

ORCID: 0000-0003-4396-0995

С. І. Дерев'янюк

аспірант кафедри фізики, ННІ ІНФОТЕХ,
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна,
derevianko.serhii@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4680-1466

В. В. Морозович

аспірант кафедри фізики, ННІ ІНФОТЕХ,
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна,
vladmorozovua@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2843-0163

Т. А. Красовський

завідувач лабораторії,
Київський академічний університет НАН України, Київ, Україна,
krastaras@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7015-1662

Ю. О. Ляшенко

Доктор фіз.-мат. наук, професор,
директор навчально-наукового інституту інформаційних та освітніх технологій,
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна,
urico@ukr.net

УДК 621.762:669.715.29

DOI: 10.31651/2076-5851-2019-1-60-68

PACS 66.30.-h.; 81.05.bx.; 68.35.fx,
64.70.kd, 82.40.ck, 66.30.Ny

ВПЛИВ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ SMAT НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ МІДІ*

В роботі розроблено прилад для проведення високочастотної поверхневої механічної обробки тертям за технологією SMAT (surface mechanical attrition treatment). Описано розроблену схему приладу та приведено опис його основних компонентів: генератора високочастотних електричних коливань та ультразвукового механічного інструменту. Технологію механічної обробки SMAT застосовано для обробки поверхонь мідних підкладок з різними типами поверхні, як просто полірованої, так і з електролітично осадженим прошарком міді. Було проведено вимірювання мікротвердості поверхонь та встановлено її підвищення після поверхневої механічної обробки тертям за технологією SMAT. Мікротвердість електроосаджених прошарків міді після обробки за технологією SMAT перевищує мікротвердість відполірованих прокатних пластинок міді.

Ключові слова: наноструктуровані матеріали, інтенсивна пластична деформація, поверхнева механічна обробка тертям (SMAT), електролітично осажені прошарки міді, мікротвердість.

* Статтю написано згідно з прикладною держбюджетною темою “Синтез наноструктурованих сплавів за осцилюючих напружень та їх застосування в новій технології з’єднання мікроелектронних компонентів” (номер державної реєстрації 0117U000577).

1. Вступ

Наноструктуровані матеріали характеризуються специфічною структурою в порівнянні з полікристалічними матеріалами. Оскільки наноструктуровані матеріали створюються шляхом сильних деформацій, розміри зерен в таких матеріалах зменшуються в напрямку від об'єму кристала і до поверхні [1, 2]. Такі матеріали мають велику кількість приповерхневих дефектів, утворених внаслідок інтенсивної пластичної деформації. Існує ряд методів деформації матеріалів: механічна обробка тертям (МА), методи сильної пластичної деформації (SPD) [1, 2]. До групи з сильною пластичною деформацією відносяться: кручення під високим тиском, стиснення під прямим кутом (ECAP), поверхнева механічна обробка тертям (SMAT) [1, 2-6].

SMAT технологія заключається в обробці поверхні матеріалу рухомими сталевими кульками, що прискорюються механічним генератором високочастотних коливань (близько 20 кГц). Така обробка призводить до зміни механічних властивостей приповерхневих прошарків матеріалів [1, 2, 7-9].

В роботах [10, 11] приведено опис використаної технології низькочастотної поверхневої обробки матеріалів. Досліджено режими електроосадження міді на мідні підложки: стаціонарний, реверсний імпульсний та стохастичний, обробка поверхонь за технологією SMAT. Проведено рентгеноструктурний аналіз цих поверхонь, що вказує на те що після обробки за технологією SMAT переважає структура з орієнтацією площин (111). Також досліджено вплив обробки поверхні мідних підкладок на дифузію та фазоутворення в системі Cu-Sn. Товщина утвореного прошарку інтерметалічної фази була значно меншою, ніж в зразках з полікристалічною недеформованою підкладкою. Це означає, що обробка за технологією SMAT сповільнює ріст Cu_3Sn фази. Структура та дефектність цієї фази впливає на час до відмови мікроелектронних пристроїв через утворення в ній пор, тріщин що призводить до руйнування контактного з'єднання.

