2005). Influence of additives on the thermal-oxidative degradation processes filled epoxy polymers. Bulletin of the KNUVD, 2 (5), 192–196.
5. Bliznec, M. M. (1980). A. s. 958461 SSSR, MKL3 C 09 J 3/16, C 08 L 63/02. Glue composite. № 2999863/23-05; zajavl. 03.11.1980; opubl. 15.09.1982. Vjul. № 34.
6. Zukova, Z. N., Maizlish, V. E., Shaposhnikov, G. P. (1995). Pat. 2148598 RU, MPK C 08 L 63/00. The polymeric binder for composite materials. № 95115373/04; zajavl. 31.08.1995; opubl. 10.05.2000.
7. Ghaemy, M. (2003). Study of the reaction mechanism of the copper chelate with DGEBA using DSC. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 72 (2), 743–752. doi: 10.1023/a:1024570909674
8. Kurnoskin, A. V. (1992). Epoxy Chelate Copper-Containing Polymers: Their Chemistry and Production. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 31 (5-6), 505–525. doi: 10.1080/03602559208017764
9. Kurnoskin, A. V. (1992). Metal Salicylaldimines as Modifiers of Epoxy Polymers. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 31 (5-6), 441–450. doi: 10.1080/03602559208017759
10. Kurnoskin, A. V. (1992). Application of Metalliferous Epoxy Chelate Polymers for Composite Production. Journal of Macromolecular Science, Part A, 29 (12), 1155–1173. doi: 10.1080/10601329208054148

Дата надходження рукопису 05.04.2016

Лавренюк Олена Іванівна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра процесів горіння та загальної хімії, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, вул. Клепарівська, 35, м. Львів, Україна, 79000

E-mail: olaw@ukr.net

Михалічко Борис Миронович, доктор хімічних наук, професор, кафедра процесів горіння та загальної хімії, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, вул. Клепарівська, 35, м. Львів, Україна, 79000

E-mail: mykhalitchko@email.ua

Пастухов Павло Васильович, ад'юнкт, кафедра процесів горіння та загальної хімії, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, вул. Клепарівська, 35, м. Львів, Україна, 79000

E-mail: pastuhovp@ukr.net

УДК 620.22

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.69259

УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ДИСПЕРСНО-ЗМІЦНЕНОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ БЕРИЛІЮ

© Д. М. Макаренко

Стаття присвячена дослідженню складу та властивостей дисперсно-зміцнених композиційних матеріалів на основі берилію, що застосовуються в різних галузях господарства, зокрема, при виробництві авіаційної техніки. Проаналізовані властивості даних матеріалів з метою забезпечення управління їхньою якістю. Побудовано математичні залежності параметрів дисперсно-зміцнених композиційних матеріалів на основі берилію від вмісту оксиду берилію та температури

Ключові слова: композиційний матеріал, дисперсно-зміцнений, алюміній, берилій, міцність, границя плинності, границя міцності

The article is devoted to investigation of the composition and properties of dispersion-strengthened beryllium-based composite alloy, used in various industries, including the aircraft manufacture aircraft. Analyzed the properties of these materials are analyzed to ensure their quality management. The mathematical relationship of dispersion strengthened beryllium-based composite alloy parameters from content of beryllium oxide and temperature are built

Keywords: composite materials, dispersion-strengthened, aluminum, beryllium, strength, boundary strength, ultimate tensile strength

1. Вступ

Композиційні матеріали (КМ) досить часто використовуються в техніці. Вони застосовуються в багатьох галузях виробництва, таких як автомобілебудування, авіація, виробництво космічної техніки, цивільне будівництво і т. ін. На сьогодні усі композиційні матеріали можна поділити на КМ з металевою матрицею та КМ з неметалевою матрицею.

Найбільш використовуваними КМ з неметалевою матрицею є полімерні карбоволокніти, бороволокніти та органоволокніти [1]. З них виготовляються різні деталі авіаційної техніки, наприклад, шасі, підшипники, диски авіаційних гальм і т. ін.

