

МОДЕЛЮВАННЯ ЛАЗЕРНО-МОДИФІКОВАНОГО ШАРУ, АРМОВАНОГО ЧАСТИНКАМИ КАРБІДУ КРЕМНІЮ НА АЛЮМІНІЄВОМУ СПЛАВІ

I. Б. ІВАСЕНКО^{1, 2}, О. Р. БЕРЕГУЛЯК¹, Т. С. МАНДЗІЙ¹,
В. М. ПОСУВАЙЛО¹, Р. А. ВОРОБЕЛЬ¹

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Національний університет "Львівська політехніка"

Розроблено методи моделювання частинок карбіду кремнію асиметричної форми та аналізу зображень поверхневого шару алюмінієвого сплаву, зміцненого такими частинками. Виконано 3D моделювання розподілу частинок карбіду кремнію різних розмірів та заповнення в поверхневому шарі алюмінієвого сплаву. Встановлено розподіл площ карбіду кремнію в різних площинах перерізу та за різного об'ємного заповнення зміцненого шару.

Ключові слова: карбід кремнію, 3D моделювання, алюмінієвий сплав, сегментація, обробка зображень.

Methods of modeling silicon carbide particles of asymmetric shape as well as the methods of image analysis of the surface layer of an aluminum alloy reinforced with silicon carbide particles have been developed. 3D modeling of the distribution of silicon carbide particles of different sizes and filling percentages in the surface layer of the aluminum alloy was carried out. The distribution of silicon carbide areas in different cross-sectional planes and with different volumetric filling of the strengthened layer was established.

Keywords: silicone carbide, 3D modeling, aluminum alloy, segmentation, image processing.

Вступ. Легкі сплави широко використовують в аерокосмічній, машинобудівній промисловості, суднобудуванні та військовій техніці. Вони дають змогу суттєво зменшити масу конструкцій та підвищити ефективність використання палива. Одним зі способів поліпшення фізико-механічних характеристик легких сплавів та розширення їх використання є поверхнева обробка, яка підвищує їх корозивну та зносотривкість. Існує багато методів зміцнення поверхні легких сплавів. До найпоширеніших належать термічні та хіміко-термічні [1–3], механоімпульсні [4–6], анодування [7, 8] та плазмоелектролітна обробка [9, 10]. За їх допомогою на поверхні легких сплавів формують покриття і вони стають міцнішими та зносостійкими, залишаючись легкими. Слід зазначити, що всі вищезгадані методи дають змогу сформувати шари з рівномірним розподілом мікротвердості, яка знижується від зовнішньої поверхні вглиб матеріалу та регулюється параметрами обробки. Такі методи зміцнення, як плазмове та електродугове напилення [11–13], формують захисні покриття з м'якою матрицею та включеннями твердих частинок. Подібно діє і лазерне модифікування поверхні алюмінієвих сплавів твердими частинками [14–16], яке активно розвивається в останні роки. Воно полягає в тому, що в розплавлену лазерним променем поверхню струменем інертного газу вносять тверді частинки карбідів, оксидів або боридів, збільшуючи зносостійкість легких сплавів.

Актуальним завданням є моделювання розподілу твердих частинок у поверхневому шарі алюмінієвого сплаву, яке дозволить наперед оцінити зносостійкість та міцність захисних покриттів та вибрати оптимальні режими їх формування та експлуатації.