Метою даної роботи є розробка установки високочастотної (20 кГц) поверхневої механічної обробки тертям за технологією SMAT та її застосування до обробки поверхонь: полірованих мідних пластинок, прошарків електроосадженої в стаціонарному режимі міді на мідні пластинки. Досліджено вплив високочастотної SMAT обробки на мікротвердість поверхневих прошарків.

2. Експериментальні методи отримання зразків

2.1 Опис обладнання

SMAT пристрій – прилад для обробки поверхонь кульками з нержавіючої сталі діаметром 0.2-1 мм, які призводять до інтенсивної пластичної деформації поверхні зразка [1] (Рис. 1). До складу установки для обробки за технологією SMAT входять ультразвукова коливальна система (УЗКС), джерело живлення (ультразвуковий генератор) та камера для обробки зразків (Рис. 3). УЗКС складається з п'єзоперетворювача, бустера та концентратора (сонотрода). У перетворювачі (активному елементі) коливальної системи відбувається перетворення енергії електричних коливань в енергію пружних механічних коливань ультразвукової частоти (близько 20 кГц). Бустер та концентратор є пасивним елементом, які здійснюють трансформацію пружних швидкостей, з можливістю підсилення, або ослаблення амплітуди механічних коливань перетворювача і забезпечують узгодження з технологічним навантаженням. Сонотрод створює ультразвукове поле в оброблюваному об'єкті або безпосередньо впливає на нього та має розраховані геометричні розміри під певну резонансну частоту та амплітуду ультразвукової обробки. Його механічні коливання з ультразвуковою частотою передаються металевим кулькам і призводять до їх руху. Таким чином, велика кількість кульок обробляють поверхню матеріалу (в нашому випадку, мідних пластинок) ударяючись в поверхню зразка під різними кутами

[1, 11]. Сонотрод виготовлений з титану, щоб мати низькі втрати при вібраціях та високу міцність.

Цифровий ультразвуковий генератор має функції: регулювання амплітуди коливань від 10 до 100 % та установки таймера роботи приладу. Після ввімкнення генератор, в автоматичному режимі, налаштовується на резонансну частоту УЗКС та підтримує її в робочому режимі (Рис. 2б). Напряга живлення генератора 220 В, а вихідна потужність до 2000 Вт [12]. Загальний вигляд генератора та елементів його керування показано на Рис. 2а:

ON/OFF – перемикач, що відповідає за увімкнення та вимкнення приладу;

- 1) індикатор вихідної потужності та перевантажень;
- 2) кнопки панелі для управління генератором;
- 3) дисплей: А49 – амплітуда коливань у % (від 1 до 100), в даному випадку 49; 99.50 – покази таймера в хвилинах;
- 4) індикатор роботи генератора при ввімкненні УЗ коливань;

