## ОСОБЛИВОСТІ МОДИФІКАЦІЇ ПОВЕРХНІ АМОРФНИХ СПЛАВІВ ОЛІГОМЕРНИМИ ПОКРИТТЯМИ ЗІ СПИРТОВИХ РОЗЧИНІВ

## О. М. ГЕРЦИК<sup>1</sup>, О. Б. ІЖИК<sup>1,2</sup>, О. А. ЄЗЕРСЬКА<sup>3</sup>, М. О. КОВБУЗ<sup>1</sup>, М. Я. ГОЛОВЧУК<sup>4</sup>, Ю. І. ЕЛІЯШЕВСЬКИЙ<sup>1</sup>, М. С. ТАШАК<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Львівський національний університет імені Івана Франка;
 <sup>2</sup> Національний університет "Львівська політехніка";
 <sup>3</sup> Fraunhofer Institut Fertigungstechnik Materialforschung, Germany;
 <sup>4</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Методами вольтамперометрії, імпедансної спектроскопії, сканівної електронної та атомно-силової мікроскопії досліджено модифікацію контактної та зовнішньої поверхонь стрічкових аморфних сплавів  $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$  і  $Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4}$  1%-ми розчинами олігопероксидів на основі вінілацетату, 2-трет-бутилпероксі-2-метил-5-гексен-3-їну (ВЕП), малеїнового ангідриду та н-вініл пірролідону, ВЕП і 2-фосфонооксі етил 2-метакрилату в ізопропіловому спирті. Встановлено формування щільніших покрить на поверхні стрічки сплаву  $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$  та згладжування її рельєфу внаслідок локальної адсорбції макромолекул олігопероксидів.

**Ключові слова**: аморфні сплави, модифікація, олігопероксидні покриття, корозійна тривкість, електрохімічні характеристики.

The modification of the contact and outer surfaces of strip amorphous alloys  $Fe_{785}Ni_{1.0}Mo_{0.5}Si_{60}B_{140}$ and  $Fe_{73.1}Cu_{1.0}Nb_{3.0}Si_{15.5}B_{7.4}$  with 1% solutions of oligoperoxides based on vinyl acetate, 2-tert-butylperoxy-2-methyl-5-hexen-3-ine (VEP), maleic anhydride and n-vinyl pyrrolidone, VEP and 2-phosphonooxy ethyl 2-methacrylate in isopropyl alcohol was investigated by the methods of voltammetry, impedance spectroscopy, scanning electron and atomic force microscopy. The formation of denser coatings on the surface of the  $Fe_{785}Ni_{1.0}Mo_{0.5}Si_{6.0}B_{14.0}$  strip and the smoothing of its topography due to the local adsorption of macromolecules of oligoperoxides were established.

**Keywords:** *amorphous alloys, modification, oligoperoxide coatings, corrosion resistance, electrochemical characteristics.* 

Вступ. Інноваційні аморфні металеві сплави (АМС), окрім інших цінних фізико-хімічних властивостей, володіють високою тривкістю до корозії у різних агресивних середовищах, механічною міцністю, еластичністю, близькою до людської кістки, та біосумісністю [1–7]. Придатні для відтворення наближених моделей до необхідних форм, навіть із застосуванням 3D-друку, і виготовлення медичних імплантів [8, 9].

Через можливість регулювати елементний склад і морфологію поверхні АМС вдається формувати відповідні тривкі полімерні покриття для вирівнювання поверхні і додаткового захисту від контактних агресивних середовищ [10–16]. Для такої модифікації цікаві гетерофункційні олігомерні (ГФО) – пероксидні сполуки, відомі як плівкотвірні, а також як ініціатори вільнорадикальних процесів. Прищеплення полімерів – один з найперспективніших методів модифікації, який дає можливість легко варіювати поверхню дивайсу, а під час використання імплантів – формувати біосумісний шар з антибактеріальними властивостями. Крім цього,

Контактна особа: О. М. ГЕРЦИК, e-mail: o\_hertsyk@yahoo.com

цей прищеплений полімерний шар можна забезпечити різними біомолекулами, наприклад, промоутерами росту тканини.