Раніше враховано [17] нерегулярну морфологію частинок карбіду кремнію і використано чотири методи, а саме: триангуляцію Делоне, екструзію багатокутників, відсікання куба і еліпсоїда. Частинки, створені першими трьома методами, є багатограничними і їх можна описати за допомогою однакових параметрів. Алгоритм триангуляції Делоне використовують для генерації частинок опуклого багатограничника за вершинами, випадково вибраними на поверхні тривісного еліпсоїда. Метод відсікання куба полягає у відтинанні частини куба площиною довільно дотичною до поверхні еліпсоїда всередині нього. Координати дотичної точки та вектор нормалі отримують на еліпсоїді за допомогою його параметрів. Дотичну площину можна подати точкою та вектором її нормалі. Грані багатокутника будуть обрізані дотичною площиною, а решта відрізків сформують нову грань багатокутника. Раніше розроблено [18] двовимірну модель випадкової дисперсії частинок для аналізу впливу розміру, орієнтації, форми та розподілу частинок на зростання тріщин. Методи аналізу зображень використовували для отримання розподілу кластерів і коефіцієнта дисперсії середньої відстані між сусідніми частинками. Використовували [19] 2D вбудовану модель елемента та метод скінченних елементів для композитів, які містять круглі частинки. Розроблено [20] модель трифазного тертя, яка враховує ефект адгезії матриці, стирання двох і кочення трьох тіл для підвищення точності моделювання під час обробки композита SiC/Al з використанням моделі метода скінченних елементів випадково розподілених круглих частинок. Створено [21] 2D модель репрезентативного елемента об'єму композитів SiC/Al для дослідження впливу глибини різання та швидкості на шорсткість поверхні.

Мета роботи – змодельовати 3D розподіл твердих частинок у поверхневому шарі алюмінієвого сплаву для оцінювання їх концентрації за зображеннями зрізів.

Моделювання частинок карбіду кремнію. Для моделювання вибрали мікрофотографії шліфів армованої поверхні сплавів AA7075 [14, 16]. Розміри частинок карбіду силіцію 100 і 240 μm , температура сплаву перед обробкою 100 або 250°C. Зону розплавленого металу захищали від окиснення аргоном (рис. 1).

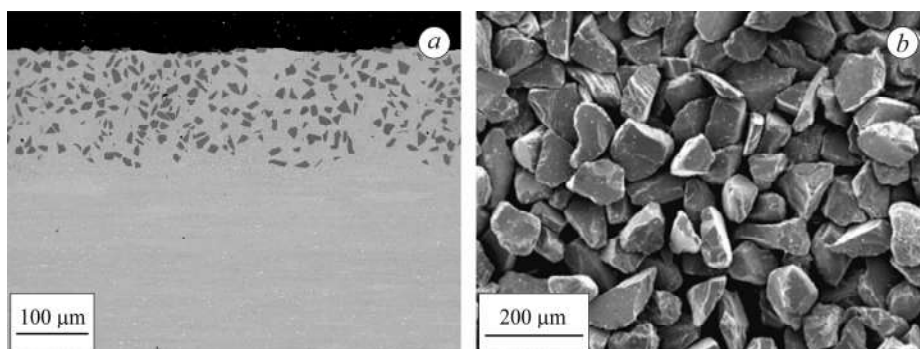


Рис. 1. Мікрофотографії перерізу модифікованого шару (a) та частинок карбіду кремнію (b) [14, 16].

Fig. 1. Photomicrograph of a cross-section of the modified layer (a) and silicon carbide particles (b) [14, 16].

Концентрація частинок, їх форма та розміри є інформативними ознаками, які впливають на зносостійкість деталей. Аналізували розміри та форми карбіду си-

ліцію за методикою [22]. Для оцінки концентрації частинок за перерізом поверхневого шару здійснено 3D моделювання частинок різних розмірів на основі відсікання вершин куба (рис. 2 та 3). Нехай a – сторона куба; rand – випадкова величина з проміжку $[0, 1]$. Будуємо точки $v_1, v_2, \dots, v_8$, зміщуючи їх від вершин всередину куба:

$$\begin{aligned} v_1(1) &= a - ((1 + \text{rand}) a/4) + 1; & v_1(2) &= (1 + \text{rand}) a/4; & v_1(3) &= a - ((1 + \text{rand}) a/4) + 1; \\ v_2(1) &= a - ((1 + \text{rand}) a/4) + 1; & v_2(2) &= a - ((1 + \text{rand}) a/4) + 1; & v_2(3) &= a - ((1 + \text{rand}) a/4) + 1; \\ v_3(1) &= (1 + \text{rand}) a/4; & v_3(2) &= a - ((1 + \text{rand}) a/4) + 1; & v_3(3) &= a - ((1 + \text{rand}) a/4) + 1; \\ v_4(1) &= (1 + \text{rand}) a/4; & v_4(2) &= (1 + \text{rand}) a/4; & v_4(3) &= a - ((1 + \text{rand}) a/4) + 1; \\ v_5(1) &= a - ((1 + \text{rand}) a/4) + 1; & v_5(2) &= (1 + \text{rand}) a/4; & v_5(3) &= (1 + \text{rand}) a/4; \\ v_6(1) &= a - ((1 + \text{rand}) a/4) + 1; & v_6(2) &= a - ((1 + \text{rand}) a/4) + 1; & v_6(3) &= (1 + \text{rand}) a/4; \\ v_7(1) &= (1 + \text{rand}) a/4; & v_7(2) &= a - ((1 + \text{rand}) a/4) + 1; & v_7(3) &= (1 + \text{rand}) a/4; \\ v_8(1) &= (1 + \text{rand}) a/4; & v_8(2) &= (1 + \text{rand}) a/4; & v_8(3) &= (1 + \text{rand}) a/4. \end{aligned}$$

Площини, перпендикулярні нормалям Ov_i (де O – центр куба, $i=1,8$), відсікають вершини, формуючи багатокутник.

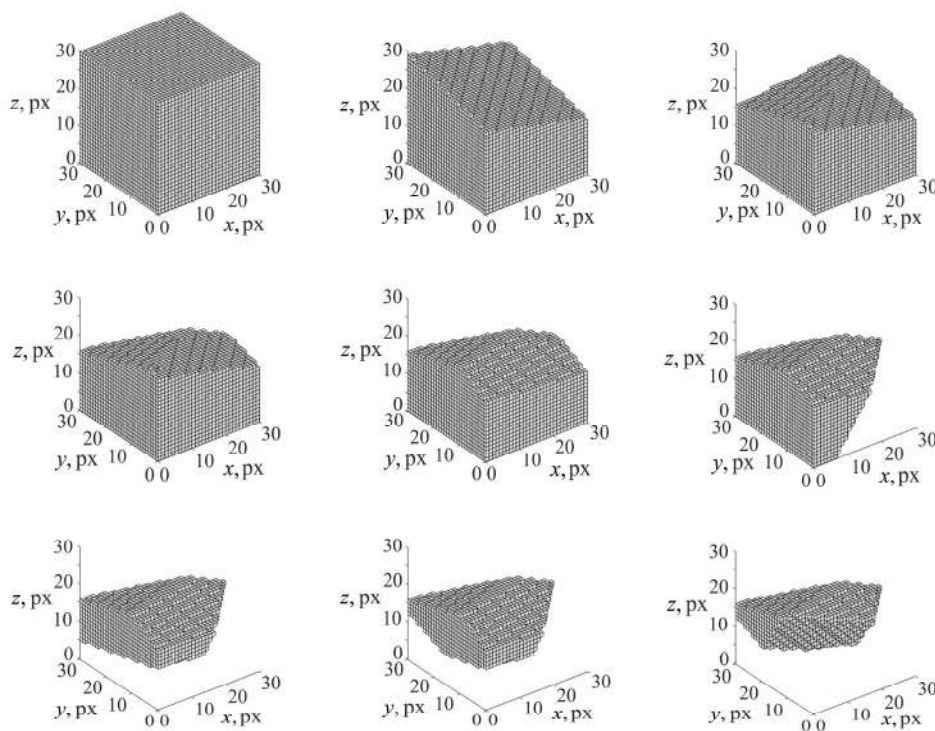


Рис. 2. Етапи моделювання частинки асиметричної форми (зліва направо, зверху вниз).

Fig. 2. Stages of modeling a particle of asymmetrical shape (from left to right, top-down).