Що ж стосується КМ з металевою матрицею, то вони виготовляються на основі різних металів: алюмінію, берилію, магнію, нікелю, кобальту, хрому і т. ін. Такі матеріали називають дисперсно-зміцненими композиційними матеріалами (ДЗКМ) [2]. ДЗКМ належать до групи композиційних матеріалів, які зроблені, головним чином, методами порошкової металургії. Мікроструктура ДЗКМ складається з полікристалічних матриць, в яких дисперговані частинки (в основному оксиди, карбіди і / або нітрид) [3]. Їх особливістю є те, що матриця з металу або сплаву зміцнюється дрібнодисперсними штучно введеними частинками, що мають розмір до 0,1 мкм в кількості від 0,1 до 15%. В якості зміцнювальної фази використовуються дисперсні частинки оксидів, карбіди, нітриди і інші тугоплавкі сполуки.

Після формування і спікання для отримання композиційного матеріалу проводиться гаряча пластична деформація, в результаті чого виходить щільний напівфабрикат, який не має пір (стрічки, смуги, профілю).

Дане дослідження присвячене ДЗКМ на основі берилію. Такі матеріали застосовуються в багатьох галузях господарства, наприклад, для виробництва деталей конструкцій планерів літаків та вертольотів, силових вузлів деяких типів автомобілів (в т. р. й спортивних) і т. ін. [4].

2. Аналіз літературних даних

Найчастіше для ДЗКМ використовують системи Al-Be, адже подібні сплави поєднують в собі високу пластичність алюмінію та міцнісні властивості берилію [4–8].

Найбільш ефективними зміцнювачами берилію є оксид BeO й карбід Be₂C. Стандартна об'ємна доля BeO складає від 0,8 до 3%. Дослідження [9] виявили, що тимчасовий опір ДЗКМ Be-BeO підвищується зі збільшенням вмісту оксиду, при цьому ефективність зміцнення зростає зі збільшенням температури. Опір повзучості і тривала міцність Be-BeO композиційних матеріалів при підвищених температурах порівняно невеликі [5]. Застосування карбіду берилію Be₂C як зміцнюючої фази дозволяє підвищити 100-годинну міцність берилію при 650 °C в 3 рази, а при 730 °C – більше ніж в 5 разів.

Завдяки високому коефіцієнту розсіювання нейтронів, високому модулю пружності і низькій щільності ДЗКМ на основі берилію є перспективним як армуючий елемент в композиційних матеріалах з підвищеним питомим модулем пружності.

До цього часу завдання визначення параметрів ДЗКМ на основі берилію і моделювання їх властивостей для управління якістю в процесі створення, експлуатації та утилізації у повній мірі не була відображена в дослідженнях. Дослідження параметрів ДЗКМ на основі берилію дозволить виділити їх основні значущі параметри, дати оцінку того, починаючи з яких значень досліджувані параметри будуть робити істотний вплив на вимоги, що пред'являються до них, що дозволить оптимізувати склад даних матеріалів з точки зору як експлуатації, так і подальшої їх утилізації.

3. Мета та задачі дослідження

Метою проведених досліджень був аналіз властивостей і складу дисперсно-зміцнених композиційних матеріалів на основі берилію, застосовуваних як у виробництві аерокосмічної техніки (АКТ), так і в інших галузях промисловості, а також підбір оптимальних параметрів даних матеріалів для забезпечення визначення параметрів якості, що застосовуються до них.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

– розробка математичної моделі для визначення зв'язку хімічного складу і властивостей ДЗКМ на основі берилію;

– проведення аналізу та виявлення можливості уточнення вимог, що пред'являються до складу і властивостей ДЗКМ на основі берилію, для забезпечення управління їхньою якістю.

4. Методика дослідження параметрів ДЗКМ на основі берилію

Табл. 1 експериментального матеріалу була обрана на підставі роботи [9].