Леговані аморфні сплави на основі заліза корозійнотривкі, порівняно зі своїми кристалічними аналогами [2, 3, 17–20], володіють механічною міцністю та еластичністю, тому вибрані для створення модельних біосумісних систем. Через обмежену розчинність олігопероксидів необхідно вивчити формування поверхневих шарів з ізопропанольних розчинів.

**Експериментальна частина.** Стрічкові АМС  $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$  (AMC-1) та  $Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4}$  (AMC-2), отримані надшвидким охолодженням розплаву (НШОР) ( $10^6$  K/s) в Інституті металофізики НАН України, різняться контактною (к) та зовнішньою (з) поверхнями [6].

Як плівкотвірні речовини вживали гетерофункційні олігопероксиди ОП-1 та ОП-3 на основі вінілацетату (ВА), 2-трет-бутилпероксі-2-метил-5-гексен-3-їну (ВЕП) та малеїнового ангідриду (МА), а також н-вініл пірролідону (НВП), ВЕП та 2-фосфонооксі етил 2-метакрилату (ФОЕМ), відповідно, за рівного співвідношення компонент.

Модифікували аморфні сплави олігопероксидами, витримуючи у 1% ізопропанольному розчині 24 h при (290 ± 2) К. Зміни властивостей поверхні їх стрічки оцінювали методом вольтамперометрії на приладі Jaisssle Potentiostat-Halvanostat IPM 88 PC-R у потенціодинамічному режимі зі швидкістю розгортання потенціалу поверхні сплаву 20 mV/s, використовуючи триелектродну схему: AMC-електрод–Ag/AgCl/KCl<sub>нас</sub>–платинова пластинка. За поляризаційними кривими визначали потенціал ( $E_{corr}$ ) та струм ( $i_{corr}$ ) корозії.

Для досліджень методом електрохімічної імпедансної спектроскопії (ЕІС) застосовували Gamry Potentiostat Reference 600 з подальшим обробленням комп'ютерною програмою Gamry Echem Analyst. Складники імпедансу розраховували за схемою, складеною з двох резисторів та конденсатора ( $R_s(C_{dl}R_{ct})$ ), де  $R_s$  – опір електроліту;  $R_{ct}$  – опір перенесенню заряду та  $C_{dl}$  – ємність подвійного електричного шару. Мікрофотографії поверхні стрічки одержали з допомогою сканівного електронного мікроскопа EVO-40XVP із різним збільшенням. Формування плівки на поверхні AMC досліджували методом атомно-силової мікроскопії на сканівному зондовому мікроскопі SolverP47–PRO і опрацьовували за допомогою програмного забезпечення Nova та WSxM.

Результати та їх обговорення. Фізико-хімічні характеристики аморфних сплавів залежать від параметрів ближнього порядку та ступеня аморфності. Виявили, що поверхня досліджуваних АМС мікронеоднорідна [20], що, очевидно, визначає швидкість і природу поверхневих хімічних процесів сплавів, а отже, і особливості формування олігопероксидних покрить.

Аналіз форми вольтамперограм та електрохімічних параметрів вихідних АМС (рис. 1; табл. 1) вказує на різну корозійну тривкість у водному розчині натрій хлориду контактної та зовнішньої поверхонь АМС. Зокрема, корозійнотривкіший сплав з додатками Си та Nb, для якого потенціали корозії додатніші та нижчі значення струмів корозії. Для обох сплавів тривкішою є зовнішня поверхня, вкрита захисними оксидними шарами, сформованими ще під час НШОР. Дещо відчутніше різняться за корозійною тривкістю зовнішня та контактна поверхні стрічки АМС-2.

У результаті попередньої модифікації поверхонь стрічок олігопероксидами ОП-1 та ОП-3 форма вольтамперограм та електрохімічні параметри для АМС-1 змінюються суттєвіше. Потенціали корозії поверхні зсуваються в катодний бік, дещо розширюється пасивна ділянка та знижуються струми корозії для контактної поверхні (табл. 1). Ефективнішою є модифікація олігопероксидом ОП-1. Потенціали корозії АМС-2 незначно зсуваються в катодний бік, а струми корозії практично не змінюються.