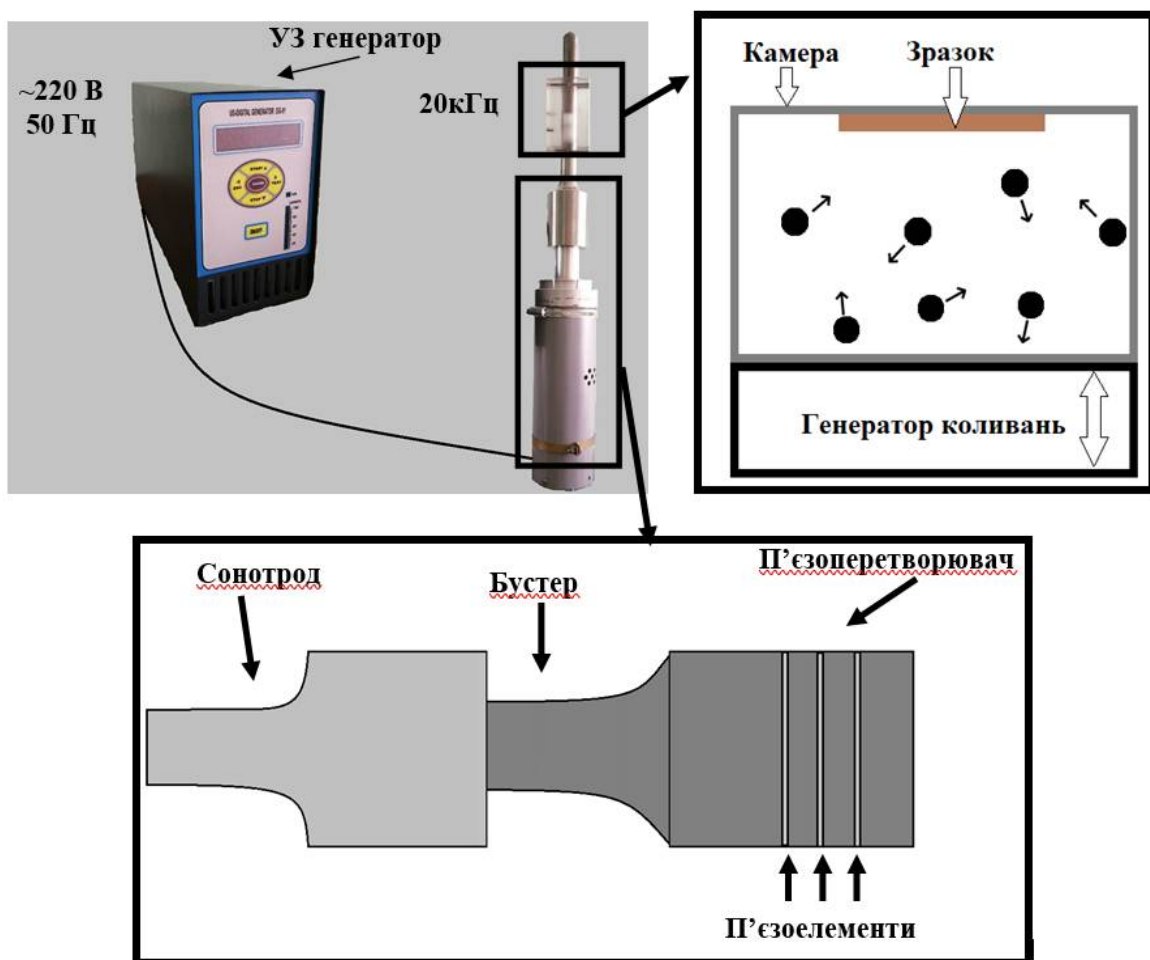


Рис. 1. Схематичне зображення SMAT пристрою.
Fig. 1. Schematic image of SMAT device.