Далі змодельовано поверхневий шар алюмінієвого сплаву на основі рівномірного розподілу для різної концентрації (рис. 4). Проаналізувавши зображення перерізів змодельованого шару (рис. 5), можна обчислити концентрацію частинок за площею перерізів.

Рис. 3. Приклади
змодельованих
частинок карбіду
кремнію.

Fig. 3. Examples
of simulated silicon
carbide particles.

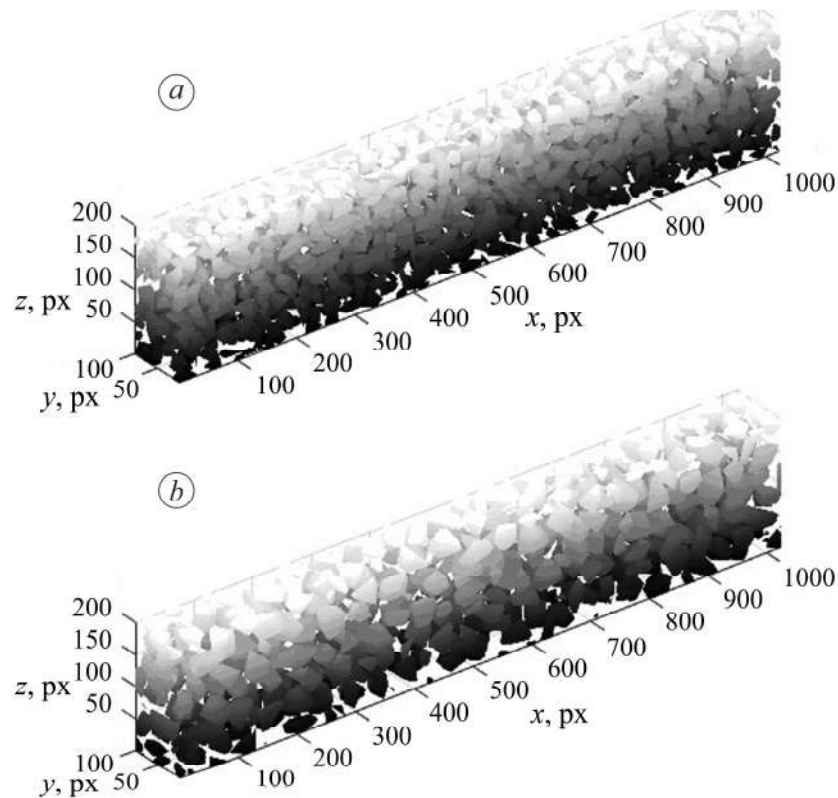
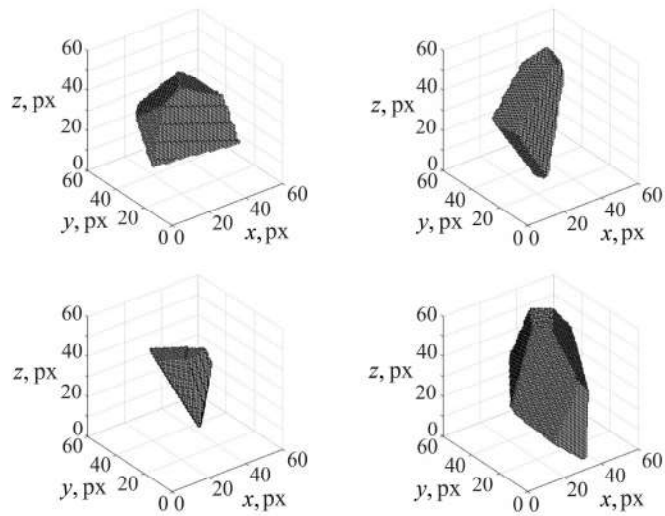


Рис. 4. Моделювання поверхневого шару з частинками карбіду кремнію (100 μm , 100°C) з концентрацією 22% (a) та (240 μm , 250°C) з концентрацією 25% (b).

