

DOI 10.15589/jnn20160406  
УДК 621.793.7  
Д79

## INFLUENCE OF SPRAY COATING MODE OPTIONS FOR GETTING A NANOSCALE SUBSTRUCTURE WITH INCREASED STABILITY

### ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ ЩОДО ОТРИМАННЯ НАНОМАСШТАБНОЇ СУБСТРУКТУРИ З ПІДВИЩЕНОЮ СТАБІЛЬНІСТЮ

**Oleksandr M. Dubovyi**  
oleksandr.dubovyj@nuos.edu.ua  
ORCID: 0000-0002-2843-1879

**Yurii Ye. Nediello**  
e-mail: —  
ORCID: —

**Maksym M. Bobrov**  
laborantmtm@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-9098-6912

**Oleksandr V. Chechel**  
achechel@trestmag.Kiev.ua  
ORCID: 0000-0002-0175-714X

**О. М. Дубовий,**  
д-р техн. наук, проф.<sup>1</sup>

**Ю. Є. Неделько,**  
директор заводу «Екватор»

**М. М. Бобров,**  
канд. техн. наук, асист.<sup>1</sup>

**О. В. Чечель,**  
канд. техн. наук, наук. співробітник<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

<sup>2</sup>*Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, Kyiv*

<sup>1</sup>*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

<sup>2</sup>*Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ*

**Abstract.** The influence patterns of technological mode of spraying on the parameters pre-recrystallization heat treatment of gas-thermal coatings has been studied in the article. The possibility of increasing the holding time at heat treatment of coatings by subsequent plastic deformation and bead blasting was determined.

**Keywords:** thermal sprayed coatings; nanoscale elements; heat treatment; plastic deformation.

**Анотація.** Досліджено закономірності впливу технологічного режиму напилення на параметри наступної передрекристалізаційної термічної обробки газотермічних покриттів. Встановлено можливість підвищення тривалості витримки при термічній обробці покриттів за рахунок наступної пластичної деформації пресуванням і дробоструменевої обробки.

**Ключові слова:** газотермічні покриття; наномасштабні елементи; термічна обробка; пластична деформація.

**Аннотация.** Исследованы закономерности влияния технологического режима напыления на параметры последующей передрекристаллизационной термической обработки газотермических покрытий. Установлена возможность повышения продолжительности выдержки при термической обработке покрытий за счет последующей пластической деформации пресованием и дробеструйной обработкой.