Рис. 1. Вольтамперограми контактної (a, c) та зовнішньої (b, d) поверхонь сплавів Fe<sub>78,5</sub>Ni<sub>1,0</sub>Mo<sub>0,5</sub>Si<sub>6,0</sub>B<sub>14,0</sub> (a, b) та Fe<sub>73,1</sub>Cu<sub>1,0</sub>Nb<sub>3,0</sub>Si<sub>15,5</sub>B<sub>7,4</sub> (c, d) у 0,5 М водному розчині NaCl: I – вихідний зразок; 2, 3 – модифіковані олігопероксиди ОП-1 та ОП-3, відповідно.

Fig. 1. Voltammograms of the contact (a, c) and external (b, d) surfaces of Fe<sub>78,5</sub>Ni<sub>1,0</sub>Mo<sub>0,5</sub>Si<sub>6,0</sub>B<sub>14,0</sub> (a, b) Ta Fe<sub>73,1</sub>Cu<sub>1,0</sub>Nb<sub>3,0</sub>Si<sub>15,5</sub>B<sub>7,4</sub> alloys (c, d) in a 0.5 M NaCl aqueous solution: 1 – initial sample; 2, 3 – modified with oligoperoxides (OP) OP-1 and OP-3 respectively.

AMC	Поверх- ня	Вихідні		Модифіковані		Модифіковані	
		сплави		011-1		011-5	
		$E_{\rm corr},$ V	$i_{\rm corr},$ A/cm <sup>2</sup>	$E_{\rm corr},$ V	$i_{\rm corr},$ A/cm <sup>2</sup>	$E_{\rm corr},$ V	$i_{\rm corr},$ A/cm <sup>2</sup>
Fe Ni Mo Si B	к	-0,77	3,7.10-6	-0,91	$2,5 \cdot 10^{-6}$	-0,92	$2,9 \cdot 10^{-6}$
$1 c_{78,51} v_{1,0} v_{100,5} s_{16,0} b_{14,0}$	3	-0,71	1,46.10-6	-0,85	$1,5 \cdot 10^{-6}$	-0,75	$5,7 \cdot 10^{-6}$
Eo Cu Nh Si B	к	-0,58	9,6·10 <sup>-7</sup>	-0,59	$1,4.10^{-6}$	-0,68	$1,3.10^{-6}$
$1^{\circ} C_{73,1} C u_{1,01} U_{3,0} S I_{15,5} D_{7,4}$	3	-0,51	$3,7.10^{-6}$	-0,53	$3,7.10^{-6}$	-0,48	$4,3.10^{-6}$

Таблиця 1. Електрохімічні параметри АМС-електродів (вихідних та модифікованих ізопропанольними розчинами ОП-1 та ОП-3) у 0,5 М водному розчині NaCl

Параметри вихідних та модифікованих зразків АМС під час контакту з 0,5 М водним розчином натрій хлориду в умовах сканування потенціалу подано в табл. 2. Зовнішня поверхня зразка АМС-1 чинить більший опір перенесенню заряду. На контактній опір  $R_{ct}$  збільшується, практично, в 10 разів після 10 циклів. Після модифікації поверхні сплаву розчинами ОП-1 та ОП-3 опір перенесенню заряду посилюється, що свідчить про гальмування корозії, а також зменшується ємність подвійного шару  $C_{dl}$  через адсорбцію молекул на поверхні сплава АМС. Поверхневі шари з більшим опором формуються з розчину ОП-3, що вказує на його більшу спорідненість з контактною поверхнею.

Аналогічні дослідження підтвердили підвищену корозійну тривкість вихідних зразків АМС-2 у 0,5 М розчині NaCl проти таких з додатками Ni та Mo (табл. 2). Після попередньої модифікації олігомерними покриттями опір поверхневих шарів сплаву підвищується.