Fig. 4. Modeling of the surface layer with silicon carbide particles (100 μm , 100°C) with concentration of 22% and (a) and (240 μm , 250°C) with concentration of 25% (b).

За наявності шумів на зображеннях, отриманих за допомогою електронного мікроскопа, пропонуємо застосувати методи фільтрації, описані раніше [23–26].

Наведено (див. таблицю) математичне сподівання m , середньоквадратичне відхилення площі частинок σ та відсоток заповнення p для 10 зображень перерізів, змодельованого поверхневого шару з частинками карбіду кремнію (100 μm , 100°C) з концентрацією 22% та (240 μm , 250°C) з концентрацією 25%. Оцінка концентрації частинок за площею перерізів знаходиться в діапазоні від 20,4 до 22,9% та від 22,9 до 27%, відповідно.

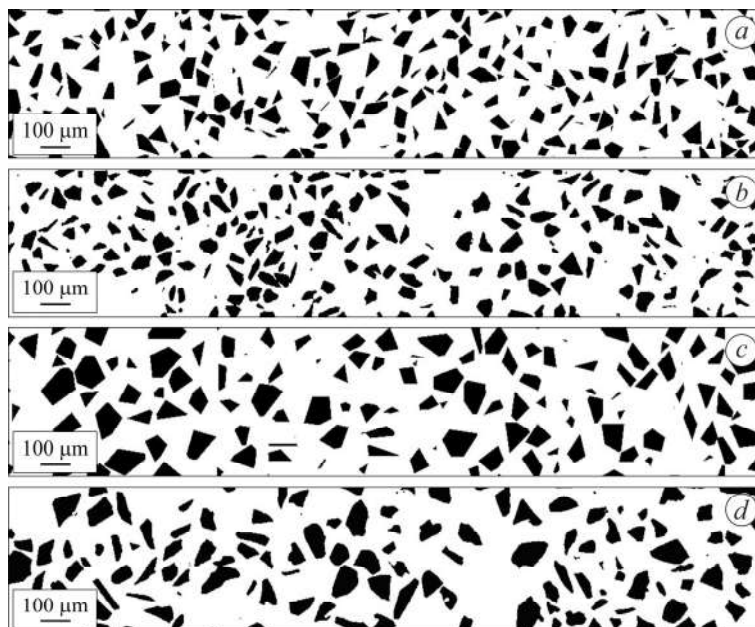


Рис. 5. Переріз змодельованого (a, c) та реального (b, d) поверхневого шару з частинками карбіду кремнію (100 μm , 100°C) з концентрацією 22% (a, b) та (240 μm , 250°C) з концентрацією 25% (c, d).

Fig. 5. Cross-section of the simulated (a, c) and real (b, d) surface layer with silicon carbide particles (100 μm , 100°C) with concentration of 22% (a, b) and (240 μm , 250°C) with concentration of 25% (c, d).

Моделювання поверхневого шару з частинками карбіду кремнію

Параметри	Реальний переріз	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
100 μm , 100°C, концентрація 22%											
m	171	169	163	166	143	162	161	160	170	171	158
σ	140	149	156	155	144	152	150	146	146	143	155
p , %	22,1	22,50	21,7	22,2	20,4	22,6	22,9	21,7	21,7	22,1	22,5
240 μm , 250°C, концентрація 25%											
m	367	361	396	339	366	340	396	307	344	352	339
σ	302,3	325	319	289	303	309	348	306	303	326	320
p , %	25,7	25,1	26,5	22,9	24,6	24,8	27	24,1	24,9	25,9	24,5

Графіки розподілів за площею досліджуваних частинок карбіду кремнію на реальних та змодельованих перерізах наведено на рис. 6.