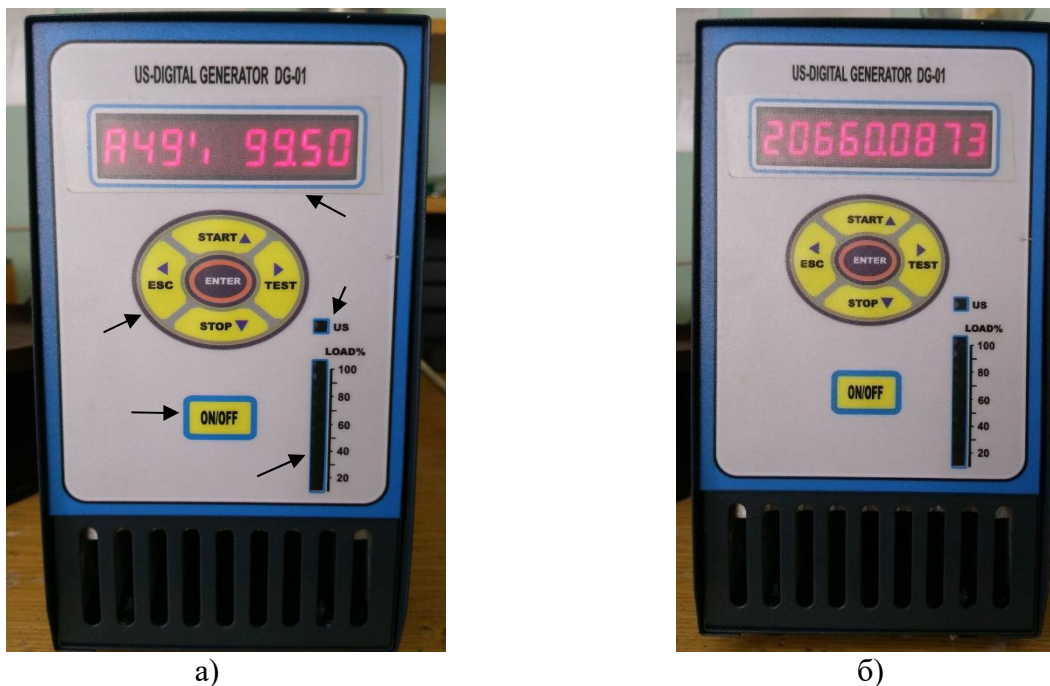


Рис. 2. Ультразвуковий генератор: а) панель управління; б) відображення частоти резонансу.

Fig. 2. Ultrasonic generator: a) control panel; b) displaying the resonant frequency.

Другим компонентом приладу для обробки за технологією SMAT є УЗКС (Рис. 3). Для обробки зразків до сонотрода (1) прикріплена робоча камера (2) з тримачем зразків (3) та регулятором висоти (4) (Рис. 3):

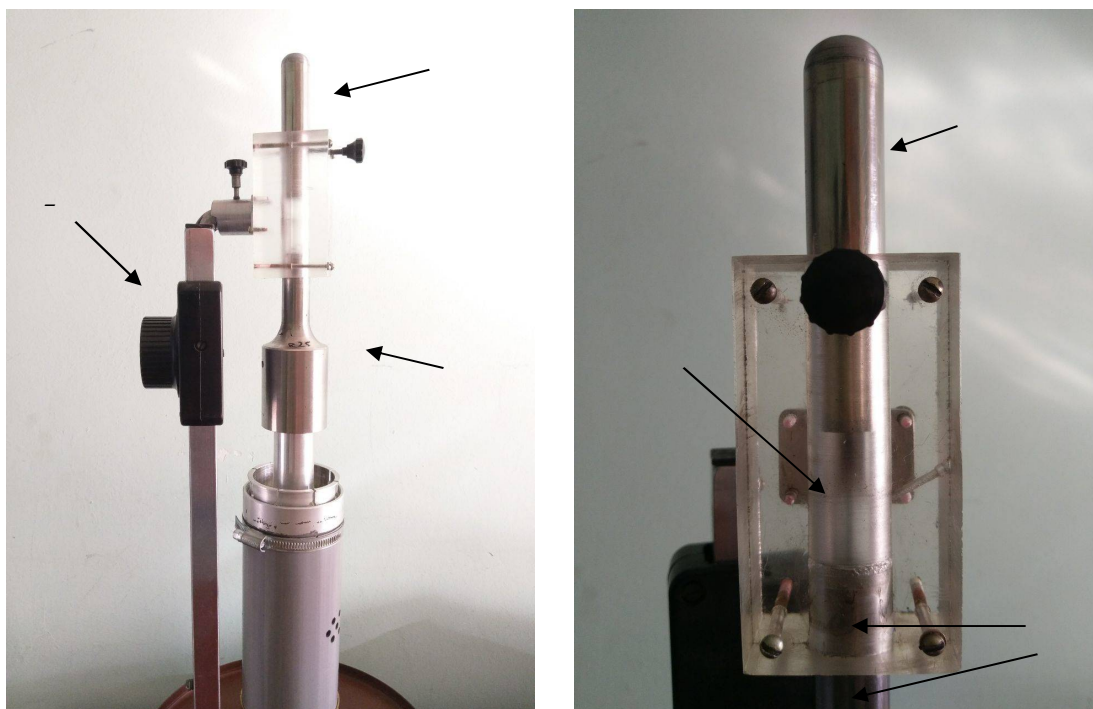


Рис. 3. УЗКС.