Покрит- тя	Цикли	Поверхня	Сплав Fe <sub>78,5</sub> Ni <sub>1,0</sub> Mo <sub>0,5</sub> Si <sub>6,0</sub> B <sub>14,0</sub>			Сплав Fe <sub>73,1</sub> Cu <sub>1,0</sub> Nb <sub>3,0</sub> Si <sub>15,5</sub> B <sub>7,4</sub>		
			$R_{ct},$ $\Omega \cdot \mathrm{cm}^2$	$C_{dl},$ $\mathrm{F}\cdot\mathrm{cm}^{-2}$	$R_{f}$	$R_{ct},$ $\Omega \cdot \mathrm{cm}^2$	$C_{dl},$ F·cm <sup>-2</sup>	$R_{f}$
_	1	К	33,2	$3,12 \cdot 10^{-3}$	156,0	65,2	$1,85 \cdot 10^{-3}$	92,5
		3	884,7	$1,13 \cdot 10^{-4}$	5,7	976,3	$1,35 \cdot 10^{-4}$	6,8
	10	к	321,1	$2,85 \cdot 10^{-4}$	14,3	468,4	$2,05 \cdot 10^{-4}$	10,3
		3	1174	$8,52 \cdot 10^{-4}$	4,3	1200,1	$5,12 \cdot 10^{-4}$	25,6
ОП-1	1	к	83,34	$1,21 \cdot 10^{-4}$	6,1	250,4	$4,00 \cdot 10^{-4}$	20,0
		3	221,5	$4,56 \cdot 10^{-4}$	22,6	1462,0	$6,84 \cdot 10^{-4}$	34,2
	10	к	51,82	$1,94 \cdot 10^{-4}$	9,7	306,0	$3,26 \cdot 10^{-4}$	16,3
		3	355,3	$2,82 \cdot 10^{-4}$	14,1	2459,0	$4,08 \cdot 10^{-4}$	20,4
ОП-3	1	к	796,1	$1,26 \cdot 10^{-4}$	6,3	3907	$2,57 \cdot 10^{-4}$	12,8
		3	49,24	$2,03 \cdot 10^{-4}$	10,2	1811	$5,53 \cdot 10^{-4}$	27,6
	10	к	457,9	$2,19.10^{-4}$	10,9	4269	$2,35 \cdot 10^{-4}$	11,8
		3	35,4	$2,85 \cdot 10^{-4}$	14,3	2724	$3,68 \cdot 10^{-4}$	18,4

Таблиця 2. Результати ЕІС вимірювань (*R<sub>f</sub>* – шершавість поверхні) зразків АМС у 0,5 М водному розчині NaCl (*R<sub>s</sub>* = 25,0 Ω)

Дослідження методом ЕІС виконували початково і після кожного циклу вольтамперометрії, почергово окиснюючи і відновлюючи поверхню АМС під час кожного циклу. Таке навантаження може зумовлювати часткове руйнування поверхневих шарів, а за достатнього хімічного опору оксидів деяких компонентів – і перебудову сформованих олігопероксидних структур. Досліджувані покриття знижують шершавість поверхні  $R_f$ . Зокрема, поверхня сплаву Fe<sub>78,5</sub>Ni<sub>1,0</sub>Mo<sub>0,5</sub>Si<sub>6,0</sub>B<sub>14,0</sub> з олігопероксидною плівкою менш шершава. Результати електрохімічних досліджень і ЕІС повністю узгоджуються.

Як свідчать результати електрохімічних досліджень вихідних та модифікованих поверхонь АМС-1 та АМС-2, сформовані з ізопропілового розчину олігопероксидні покриття достатньо однорідні. Оскільки зовнішня поверхня першого сплаву з покриттям ОП-1 корозійнотривкіша у середовищі натрій хлориду, досліджували її морфологію та рельєф.