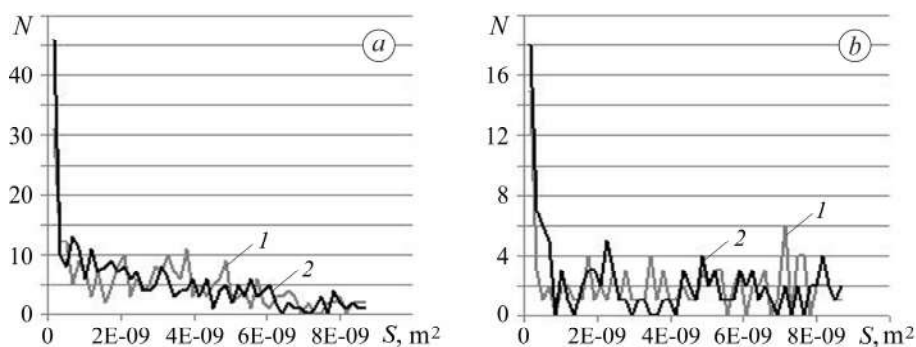


Рис. 6. Графіки розподілів за площею частинок карбіду кремнію (100 μm , 100°C) з концентрацією 22% (а) та (240 μm , 250°C) з концентрацією 25% (b) на реальних (1) та змодельованих (2) перерізах.

Fig. 6. Graphs of the distribution by area of silicon carbide particles (100 μm , 100°C) with concentration of 22% (a) and (240 μm , 250°C) with concentration of 25% (b) on real (1) and simulated (2) cross-sections.

Результати моделювання поверхневого та 3D шару, зміцненого частинками карбіду силіцію, можуть служити основою для передбачення ступеня зносу, який виникає на зміцнених поверхнях легких сплавів. Для цього можна використовувати методологію, розроблену в працях [20, 21, 27, 28]. Раніше [29, 30] розроблено теоретичні підходи для аналізу розмірів включень та їх концентрації на втомну міцність матеріалів, зокрема силумінів. Вони можуть служити важливим інструментом для прогнозування оптимальних параметрів напилення, зокрема, вибору пар тертя, умов тертя та міцності матеріалу. Такий підхід дає змогу заздалегідь оцінювати вплив різних чинників на зносостійкість та довговічність зміцнених поверхонь.

ВИСНОВКИ

Розроблено метод аналізу зображень поверхневого шару алюмінієвого сплаву, зміцненого частинками карбіду кремнію. Виконано 3D моделювання розподілу частинок карбіду кремнію різних розмірів та відсотків заповнення в поверхневому шарі алюмінієвого сплаву. Це дало можливість порівняти експериментальні і змодельовані поверхневі шари. Експериментальні результати показали, що оцінка концентрації частинок карбіду кремнію за зображеннями зрізів є точнішою для частинок меншого розміру. Аналіз отриманих результатів дасть можливість прогнозувати як механічні властивості, так і зносостійкість оброблених поверхонь з огляду на відомі механізми зносу.

1. *Effect of temperature on gas oxynitriding of Ti-6Al-4V alloys* / I. Pohrelyuk, J. Morgel, O. Tkachuk, and K. Szymkiewicz // *Surf. and Coat. Techn.* – 2019. – **360**, № 25. – P. 103–109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.01.015>
2. *Influence of oxinitriding on antifricion properties of Ti-6Al-4V titanium alloy* / I. M. Pohrelyuk, J. Padgurskas, O. V. Tkachuk, V. S. Trush, and S. M. Lavrys // *J. of Friction and Wear.* – 2020. – 41(4). – P. 333–337. <https://doi.org/10.3103/S1068366620040108>
3. *Pohrelyuk I. M., Fedirko V. M., and Lavrys S. M. Effect of preliminary ball burnishing on wear resistance of the nitride VT22 alloy* // *J. of Friction and Wear.* – 2017. – **38** (3). – P. 221–224. <https://doi.org/10.3103/S1068366617030114>