**Ключевые слова:** газотермические покрытия; наномасштабные элементы; термическая обработка; пластическая деформация.

## REFERENCES

- [1] Gorelik S. S., Rastorguev L. N., Skakov Yu. A. *Rentgenograficheskiy i elektronnoopticheskiy analiz* [Radiographical and electronoptical analysis]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 336 p.
- [2] Gusev A. I., Kurlov A. S. *Attestatsiya nanokristallicheskikh materialov po razmeru chastits (zeren)* [Attestation of nanocrystalline materials according to their particle (grain) size]. *Metallofizika i noveyshie tekhnologii — Physics of Metals and Advanced Technologies*, 2008, vol. 30, no. 5, pp. 679–694.
- [3] Dubovyy O. M. *Vplyv deformatsiyi ta lehuuyuchykh elementiv na tverdist' staley i napylenykh pokryttiv pislya peredrekrystalizatsiyanoi termichnoyi obrobky* [Influence of deformation and alloying elements on the hardness of steels and sprayed coatings after pre-recrystallization heat treatment] *Zb. nauk. prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*. Mykolaiv, NUS Publ., 2011, issue 2, pp. 36–44.
- [4] Dubovyy O. M. *Vplyv peredrekrystalizatsiyanoi termichnoyi obrobky na fizyko-mekhanichni vlastyvoli napylenykh pokryttiv ta deformovanykh metaliv ta splaviv* [Influence of pre-recrystallization heat treatment on physical and mechanical properties of sprayed coatings and deformed metals and alloys] *Zb. nauk. prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*. Mykolaiv, NUS Publ., 2010, issue 3, pp. 7–10.
- [5] Duboviy O. M. *Doslidzhennia mozhlyvosti pidvyshchennia fizyko-mekhanichnykh vlastyvolei deformovanykh metaliv i splaviv termichnoiu obrobkoiu* [Study of ways to improve the physical and mechanical properties of deformed metals and alloys by heat treatment] *Zb. nauk. prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*. Mykolaiv, NUS Publ., 2010, issue 3, pp. 69–78.
- [6] Dubovoy A. N. *Uluchshenie ekspluatatsionnykh svoystv napylenykh pokrytyi elektroimpul'snym vozdeystviem na dvuhfaznyy vyssokotemperaturnyy potok s posleduyuschey termicheskoy obrabotkoy* [Improvement of operational properties of sprayed coatings by means of electric impulse impact on two-phase high-temperature flow with further heat treatment] *Zb. nauk. prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*. Mykolaiv, NUS Publ., 2014, issue 4, pp. 60–64.
- [7] Duboviy O. M., Karpechenko A. A., Zhdanov O. O., Bobrov M. M., A. M. Portnaia *Sposib deformatsiino termichnoi obrobky elektroduhovyykh pokryttiv* [Method of deformation heat treatment of electric-arc coatings] Patent UA, no 2016 10721, 2016.
- [8] Duboviy O. M., Karpechenko A. A., Yankovets T. A., Zhdanov O. O. *Sposib nanesennya pokryttiv* [Method of coating]. Patent UA, no 2009 88755, 2009.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Зносостійкість рухомих деталей сучасних машин, механізмів, обладнання тощо забезпечується переважно формуванням на робочій поверхні захисних шарів і покриттів, зокрема напилених газотермічними методами. Однак широке використання газотермічного наплення для захисту і відновлення деталей машин і механізмів стримується невирішеністю проблемних питань, що пов'язані з низьким рівнем фізико-механічних й експлуатаційних властивостей покриттів при використанні традиційних методів наплення. Тому вирішення цих питань шляхом формування наноструктурних елементів у напилених покриттях, які забезпечують підвищення фізико-механічних й експлуатаційних властивостей у них, зокрема твердості, видається актуальним для машинобудівної, суднобудівної промисловості й військово-промислового комплексу України.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ  
ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Відомо, наприклад [5], що гаряча деформація з високими швидкостями і ступенями й наступним швидким охолодженням матеріалу нижче темпера-

тури рекристалізації зберігає наклеп. Також при газотермічному напилуванні відбувається інтенсивна пластична деформація частинок унаслідок високої швидкості співудару з підкладкою (в реальних процесах напилування до 300 м/с). При цьому величина деформації може скласти 90...95%, а швидкість охолодження деформованої частинки досягає  $10^8$  °C/с, що запобігає перебігу динамічної рекристалізації в матеріалі покриття. Звідси випливає, що короткочасна витримка зразків з напиленими покриттями при температурі рекристалізації і наступне прискорене охолодження на повітрі забезпечують максимальні значення твердості покриттів завдяки фіксуванню передрекристалізаційного стану матеріалу покриття з полігонізаційною субструктурою.

Відомо [3–5, 8], що підвищення фізико-механічних й експлуатаційних властивостей напилених покриттів можна забезпечити здрібненням субструктури шляхом проведення передрекристалізаційної термічної обробки. Однак відсутні систематизовані дані щодо впливу технологічних параметрів режиму наплення на температурно-часові параметри подальшої термічної обробки покриттів. Не менш важливим є питання подальшого розвитку процесу передрекристаліза-

ційної термічної обробки напилених покриттів щодо підвищення тривалості витримки для можливості її широкого практичного застосування.

**МЕТА РОБОТИ** полягає в дослідженні впливу параметрів режиму напилення й наступного деформування й передрекристалізаційної термічної обробки щодо отримання термічно стабільних наноструктурних елементів у газотермічних покриттях.

**ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ**

Плазмові покриття напилували за допомогою установки «Київ-7», яка укомплектована плазмотроном ПУН-1 на трьох різних режимах, що наведені в табл. 1.

Як плазмотвірні і транспортуючі гази застосовували стиснуте повітря. Як напилуваний матеріал використовували порошок бронзи марки ПГ-19М-01 ТУУ 322-19-001-95 і порошок нержавіючої сталі ПР-Х18Н9 ГОСТ 14086-68 фракцією 40...80 мкм. Оптимізацію режиму передрекристалізаційної термічної обробки покриттів проводили за показниками твердості за Віккерсом. Твердість  $HV_5$  визначалася на приладі типу ТП при навантаженні на індентор 5 кг (ДСТУ ISO 6507-4:2008). Термічну обробку зразків проводили в лабораторній електричній пічці СНОЛ-1.6.2.0.08/9-М1 при температурі 350 °С та 880 °С відповідно [2, 4].

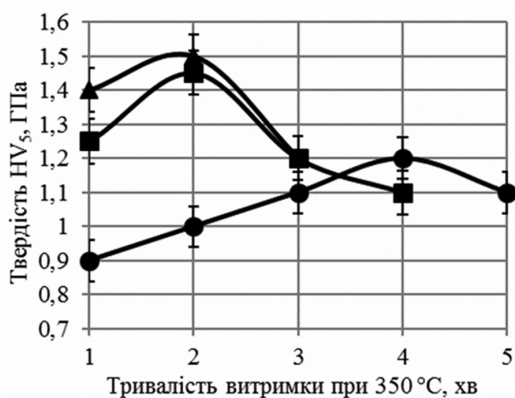
Результати впливу тривалості витримки на твердість отриманих покриттів подано на рис. 1.

Згідно з поданими даними встановлено, що при підвищенні потужності розпилювача оптимальний режим передрекристалізаційної термічної обробки, який забезпечує максимальну твердість отриманих покриттів, зміщується в напрямку менших витримок, також спостерігається збільшення твердості. Пояснюється це тим, що підвищення потужності розпилювача збільшує швидкості й температуру напилування частинок та, як наслідок, величини їх деформації при співударі з основою. Так, наприклад, для бронзового покриття з порошку марки ПГ-19М-01 режим № 1 не створює достатнього рівня енергії для нагрівання і прискорення частинок, і відповідно, невеликий ступінь деформації, тому покриття характеризується підвищеною пористістю і меншою твердістю (табл. 1). Після термічної обробки приріст твердості складає лише 9% порівняно з 15% для покриттів, напилених на режимі № 2 і № 3. Підвищення потужності з 38 кВт (режим № 2) до 50 кВт (режим № 3) не збільшує твердість покриттів у стані після напилування й наступної передрекристалізаційної термічної обробки.

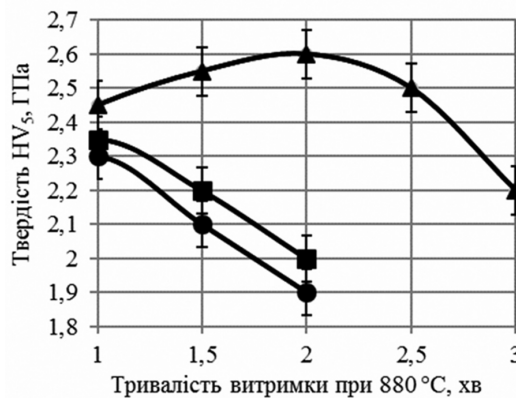
Для покриття з нержавіючої сталі ПР-Х18Н9 режим № 1 не забезпечує достатнього прогрівання і швидкості частинок, тому покриття характеризується підвищеною пористістю та меншою твердістю