Fig. 3. Ultrasonic oscillation system.

2.2 Підготовка та виготовлення зразків

Для обробки було підготовлено мідні пластини розмірами 7*10 мм. Всі мідні підкладки було відшліфовано та відполіровано, та виготовлено 4 зразки в режимах, приведених в Таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики виготовлених зразків

Table 1

Characteristics of the manufactured samples

Назва	Режим обробки	Параметри SMAT обробки	Параметри електролітичного осадження
Зразок 1	–	відсутня	
Зразок 2	Високочастотна обробка за технологією SMAT	5 хв, частота 20 кГц, діаметр кульок 0.8 мм, к-сть кульок 10 шт.	
Зразок 3	Електролітичне осадження в стаціонарному режимі	відсутня	$U=0,36$ В; $j=0.0167$ А/см ²
Зразок 4	Електролітичне осадження в стаціонарному режимі, високочастотна обробка за технологією SMAT	5 хв, частота 20 кГц, діаметр кульок 0.8 мм, к-сть кульок 10 шт.	$U=0,36$ В; $j=0.0167$ А/см ²

Для виготовлення двох зразків було застосоване електролітичне осадження міді на мідні пластинки. Електроліт мав наступний склад: $0,36M \cdot CuSO_4 \cdot H_2O + 1,22M \cdot H_2SO_4$. Катодом була мідна пластинка, а на аноді був закріплений зразок. Осадження проводилось за температури 20°C. Процедура електролітичного осадження відбувалась в кілька кроків (Табл. 2):

Таблиця 2

Послідовність дій при електролітичному осадженні міді

Table 2

The sequence of actions in the electrolytic deposition of copper

№	Режим обробки	Параметри
1	Електролітичне травлення мідної поверхні	10 хв., $U=0,66$ В; $j=0.025$ А/см ²
2	Електролітичне осадження міді на пластинку	10 хв., $U=0,66$ В; $j=0.025$ А/см ²
3	Електролітичне осадження в стаціонарному режимі	Фіксація заряду що пройшов через пластинку $q=86$ Кл; $U=0,37$ В; $j=0.0167$ А/см ²

3. Результати і обговорення

В зразках 1-4 було проведено вимірювання мікротвердості за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 (Рис. 3). Маса тягарця, що тисне на індентор бралася рівною $P=186.7$ грамів. Мікротвердість H розраховувалась за формулою:

$$H = \frac{1854 \times P}{c^2}, \quad (1)$$

де c – діагональ відбитку індентора на досліджуваному зразку в мікронах.

В Зразках 1 і 3, на відміну від Зразків 2 і 4, обробка поверхні за технологією SMAT не проводилась. Встановлено, що мікротвердість Зразка 2 після високочастотної обробки за технологією SMAT вище ніж у Зразка 1 з полікристалічною структурою. Зразок 3 має найнижчу мікротвердість, що можна пояснити наявністю електролітично осадженого прошарку, який має велику кількість різних дефектів. Найвищу мікротвердість має Зразок 4, який після електролітичного осадження був оброблений за технологією SMAT (див. Рис. 4).