Таблиця 1
Механічні властивості ДЗКМ на основі берилію

Об'ємна доля BeO, %	t, °C	δ _{0,2} , МПа	σ _в , МПа
0,8	25	195	275
	400	145	245
	600	115	200
1,8	25	240	310
	400	175	240
	600	140	185
3,0	25	245	325
	400	210	325
	600	175	285

Примітка: t – температура випробування зразка; σ_{0,2} – границя плинності; σ_в – границя міцності

Аналіз отриманих даних свідчить про те, що надається можливим застосувати план повного факторного експерименту, беручи до уваги те, що число експериментів для визначення оцінок коефіцієнтів для двох вхідних змінних та побудови відповідної лінійної моделі відповідає N=2^k. За наявності впевненості щодо близькості до області оптимуму модель може бути отримана на підставі побудови повного ортогонального центрального

композиційного плану другого порядку [10, 11] з відповідної кількості точок плану експерименту N=9. Нормування значень вхідних змінних проводилося за формулами:

$$x_1 = \frac{x_1^* - \bar{x}_1}{I_1}, \tag{1}$$

$$x_2 = \frac{x_2^* - \bar{x}_2}{I_2}, \tag{2}$$

де x_1 і x_2 – нормовані значення вхідних змінних, x_1^* , x_2^* – натуральні значення вхідних змінних, \bar{x}_1 , \bar{x}_2 – середні значення вхідних змінних $\bar{x}_1=312,5$, $\bar{x}_2=1,85$, I_1 , I_2 – інтервали варіювання вхідних змінних ($I_1=287,5$, $I_2=1,05$).

Математична модель може бути виражена поліномом наступного вигляду:

$$Y_i = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3(x_1^2 - \beta) + a_4(x_2^2 - \beta) + a_5x_1x_2, \tag{3}$$

де a_i – оцінювані коефіцієнти, β – параметр, який розраховується залежно від числа точок ядра композиційного плану 2^{n-p} , плеча «зіркових» точок α і числа точок плану за формулою:

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^N (x_i^j)^2}{N} = \frac{2^{n-p} + \alpha}{N}. \tag{4}$$

Загальний вигляд даних, необхідних для побудови центрального ортогонального композиційного плану, наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Вигляд даних для побудови центрального ортогонального композиційного плану

№ експерименту	x_1	x_2	$x_1^2 - \beta$	$x_2^2 - \beta$	Y_{ij}
1	x_1^{\max}	x_2^{\max}	$x_1^{\max} - 0,6667$	$x_2^{\max} - 0,6667$	Y_{i1}
2	x_1^{\min}	x_2^{\max}	$x_1^{\min} - 0,6667$	$x_2^{\max} - 0,6667$	Y_{i2}
3	x_1^{\max}	x_2^{\min}	$x_1^{\max} - 0,6667$	$x_2^{\min} - 0,6667$	Y_{i3}
4	x_1^{\min}	x_2^{\min}	$x_1^{\min} - 0,6667$	$x_2^{\min} - 0,6667$	Y_{i4}
5	x_1^{\max}	x_2^{cep}	$x_1^{\max} - 0,6667$	$x_2^{cep} - 0,6667$	Y_{i5}
6	x_1^{\min}	x_2^{cep}	$x_1^{\min} - 0,6667$	$x_2^{cep} - 0,6667$	Y_{i6}
7	x_1^{cep}	x_2^{cep}	$x_1^{cep} - 0,6667$	$x_2^{\max} - 0,6667$	Y_{i7}
8	x_1^{cep}	x_2^{\min}	$x_1^{cep} - 0,6667$	$x_2^{\min} - 0,6667$	Y_{i8}
9	x_1^{cep}	x_2^{cep}	$x_1^{cep} - 0,6667$	$x_2^{cep} - 0,6667$	Y_{i9}

Коефіцієнти a_i визначені за наступними формулами:

$$a_i = c_1 \sum_{j=1}^N x^j y^j, i = 1, \dots, n, \tag{5}$$

$$a_i = c_2 [(x_{i-n}^j)^2 - \beta] y^j, i = n+1, \dots, 2n, \tag{6}$$

$$a_i = c_3 \sum_{j=1}^N x_\mu^j x_\lambda^j y^j, i = 1, \dots, n, \tag{7}$$

$$\mu \neq \lambda, i = 2n+1, \dots, k,$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y^j - \beta \sum_{j=1}^N a_{n+i} \tag{8}$$

У формулах (5)–(8) c_1 , c_2 , c_3 – коефіцієнти для лінійних, квадратичних і парних взаємозв'язків незалежних змінних відповідно, n – число лінійних членів моделі, N – число експериментів.