4. *Mechanical fabrication methods of nanostructured surfaces* / H. Nykyforchyn, V. Kyryliv, O. Maksymiv, and O. Zvirko // Handbook of modern coating technologies. Fabrication methods and functional properties. – Amsterdam: Elsevier, 2021. – P. 25–67.
<https://doi.org/10.1016/C2012-0-06047-4>
5. *Hydrogen permeability of the surface nanocrystalline structures of carbon steel* / H. M. Nykyforchyn, E. Lunarska, V. I. Kyryliv, and O. V. Maksymiv // Materials Science. – 2015. – **50**, № 5. – P. 67–73. <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9774-3>
6. Kyryliv V., Kyryliv Y., and Sas N. Formation of surface ultrafine grain structure and their physical and mechanical characteristics using vibration-centrifugal hardening // Adv. in Mater. Sci. and Eng. – 2018. – **2018**. – Article number: 3152170
<https://doi.org/10.1155/2018/3152170>
7. *Influence of the composition of electrolyte for hard anodizing of aluminium on the characteristics of oxide layer* / M. M. Student, I. M. Pohrelyuk, V. M. Hvozdet'skyi, H. H. Veseliv'ska, K. R. Zadorozhna, R. S. Mardarevych, and Y. V. Dzioba // Materials Science. – 2021. – **57**, № 2. – P. 240–247. DOI:10.1007/s11003-021-00538-x
8. Student M. M. and Pohrelyuk L. M. Modification of the aluminium and titanium alloys aimed at the improvement of their wear resistance and tribological characteristics // Materials Science. – 2021. – **57**, № 3. – P. 377–386. DOI:10.1007/s11003-021-00552-z
9. *Simultaneous reduction of wear and corrosion of titanium, magnesium and zirconium alloys by surface plasma electrolytic oxidation treatment* / H. M. Nykyforchyn, V. S. Agarwala, M. D. Klapkiv, and V. M. Posuvailo // Adv. Mater. Res. – 2008. – **38**. – P. 27–35.
10. *The role of hydrogen in the formation of oxide-ceramic layers on aluminium alloys during their plasma-electrolytic oxidation* / V. Hutsaylyuk, M. Student, O. Student, P. Maruschak, and V. Zakiev // J. of Mater. Res. and Techn. – 2021. – **14**. – P. 1682–1696.
11. *Improvement of wear resistance of aluminum alloy by HVOF method* / V. Hutsaylyuk, M. Student, K. Zadorozhna, P. Maruschak, and H. Pokhmurska // J. of Mater. Res. and Techn. – 2020. – **9**, № 6. – P. 16367–16377. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.102>
12. *Tribological properties of arc sprayed coatings obtained from FeCrB and FeCr-based powder wires* / H. Pokhmurska, V. Dovhunyk, M. Student, E. Bielanska, and E. Bietlowska // Surf. and Coat. Techn. – 2002. – **151–152**. – P. 490–494.
13. *Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings* / T. R. Stupnyts'kyi, M. M. Student, H. V. Pokhmurska, and V. M. Hvozdet'skyi // Materials Science. – 2016. – **52**, № 2. – P. 165–172. DOI: 10.1007/s11003-016-9939-8
14. *Structure and properties of aluminium alloys modified with silicon carbide by laser surface treatment* / H. V. Pokhmurska, M. M. Student, N. R. Chervinska, K. R. Smetana, A. Wank, T. Hoenig, and H. Podlesak // Materials Science. – 2005. – **41**, № 3. – P. 316–323. DOI: 10.1007/s11003-005-0168-9
15. *Influence of the preliminary heating of A7075 aluminium alloy on the strength of SiC-containing composite coating* / T. M. Lenkov'skyi, Y. V. Molkov, K. R. Zadorozhna, and Y. Y. Varyvoda // Materials Science. – 2019. – **55**, № 3. – P. 346–401.
16. *Задорожна Х. Р. Підвищення абразивної міцності алюмінієвих сплавів формуванням покриттів, зміцнених карбідами SiC та VC: Автореф. канд. тех. наук. – Львів, 2019. – 20 с.*
17. *Study on stress distribution of SiC/Al composites based on microstructure models with microns and nanoparticles* / Gao Zi-han, Gao Han-jun, Zhang Yi-du, Wu Qiong, Chen Shu-guang, and Zhou Xin // Nanotechn. Rev. – 2022. – **11**, № 1. – P. 1854–1869.
<https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0112>
18. Ayyar A. and Chawla N. Microstructure-based modeling of crack growth in particle reinforced composites // Compos. Sci. Techn. – 2006. – **66**, № 13. – P. 1980–1994. DOI:10.1016/j.compscitech.2006.01.007
19. Zhang W. X., Li L. X., and Wang T. J. Interphase effect on the strengthening behavior of particle-reinforced metal matrix composites // Computat Mater. Sci. – 2008. – **41**, № 2. – P. 145–155. DOI: 10.1016/j.commatsci.2007.03.011
20. *Modeling and simulation of tool-chip interface friction in cutting Al/SiCp composites based on a three-phase friction model* / C. Duan, W. Sun, C. Fu, and F. Zhang // Int. J. Mech. Sci. – 2018. – **142–143**. – P. 384–396. DOI:10.1016/j.ijmecsci.2018.05.014