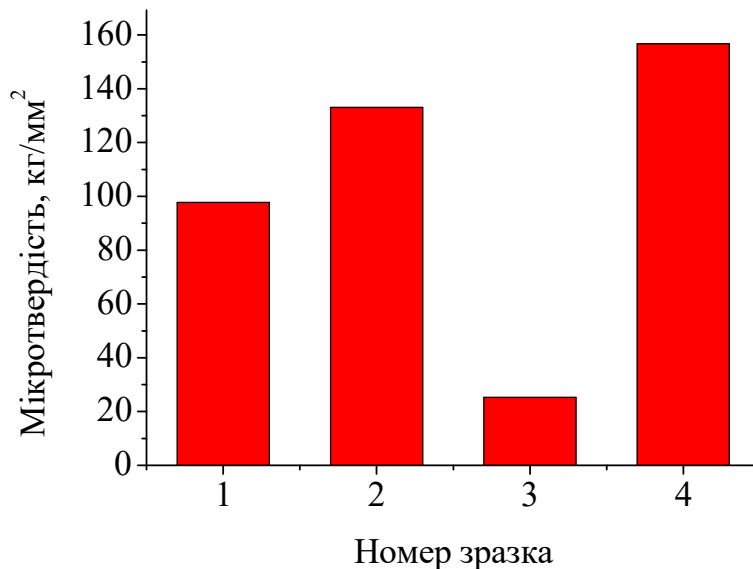


Рис. 4. Мікротвердість зразків 1-4.

Fig. 4. Microhardness of the samples 1-4.

4. Висновки

Високочастотна обробка поверхні за технологією SMAT збільшує мікротвердість поверхні мідних підкладок різних типів, як полірованих так і з електролітично осадженим на мідну пластину прошарком міді. Дослідження показали, що Зразок 4, який містить електролітично осаджений прошарок міді, має пониженою мікротвердість із-за дефектності поверхні. Після проведення обробки за технологією SMAT виявилось, що у Зразка 4 мікротвердість стає вищою ніж у Зразка 1, що має полікристалічну структуру та був лише відполірований.

В майбутньому планується дослідження дифузійної взаємодії та фазоутворення в системі Cu-Sn, де поверхня мідної пластини буде деформована за технологією SMAT.

Список використаної літератури:

1. Chan H. Development of surface mechanical attrition treatment (SMAT) and electrodeposition process for generating nanostructured materials and study of their tensile properties / H. Chan // The Hong Kong Polytechnic University, – 2010. – p. 190. – Режим доступу: http://ira.lib.polyu.edu.hk/bitstream/10397/3185/2/b23744820_ir.pdf
2. Glaiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure / H. Glaiter // Acta Materialia, – 2000. – Vol. 48. – P. 1-29. – Режим доступу: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00285-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00285-2)
3. Мазилкин А. А. Структурные изменения в алюминиевых сплавах при интенсивной пластической деформации / А. А. Мазилкин, Б. Б. Страумал, С. Г. Протасова //