Для полінома другого ступеня виду (4) значення зазначених параметрів наведені в табл. 3

Для оцінки точності отриманої моделі проходило обчислення суми квадратів відхилень експери-

ментальних значень вихідних змінних від розрахункових, отриманих за моделлю (S_R) і оцінки дисперсій (S_R^2):

$$S_R = \sum_{i=1}^N (y_{i\text{експ}} - y_{i\text{розрах}})^2, \tag{9}$$

$$S_R = \frac{S_R^2}{\varphi}, \tag{10}$$

де $\varphi = N - (k+1)$ – число ступенів свободи, N – кількість експериментів ($N=9$), k – кількість оцінюваних параметрів ($k=5$).

Оцінка значущості коефіцієнтів моделі проводилася на основі використання $t_{кр}$ - критерію Стьюдента:

$$|a_i| \geq t_{кр} S_i, \tag{11}$$

де $t_{кр}$ – критичне значення розподілу Стьюдента для довірчої ймовірності 95 % і числа ступенів свободи $\varphi=3$, S – середньоквадратичне відхилення, яке визначається за формулою (10).

Таблиця 3

Значення параметрів для розрахунку коефіцієнтів математичної моделі

N	B	C ₁	C ₂	C ₃
9	0,6667	0,1667	0,5	0,25

5. Результати дослідження параметрів ДЗКМ на основі берилію та їхнє обговорення

Як вхідні параметри були обрані температура випробування зразків t (x_1), а також вміст BeO (x_2). Як вихідні параметри були обрані такі параметри як границя плинності $\sigma_{0,2}$ (y_1), границя міцності σ_B (y_2). З огляду на відсутність експериментальних даних для значення x_1^{cep} величина даного параметра була визначена шляхом побудови графіка залежності за існуючими даними за допомогою MS Excel, що є припустимим, зважаючи на експериментальні дослідження ($t = 312,5$ °C). Також з огляду на відсутність експериментальних даних для значення x_2^{cep} , величина даного параметра була взята за найближчою відомою величиною (1, 8 % BeO), що знаходиться в межах похибки.

5.1. Вплив границі плинності при збільшенні температури

Експериментальні дані свідчать про те, що в загальному випадку при збільшенні температури значення межі міцності (σ_B) зменшується. Визначимо, починаючи з якого значення температури (t), цей вплив набуває незворотного характеру.

Підставляючи дані в (3), була отримана математична модель, що описує вплив вмісту BeO і температури випробування зразків на значення границі міцності. Модель має такий вигляд:

$$y_1 = 201,523 + 29,1725x_1 - 41,675x_2 - 11,975x_1x_2 - 9,475x_1^2 + 2,5x_2^2. \quad (12)$$

Поверхня відгуку, що описує значення границі плинності ($\sigma_{0,2}$) при різних значеннях температури випробування зразків (t) і вмісту BeO в обраній області планування наведена на рис. 1.

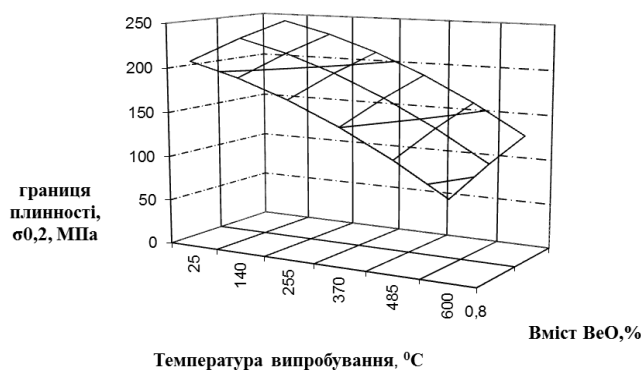


Рис. 1. Поверхня відгуку, що описує значення границі плинності ($\sigma_{0,2}$) при різних значеннях температури випробування зразків (t) і вмісту BeO в обраній області планування

Аналізуючи отриману поверхню відгуку, можна зробити висновок про те, що зі збільшенням температури випробування зразка відбувається зменшення значення границі плинності, а зі збільшенням вмісту BeO в складі матеріалу відбувається деяке збільшення границі плинності, що підтверджує наявні експериментальні дані.