Властивості АМС під час електрохімічних реакцій та плівкоутворення залежать від морфології їх поверхні, де формується рівномірне олігопероксидне покриття (рис. 2). Методом атомно-силової мікроскопії (рис. 3) виявили, що зовнішня поверхня вихідного зразка сплаву  $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$  має достатньо розвинутий рельєф зі зернами різних форми та висоти. Модифікація змінює рельєф та зумовлює зростання висоти нерівностей, очевидно, через формування поверхневого шару плівки. Середня висота нерівностей немодифікованої поверхні  $8,7 \pm 2,1$  nm з максимумом 20 nm, а модифікованої в деяких точках становить  $85,5 \pm 11,3$  nm з максимумом 145.8 nm, в інших – дорівнює 36,6 ± 20,4 nm з максимумом 73 nm. Плівкові покриття згладжують рельєф поверхні АМС внаслідок локальної адсорбції на ділянках з локалізованою енергією.

Рис. 2. Мікрофотографія зовнішньої поверхні АМС Fe<sub>78,5</sub>Ni<sub>1,0</sub>Mo<sub>0,5</sub>Si<sub>6,0</sub>B<sub>14,0</sub>, покритого плівкою ОП-1 з 1% ізопропілового розчину.

Fig. 2. Photomicrograph of external surface of amorphous metal alloys (AMA)  $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0} \text{ coated with OP-1 film} \\ \text{of } 1\% \text{ isopropyl solution.}$ 





Рис. 3. Зображення вихідної (*a*) та модифікованої покриттям ОП-1 (*b*) зовнішньої поверхні АМС Fe<sub>78.5</sub>Ni<sub>1.0</sub>Mo<sub>0.5</sub>Si<sub>6.0</sub>B<sub>14.0</sub>.

Fig. 3. Image of the original (*a*) and modified with OP-1 coating (*b*) external surface of AMA Fe<sub>78.5</sub>Ni<sub>1.0</sub>Mo<sub>0.5</sub>Si<sub>6.0</sub>B<sub>14.0</sub>.

## висновки

Для практичного використання багатокомпонентних АМС необхідно створити на їх поверхнях багатофункціональне покриття. Для цього використано розчини гетерофункціональних олігопероксидів. Встановлено, що однорідність отриманих покрить суттєво залежить від природи АМС, олігопероксиду та розчинника. Вперше модифіковано аморфні сплави  $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$  і  $Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4}$  1%-ми розчинами олігопероксидів на основі вінілацетату, 2-трет-бутилпероксі-2-метил-5-гексен-3-їну і малеїнового ангідриду та н-вініл пірролідону, 2-трет-бутилпероксі-2-метил-5-гексен-3-їну і 2-фосфонооксі етил 2-метакрилату в ізопропіловому спирті. Підтверджено формування одноріднішого покриття на поверхні сплаву  $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$  та встановлено згладжування ї рельєфу внаслідок локальної адсорбції на ділянках з локалізованою енергією.

This work was partly supported by the Simons Foundation (Award Number: 1037973).