- ФТТ, – 2007. – Т. 49. – С. 824-829. – Режим доступу: <http://www.issp.ac.ru/libm/papers/184.pdf>
4. Lu K. Surface nanocrystallization (SNC) of metallic materials-presentation of the concept behind a new approach / K. Lu, J. J. Lu // *Mater. Sci. Technol.*, – 1999. – Vol. 15, № 3. – P. 193-197. – Режим доступу: <http://www.jmst.org/CN/Y1999/V15/I03/193#1>
 5. Lu K. Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment / K. Lu, J. Lu // *Materials Science and Engineering: A*, – 2004. – Vol. 375-377. – P. 38-45. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.261>
 6. Zhang Y. S. Friction and wear behaviors of nanocrystalline surface layer of pure copper / Y. S. Zhang, Z. Han, K. Wang, K. Lu // *Wear*, – 2006. – Vol. 260 – P. 942-948. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.06.010>
 7. Dai K. Comparison between shot peening and surface nanocrystallization / K. Dai, L. Shaw // *Materials Science and Engineering A* 463. – 2007. – С. 46-53. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.159>
 8. Cao Sh. C. Predicting surface deformation during mechanical attrition of metallic alloys // Sh. C. Cao, X. Zhang, J. Lu, Y. Wang, S.-Q. Shi, R. Ritchie // *Computational Materials*. – 2019. 5, 36. – p. 1-15. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1038/s41524-019-0171-6>
 9. Zhang X. Ch. A computational study of plastic deformation in AISI 304 induced by surface mechanical attrition treatment / X. Ch. Zhang, J. Lu, S.-Q. Shi // *Mechanics of Advanced Materials and Structure*, – 2011. 18. – p. 572-577. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1080/15376494.2011.621828>
 10. Дерев'янюк С. І. Дослідження впливу поверхневої механічної обробки тертям за технологією SMAT на властивості електроосаджених прошарків міді / С. І. Дерев'янюк, В. М. Тютенко, Я. Д. Король, Ю. О. Ляшенко // *Вісник Черкаського університету. Серія «Фізико-математичні науки»*. – 2016. №1. – С. 44-45. – Режим доступу: http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/VchuFM_2016_1_8.pdf
 11. Тютенко В. М. Вплив SMAT обробки на структуру електроосаджених в стаціонарному, реверсному та стохастичному режимах прошарків міді / В. М. Тютенко, В. В. Морозович, В. А. Дідук, С. О. Колінько, Ю. О. Ляшенко // *Вісник Черкаського університету. Серія «Фізико-математичні науки»*. – 2017. №1. – С. 63-78. – Режим доступу: <http://phys-ejournal.cdu.edu.ua/article/view/2334/2406>
 12. Приходько В. І. Створення ультразвукового обладнання для зміцнення та релаксаційної обробки зварних конструкцій у вагонобудуванні. / В. І. Приходько, М. В. Високолян, В. В. Волочай, Г. І. Прокопенко, Б. М. Мордюк, В. Т. Черепін, Т. А. Красовський, Т. В. Попова // *Наука та інновації*. – 2014. Т. 10, № 1. – С. 5-17. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15407/scin10.01.005>

References:

1. Chan H. (2010). Development of SMAT and electrodeposition process for generating nanostructured materials and study of their tensile properties. *The Hong Kong Polytechnic University*, 21, 190. Retrieved from http://ira.lib.polyu.edu.hk/bitstream/10397/3185/2/b23744820_ir.pdf
2. Glaiter H. (2000). Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. *Acta Materialia*, 48, 1-29. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00285-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00285-2)
3. Mazilkin A. A., Straumal B. B., Protasova S. G. (2007). Structural changes in aluminum alloys with intensive plastic deformation. *FTT (FTT)*, 49(5), 824-829. Retrieved from <http://www.issp.ac.ru/libm/papers/184.pdf>

4. Lu K., Lu J. (1999). Surface nanocrystallization (SNC) of metallic materials-presentation of the concept behind a new approach. *J Mater Sci Technol*, 15, 193. Retrieved from <http://www.jmst.org/CN/Y1999/V15/I03/193#1>
5. Lu K., Lu J. (2004). Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 375-377, 38-45. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.261>
6. Zhang Y. S., Han Z., Wang K., Lu K. (2006). Friction and wear behaviors of nanocrystalline surface layer of pure copper. *Wear*, 260, 942-948. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.06.010>
7. Dai K., Shaw L. (2007). Comparison between shot peening and surface nanocrystallization. *Materials Science and Engineering A* 463, 46-53. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.159>
8. Cao Sh. C., Zhang X., Lu J., Wang Y., Shi S.-Q., Ritchie R. (2019). Predicting surface deformation during mechanical attrition of metallic alloys, *Computational Materials*, 5, 36, 1-15. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/s41524-019-0171-6>
9. Zhang X. Ch., Lu J., Shi S.-Q. (2011). A computational study of plastic deformation in AISI 304 induced by surface mechanical attrition treatment, *Mechanics of Advanced Materials and Structure*, 18, 572-577. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/15376494.2011.621828>
10. Derev'yanko S. I., Tiutenko V. M., Korol Ya. D., Lyashenko Yi. O. (2016). Investigation of the influence of surface mechanical treatment of friction on the technology of SMAT on the properties of electrically deposited layers of copper. *Visnyk Cherkaskoho Universytetu. Seriiia «Fizyko-Matematychni Nauky» (Bulletin of Cherkasy University. Series "Physics and Mathematics")*, 1, 44-45. Retrieved from http://irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/VchuFM_2016_1_8.pdf
11. Tiutenko V. M., Morozovych V. V., Diduk V. A., Kolinko S. O., Lyashenko Yi. O. (2017). The influence of SMAT processing on microstructure of copper films electroplated in steady-state, reversed impulse and stochastic regimes. *Visnyk Cherkaskoho Universytetu. Seriiia «Fizyko-Matematychni Nauky» (Bulletin of Cherkasy University. Series "Physics and Mathematics")*, 1, 63-78. Retrieved from <http://phys-ejournal.cdu.edu.ua/article/view/2334/2406>
12. Prykhodko V. I., Vysokolyan M. V., Volochai V. V., Prokopenko G. I., Mordyuk B. N., Cherepin V. T., Krasovskiy T. A., Popova T. V. (2014). Creation of ultrasonic equipment for strengthening and relaxation treatment of the welded constructions in carriage building, *Science and innovation*, 10, 1, 5-17. Retrieved from <https://doi.org/10.15407/scin10.01.005>