5.2. Вплив границі міцності при збільшенні температури

Експериментальні дані свідчать про те, що в загальному випадку при збільшенні температури значення границі міцності (σ_B) зменшується. Визначимо, починаючи з якого значення температури (t) даний вплив набуває незворотного характеру.

Підставляючи дані в (3), була отримана математична модель, що описує вплив вмісту BeO і температури випробування зразків на значення границі міцності. Модель має наступний вигляд:

$$y_2 = 265,3665 + 34,1735x_1 - 40,008x_2 + 23,475x_1x_2 - 19,025x_1^2 + 8,75x_2^2. \quad (13)$$

Поверхня відгуку, що описує значення границі міцності (σ_B) при різних значеннях температури випробування зразків (t) і вмісту BeO в обраній області планування наведена на рис. 2.

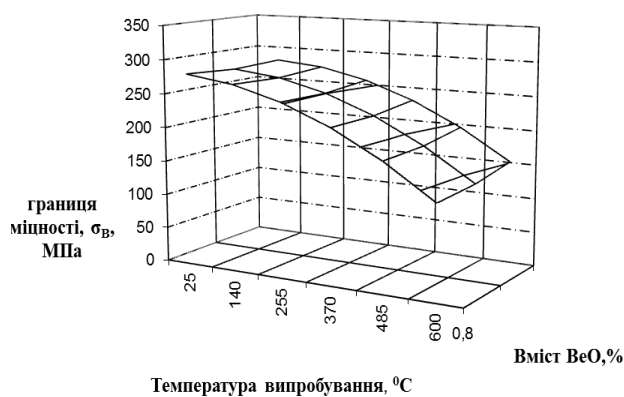


Рис. 2. Поверхня відгуку, що описує значення границі міцності (σ_B) при різних значеннях температури випробування зразків (t) і вмісту BeO в обраній області планування

Візуальний аналіз поверхні відгуку дозволяє зробити висновок про те, що істотними показниками для визначення границі міцності зразків ДЗКМ на основі берилію є як вміст BeO, так й температура випробування. Аналізуючи отриману поверхню відгуку можна зробити висновок про те, що зі збільшенням вмісту BeO відбувається збільшення границі міцності зразка. Також зі збільшенням темпера-

тури випробування відбувається зменшення границі міцності зразка.

На основі експериментальних та отриманих даних можна зробити висновок про те, що характер залежності границі плинності та границі міцності від температури та вмісту BeO носить однаковий характер. Підвищуючи об'ємну долю BeO можна дещо збільшити границі плинності та міцності, проте таке збільшення має обмеження, пов'язане з температурою експлуатації цих матеріалів та з тим, що ДЗКМ на основі берилію випускаються з максимальною часткою BeO 3 %.

6. Висновки

В результаті проведених досліджень побудовані математичні моделі для визначення зв'язку хімічного складу дисперсно-зміцнених композиційних матеріалів на основі берилію й температури їх випробування зі значеннями границі міцності та границі плинності для цих матеріалів. Отримані моделі є рівняннями регресії, оцінювані параметри яких отримані реалізацією центрального ортогонального композиційного плану повного факторного експерименту другого порядку. Аналіз цих моделей і отриманих поверхонь відгуку показав, що границя плинності для ДЗКМ на основі берилію найбільш залежить від температури випробування зразка (температури експлуатації), а вміст BeO має дещо менший вплив. Що ж стосується границі міцності зразків, то вона практично в рівній мірі залежить як від температури випробування (експлуатації), так і від вмісту BeO. Встановлено, що збільшення значень вмісту BeO призводить до деякого збільшення границі міцності й границі плинності ДЗКМ на основі берилію, а збільшення температури випробування зразків призводить до зменшення границі міцності й границі плинності ДЗКМ на основі берилію.

Отримані результати можуть бути застосовані для підбору необхідних матеріалів у виробництві різної техніки при відомих температурах її експлуатації, а також для проведення компромісної оптимізації досліджуваних параметрів для управління якістю композиційних сплавів на основі берилію.