**Таблиця 1.** Режими плазмового напилування й твердість отриманих покриттів з порошків марок ПГ-19М-01 та ПР-Х18Н9

№ режиму	Сила струму, А	Напруга, В	Тиск стисненого повітря, МПа	Дистанція напилування, мм	Твердість $HV_5$ , ГПа
ПГ-19М-01					
1	100	250	0,1	200	1,1
2	150	250	0,2	250	1,3
3	200	250	0,3	300	1,3
ПР-Х18Н9					
1	100	200	0,1	100	1,6
2	150	200	0,2	150	1,65
3	200	200	0,3	200	1,7



а)



б)

**Рис. 1.** Залежність твердості плазмових покриттів від тривалості витримки при термічній обробці та режиму напилування:

● — режим № 1; ■ — режим № 2; ▲ — режим № 3; а) порошок марки ПГ-19М-01; б) порошок марки ПР-Х18Н9

у порівнянні з режимом № 3 (табл. 1). Після передрекристалізаційної термічної обробки приріст твердості покриття, напиленого за режимом № 3 у порівнянні зі станом після напилення складає 38%. Подальше підвищення потужності розпилювача не забезпечує збільшення твердості покриття через протікання процесів динамічної рекристалізації, що пов'язане з перегріванням покриття плазмовим струменем під час його напилення.

Електродугове напилення покриттів із дроту марки Св-08Г2С ГОСТ 2246-70 діаметром 1,2 мм здійснювали на установці КДМ-2 розпилювачем ЕМ-14М на режимах, наведених у табл. 2.

Термічну обробку зразків з покриттями проводили при температурі 450 °С, яка вибрана в [6]. Результати впливу тривалості витримки при термічній обробці на твердість покриттів подані на рис. 2.

Згідно з представленими на рис. 2 даними спостерігається залежність подібна плазмовим покриттям: збільшення потужності забезпечує отримання більшої величини деформації частинок та, як наслідок, зменшення максимальної твердості в бік менших витримок.

Оптимальним є режим № 2, що створює твердість покриття після напилення на рівні 2 ГПа й приріст твердості після передрекристалізаційної термічної

обробки (450 °С, 2 хв) на 35%. Підвищення потужності розпилювача до 4,2 кВт (режим № 3) призводить до збільшення теплової енергії частинок, яка передається поверхні, на яку наноситься покриття, що зменшує його твердість через часткову динамічну полігонізацію.

Для отримання газополуменевих покриттів використовували пальник наплавочний великої потужності ГН-3. Як напилюваний матеріал використовували порошок нержавіючої сталі марки ПР-Х18Н9. Режими напилення наведено в табл. 3.

Температура термічної обробки складала 880 °С [8]. Результати вимірювання твердості покриттів представлено на рис. 3.

З наведених даних можна зробити висновок, що при підвищенні тиску ацетилену й кисню зростає швидкість напилюваних частинок і величина їх деформації, що забезпечує кращий ефект збільшення твердості після передрекристалізаційної термічної обробки і зменшення максимальної твердості в бік менших витримок.

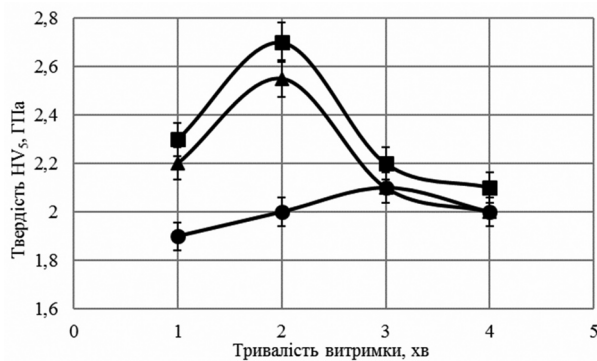
Вплив параметрів режиму напилення і параметрів термічної обробки на субструктуру напилених покриттів оцінювали і за зміною розмірів областей когерентного розсіювання (ОКР) рентгенівських променів методом апроксимації [1, 2] (табл. 4).