S. I. Derevianko

PhD student of the Department Physics, Educational-
Scientific Institute of Informational and Educational Technologies,
The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine,
derevianko.serhii@gmail.com

V. V. Morozovych

PhD student of the Department Physics, Educational-
Scientific Institute of Informational and Educational Technologies,
The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine,
vladmorozovua@gmail.com

T. A. Krasovskiy

Head of the Laboratory, Kyiv Academic University, Kyiv, Ukraine,
krastaras@gmail.com

Yu. O. Lyashenko

Doctor of physical and mathematical sciences, Professor,
Educational-Scientific Institute of Informational and Educational Technologies
The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine,
urico@ukr.net

THE EFFECT OF SURFACE TREATMENT ON HIGH-FREQUENCY SMAT TECHNOLOGY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF SURFACE COPPER

Summary. *Nanostructured materials are characterized by a specific structure compared to polycrystalline materials. Nanostructured materials are created in way of strong deformations. SMAT (surface mechanical attrition treatment) technology consists in the treatment of the surface of a material with steel balls accelerated by a generator of high-frequency oscillations (about 20 kHz). This changes the mechanical properties of the materials. The size of grains in such materials decreases in the direction from the volume of the crystal to the surface. As a result of SMAT processing, grains become nanosized near the surface of the samples. Such materials have a large number of subsurface defects formed as a result of intense plastic deformation, which determines their thermodynamic and diffusion characteristics.*

The purpose of this work is to develop the device of high-frequency (20 kHz) surface machining by attrition using SMAT technology and its application to the treatment of surfaces, both polished copper plates and electrodeposited in a stationary mode to copper plates with copper layers.

In this work, the device is developed and the technology of high-frequency mechanical surface treatment of SMAT is described. The design features and technical characteristics of the experimental plant are presented. In the work, the surfaces of copper substrates were processed by different methods: grinding and polishing of copper polycrystalline plates, electrolytic deposition of copper surface layers on these plates, processing of prototypes by SMAT technology. The microhardness was measured in the surface layers of the linings made using different technologies and their comparative characteristics were performed.

It is established that high-frequency surface treatment of plates by SMAT technology increases the microhardness of the surface of copper plates of different types, both polished and with electrolytically deposited copper. The results of the research showed that the sample, which was subjected to electrolytic deposition of copper, has a high defectiveness of the surface and reduced microhardness. After processing such a sample using SMAT technology, it is obtained a hardness higher than the reference polycrystalline copper sample.

Keywords: nanostructured materials, intensive plastic deformation, surface mechanical attrition treatment (SMAT), electrolytically deposited copper layers, microhardness.

*Одержано редакцією 13.08.2019
Прийнято до друку 16.09.2019*