Литература

1. Brautman, L. J. Composite Materials [Text] / L. J. Brautman, R. H. Krock. – New York: Academic Press, 1975
2. Lahtin, Ju. M. (1990). Materialovedenie. Moscow: Mashinostroenie, 528.
3. Mendoza-Ruiz, D. C. Dispersion of graphite nanoparticles in a6063 aluminum alloy by mechanical milling and hot extrusion [Text] / D. C. Mendoza-Ruiz, M. A. Esneider-Alcala, I. Estrada-Guel, M. Miki-Yoshida, M. Lopez-Gomez, R. Martinez-Sanchez // Reviews on advanced materials science. – 2008. – Vol. 18. – P. 280–283.
4. Al-Be сплавы – металлические композиционные материалы широкого назначения [Электронный ресурс]. – Всероссийский научно-исследовательский институт авиа-

ционных материалов. – Режим доступа: <http://viam.ru/public/files/1996/1996-202052.pdf>

5. Mouritz, A. Aluminium alloys for aircraft structures [Text] / A. Mouritz // Introduction to Aerospace Materials. – 2012. – P. 173–201. doi: 10.1533/9780857095152.173
6. Öz, T. Impact of beryllium additions on thermal and mechanical properties of conventionally solidified and melt-spun Al–4.5wt.%Mn–xwt.%Be (x=0, 1, 3, 5) alloys [Text] / T. Öz, E. Karaköse, & M. Keskin // Materials & Design. – 2013. – Vol. 50. – P. 399–412. doi: 10.1016/j.matdes.2013.03.024
7. Chen, H. Thermal conductivity of polymer-based composites: Fundamentals and applications [Text] / H. Chen, V. V. Ginzburg, J. Yang, Y. Yang, W. Liu, Y. Huang et. al. – Progress in Polymer Science, 2016. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2016.03.001
8. Biron, M. Composites [Text] / M. Biron // Thermosets and Composites. – 2013. – P. 299–473. doi: 10.1016/b978-1-4557-3124-4.00006-7
9. Ковалева, А. В. Композиционные материалы в технике и исследование возможностей получения изделий из разнородных материалов в литейном производстве [Текст]: уч. пос. / А. В. Ковалева, А. А. Черный. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2008. – 161 с.
10. Дёмин, Д. А. Оптимизация технологического процесса в цехе предприятия [Текст] / Д. А. Дёмин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – Т. 6, № 1 (18). – С. 48–59.
11. Коваленко, Б. П. Оптимизация состава холодно-твердеющих смесей (ХТС) с пропиленкарбонатом [Текст] / Б. П. Коваленко, Д. А. Дёмин, А. Б. Божко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. – Т. 6, № 1 (18). – С. 59–61.

References

1. Brautman, L. J., Krock, R. H. (1975). Composite Materials, New York: Academic Press.
2. Лахтин Ю.М. Материаловедение Учебник для высших технических учебных заведений, 1990, 528 с.
3. Mendoza-Ruiz, D. C., Esneider-Alcala, M. A., Estrada-Guel, I., Miki-Yoshida, M., Lopez-Gomez, M., Martinez-Sanchez, R. (2008). Dispersion of graphite nanoparticles in a6063 aluminum alloy by mechanical milling and hot extrusion. Reviews on advanced materials science, 18, 280–283.
4. Al-Be сплавы – металлические композиционные материалы широкого назначения. Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов. Available at: <http://viam.ru/public/files/1996/1996-202052.pdf> (Last accessed: 18.05.2016).
5. Mouritz, A. (2012). Aluminium alloys for aircraft structures. Introduction to Aerospace Materials, 173–201. doi: 10.1533/9780857095152.173
6. Öz, T., Karaköse, E., Keskin, M. (2013). Impact of beryllium additions on thermal and mechanical properties of conventionally solidified and melt-spun Al–4.5wt.%Mn–xwt.%Be (x=0, 1, 3, 5) alloys. Materials & Design, 50, 399–412. doi: 10.1016/j.matdes.2013.03.024
7. Chen, H., Ginzburg, V. V., Yang, J., Yang, Y., Liu, W., Huang, Y. et. al. (2016). Thermal conductivity of polymer-based composites: Fundamentals and applications. Progress in Polymer Science. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2016.03.001
8. Biron, M. (2013). Composites. Thermosets and Composites, 299–473. doi: 10.1016/b978-1-4557-3124-4.00006-7
9. Kovaleva, A. V., Chernyj, A. A. (2008). Kompozicionnye materialy v tehnikе i issledovanie vozmozhnostej polu-

chenija izdelij iz raznorodnyh materialov v litejnom proizvodstve. Penza: Penzenskij gosudarstvennyj universitet, 161.