- 1. Lin Liu and Cheng Zhang Fe-based amorphous coatings: Structures and properties // Thin Solid Films. 2014. 561, № 30. P. 70–86. DOI:10.1016/j.tsf.2013.08.029
- Corrosion resistance improvement of 45 steel by Fe-based amorphous coating / Guokun Huang, Lidan Qu, Yunzhuo Lu, Yongzhe Wang, Hongge Li, Zuoxiang Qin, and Xing Lu // Vacuum. – 2018. – 153. – P. 39–42. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.03.042
- Hennayaka H. M. M. N., Lee H. S., and Yi S. Surface oxidation of the Fe based amorphous ribbon annealed at temperatures below the glass transition temperature // J. Alloys Compd. - 2015. - 618. - P. 269-279. DOI:10.1016/j.jallcom.2014.08.160
- Russew K. and Stojanova L. Properties and Applications of Amorphous Metallic Alloys // Glassy Metals. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2016. – 250 p. https://doi.org/10.1007/978-3-662-47882-0\_13
- 5. Oxidation of amorphous alloys / Z. Xu, Y. Xu, A. Zhang, J. Wang, and Z. Wang // J. Mat. Sci. Techn. 2018. **34**, № 11. P. 1977–2005. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.02.015
- Magnetomechanical effects in amorphous ribbons / M. O. Vasylyev, V. K. Nosenko, V. M. Shyvaniuk, H. H. Halstian, and I. V. Zagorulko // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2020. – 42, № 7. – P. 949–962. https://doi.org/10.15407/mfint.42.07.0949
- Abuzarova K. and Korchuganova O. Nanosized Iron Oxyhydroxide: Properties, Application, Preparation // J. Phys.: Conf. Ser. – 2020. – 1534. – Article number: 012002. DOI 10.1088/1742-6596/1534/1/012002
- Progress in non-traditional machining of amorphous alloys / Wuyi Ming, Xudong Guo, Yingjie Xu, Guojun Zhang, and Zhiwen Jiang // Ceramics Intern. – 2023. – 49, № 2. – P. 1585–1604. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.349
- Design strategy for biodegradable Fe-based alloys for medical applications / M. Schinhammer, A. C. Hänzi, J. F. Löffler, P. J. Uggowitzer // Acta Biomaterialia. 2010. 6, № 5. P. 1705–1713. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.07.03
- 10. *Zhang H., Qiu Z., and Wang H.* Study on material of polymer-based electromagnetic shielding composites // Mater. Phys. and Chem. 2018. **1**, № 28. P. 13–19. DOI:10.18282/mpc.v1i1.561
- Corrosion resistance of modified amorphous alloys based on iron in sulfuric acid / O. M. Hertsyk, M. O. Kovbuz, T. H. Hula, S. A. Korniy, and O. A. Yezerska // Materials Science. - 2021. - 56, № 6. - P. 755-763. https://doi.org/10.1007/s11003-021-00492-8
- 12. Adsorption of organic peroxides on the surface of amourphous alloys for the drugs immobilization / O. M. Hertsyk, T. H. Hula, M. O. Kovbuz, N. L. Pandiak, and O. A. Ezerska // Phys. and Chem. of Solid State. 2022. 23, № 3. P. 517–523. DOI: https://doi.org/10.15330/pcss.23.3.517-523
- Novel multifunctional lattice composite structures with superior load-bearing capacities and radar absorption characteristics / Z. Zhang, H. Lei, H. Yang, M. Chen, and Ch. Wang // Comp. Sci. and Techn. – 2021. – 216. 109064. DOI:10.1016/j.compscitech.2021.109064
- 14. A novel approach for drag reduction using polymer coating / W. A. Rowin, A. B. Asha, R. Narain, and S. Ghaemi // Ocean Eng. 2021. **240**, № 12. P. 1–9. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.10989
- 15. Alasvand N., Kargozar S., and Milan P. B. Functionalized polymers for drug/gene-delivery applications // Adv. Functional Polymers for Biomedical Appl. 2019. P. 275–299. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816349-8.00014-X
- 16. Surface Modification of Magnesium and its Alloys for Biomedical Applications / Ed.-in-Chief: T. S. N. Sankara Narayanan. Il-Song Park and Min-Ho Lee. 2015. P. 433–441. https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-077-4.00002-4
- 17. *Corrosion* protection of carbon steel by a composition based on natural polysaccharide / S. A. Korniy, I. M. Zin, M. B. Tymus, O. P. Khlopyk, and M.-O.M. Danyliak // Materials Science. 2021. **56**, № 5. P. 602–607. https://doi.org/10.1007/s11003-021-00470-0
- Souza C. A. C., Ribeiro D. V., and Kiminami C. S. Corrosion resistance of Fe–Cr-based amorphous alloys: An overview // J. Non-Crystal. Solids. – 2016. – 442. – P. 56–66. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.04.009
- Improved corrosion resistance of new Fe-based amorphous alloys / Xiang Li, Xu Zhao, Fang Lv, Fang Liu, and Yuxin Wang // Intern. J. Modern Phys. B. – 2017. – 31. – Article number: 1744010. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.100
- 20. Structure and physical properties changes of Fe-based amorphous alloy induced by Joule-heating / Y. Nykyruy, Y. Kulyk, S. Mudry, V. Prunitsa, and A. Borysiuk // Appl. Nanosci. (Switzerland). 2023. 13. DOI: 10.1007/s13204-023-02871-w

Одержано 08.06.2023