21. Wu Q., Li D. P., and Shui X. J. Cutting simulations and experiments of milled sic particle-reinforced aluminum matrix composites // *Adv. Mater. Res.* – 2013. – **856**. – P. 142–146. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.856.142
22. Porosity segmentation and analysis of oxide ceramic coatings of D16T alloy / I. Ivasenko, V. Posuvailo, H. Veselivska, and V. Vynar // *IEEE 15th Int. Conf. on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. – Zbarazh, 2020. – P. 50–53. DOI: 10.1109/CSIT49958.2020.9321900
23. Fast recursive algorithm for structure-adaptive image filtering using order statistics / R. M. Palenichka, P. Zinterhof, Y. B. Rytsar, and I. B. Ivasenko // *J. of Electronic Imaging*. – 1998. – 7, № 2. – P. 339–349. DOI:https://doi.org/10.1117/1.482650
24. Vorobel R., Ivasenko I., and Berehulyak O. Automatized computer system for evaluation of rust using modified single-scale retinex // *IEEE First Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. – Kyiv, 2017. – P. 1002–1006. DOI:10.1109/UKRCON.2017.8100401
25. Berehulyak O. and Vorobel R. The Algebraic Model with an Asymmetric Characteristic of Logarithmic Transformation // *IEEE 15th Int. Conf. on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. – Zbarazh, 2020. – P. 119–122. DOI: 10.1109/CSIT49958.2020.9321906
26. Mandziy T. Chan-Vese Model for Rust Image Segmentation // *IEEE 15th Int. Conf. on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. – Zbarazh, 2020. – P. 115–118. DOI: 10.1109/CSIT49958.2020.9321901
27. Sequential multiscale modelling of SiC/Al nanocomposites reinforced with nanoparticles under static loading / E. I. Volkova, I. A. Jones, R. Brooks, Y. Zhu, and E. Bichoutskaia // *Phys. Rev. B*. – 2012. – **86**, № 10. – Article number: 104111. https://doi.org/ 10.1103/PhysRevB.86.104111
28. Methodology for dependence-based integrated constitutive modelling: An illustrative application to SiCp/Al composites / J. Xiang, L. Xie, F. Gao, J. Yi, S. Pang, and X. Wang // *Ceramics Int.* – 2018. – **44**, № 10. – P. 11765–11777. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.257
29. Ropyak L. A., Shatskyi I. P., and Makoviichuk M. V. Analysis of interaction of thin coating with an abrasive using one-dimensional model // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2019. – **41**, № 5. – P. 647–654. DOI: 10.15407/mfint.41.05.0647
30. Influence of intermetallic inclusions on the endurance of aluminium alloys / V. P. Sylova-nyuk, O. A. Mityaev, A. E. Ostrovs'ka, N. A. Ivantyshyn, and I. P. Volchok // *Materials Science*. – 2009. – **45**, № 2. – P. 299–308. DOI: 10.1007/s11003-009-9183-6

Одержано 24.10.2023