10. Demin, D. A. (2005). Optimizacija tehnologičeskogo processa v cehe predprijatija. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6/1 (18), 48–59.

11. Kovalenko, B. P., Demin, D. A., Bozhko, A. B. (2006). Optimizacija sostava holodnotverdejušhjih smesej (HTS) s propilenkarbonatom. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6/1 (18), 59–61.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук, професор Дьомін Д. О.
Дата надходження рукопису 12.04.2016*

Макаренко Дмитро Миколайович, старший викладач, кафедра автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», вул. Чкалова, 17, м. Харків, Україна, 61070
E-mail: makaronesi@ukr.net

УДК 621.793

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.69622

ЭРОЗИЯ ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛ-НИТРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ Ti, Zr, Cr, Mo ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КАВИТАЦИИ

© А. А. Андреев, В. И. Коваленко, В. Г. Маринин, Л. И. Мартыненко, В. А. Столбовой

Многослойные, многокомпонентные покрытия синтезированы методом вакуумно-дугового осаждения металлов и их нитридов на основе Ti, Zr, Cr, Mo. Установлено, что скорость эрозии покрытий при действии кавитации уменьшается с увеличением микротвердости ($H\mu$) от 20 до 32 ГПа, а с ростом до 45 ГПа – увеличивается. Установлена квазилинейная зависимость параметра $\alpha = H\mu^3/E^2$ от микротвердости покрытий

Ключевые слова: покрытие, многослойность, многокомпонентность, нитриды, титан, цирконий, хром, молибден, кавитация, эрозия

Multilayered and multicomponent coatings are synthesized by a method of vacuum-arc sedimentation of metals and their nitrides on the basis of Ti, Zr, Cr, Mo. It is established, that erosion rate of coatings under cavitation decreases with increase in microhardness ($H\mu$) from 20 up to 32 GPa and with growth up to 45 GPa - increases. It is established almost linear dependence of parameter $\alpha = H\mu^3/E^2$ from microhardness of coatings

Keywords: coating, multilayer, multicomponent, nitrides, titan, zirconium, chromium, molybdenum, cavitation, erosion

1. Введение

Нанесение покрытий на поверхности деталей может осуществляться различными способами, в частности, ионно-плазменным с применением вакуумного дугового разряда (ВДР). При реализации технологии с ВДР имеется возможность получать покрытия не только на основе отдельных металлов, но и комбинированные на основе нитридов, карбидов, боридов различных металлов и сплавов. Такие покрытия используются для решения ряда промышленных и научно-технических задач по защите поверхностей деталей машин и механизмов при различных видах нагружения. Наиболее часто применяется защита от низко- и высокотемпературной коррозии, воздействия жестко закрепленных абразивных частиц и воздушноабразивных потоков, износа при трении и существенно меньше от возникшей в последние десятилетия потребности в защите от микроударного воздействия. Особенностью такого воздействия является высокая скорость нагружения, малая его продолжительность, локальность, многократность, стохастичность. При этом в поверхностных слоях возникают напряжения, которые могут быть сравнимы с

пределом прочности материала и сосредоточены в объемах близких к размерам структурных составляющих, что приводит к интенсивному разрушению материала.

В связи с отсутствием методов прогнозирования прочности (стойкости) материалов в условиях такого нагружения возникает необходимость в получении данных для различных материалов, в том числе материалов с модифицированными различными способами поверхностными слоями для повышения их износостойкости. На практике часто это означает определение наиболее эффективного упрочнения поверхности посредством нанесения покрытия. При этом требуется повышенная надежность и долговечность покрытий в эксплуатационных условиях, что связано со знанием, в частности, величины и специфики их разрушения. Получение соответствующих данных для многослойных вакуумно-дуговых металл-нитридных покрытий, легированных при осаждении различными химическими элементами, представляет значительный научно-технический интерес и является предметом настоящих исследований.