**Таблиця 2.** Режими електродугового напилення та твердість отриманих покриттів

№ режиму	Сила струму, А	Напруга, В	Тиск стисненого повітря, МПа	Дистанція напилення, мм	Твердість HV <sub>5</sub> , ГПа
1	80	25	0,4...0,6	100	1,8
2	100	30			2,0
3	120	35			2,0

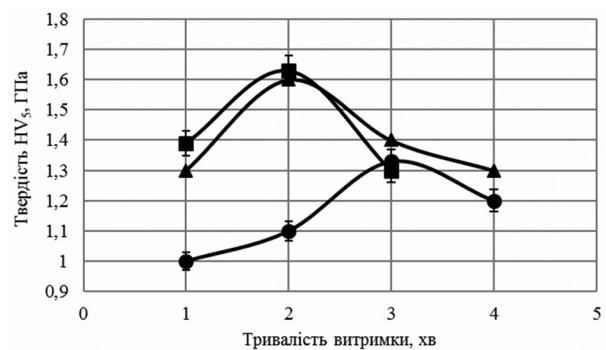
**Таблиця 3.** Режими газополуменевого напилення та твердість отриманих покриттів

№ режиму	Тиск ацетилену, МПа	Тиск кисню, МПа	Дистанція напилення, мм	Твердість HV <sub>5</sub> , ГПа
1	0,01	0,4	60	1,1
2	0,015	0,45		1,2
3	0,02	0,5		1,2



**Рис. 2.** Залежність твердості електродугових покриттів з дроту Св-08Г2С від тривалості витримки при термічній обробці й режиму напилення:

● — режим № 1; ■ — режим № 2; ▲ — режим № 3



**Рис. 3.** Залежність твердості газополуменевих покриттів з порошку марки ПР-Х18Н9 від тривалості витримки при термічній обробці та режиму напилення:

● — режим № 1; ■ — режим № 2; ▲ — режим № 3

**Таблиця 4.** Залежність розмірів ОКР рентгенівського випромінювання газотермічних покриттів від режиму наплення

№ режиму	Розмір ОКР, нм	
	Без термічної обробки	Після термічної обробки на режимах, що забезпечує максимальну твердість
Плазмові покриття		
ПГ-19М-01		
1	599	474
2	479	236
3	485	287
ПР-Х18Н9		
1	125	108
2	106	91
3	112	90
Електродугові покриття з дроту Св-08Г2С		
1	144	112
2	106	62
3	119	87
Газополуменеві покриття з порошку марки ПР-Х18Н9		
2	351	317

Оскільки ОКР відповідає внутрішній впорядкованій області зерна і не включає сильно спотворені границі, розмір ОКР ототожнюють із середнім розміром кристалітів (субзерен) [2]. Рентгеноструктурний аналіз проводили на дифрактометрі ДРОН-3 у випромінюванні міді  $Cu_{K\alpha}$  ( $\lambda = 0,154$  нм) з використанням Ni  $\beta$ -фільтра. Обертання зразків здійснювалось в інтервалі подвійних кутів від 30 до 100°, швидкість розгортки складала 1 град/хв.

Згідно з наведеними в табл. 4 даними для плазмового наплення найбільш ефективним є режим № 2 для покриття з порошку ПГ-19М-01, що забезпечує розмір ОКР 236 нм і найбільшу твердість; та режим № 3 для покриття з порошку ПР-Х18Н9, що гарантує наномасштабний розмір ОКР 90 нм і найбільшу твердість.

Найбільш ефективний режим електродугового наплення, що дозволяє отримати наномасштабні субзерна після передрекristалізаційної термічної обробки, є режим № 2.

Розмір ОКР газополуменевих покриттів з порошку марки ПР-Х18Н9 після передрекristалізаційної термічної обробки на режимі, що забезпечує найбільший приріст твердості, зменшується порівняно зі станом після наплення. Це свідчить про те, що передрекristалізаційна термічна обробка здрибнює субструктуру покриттів.

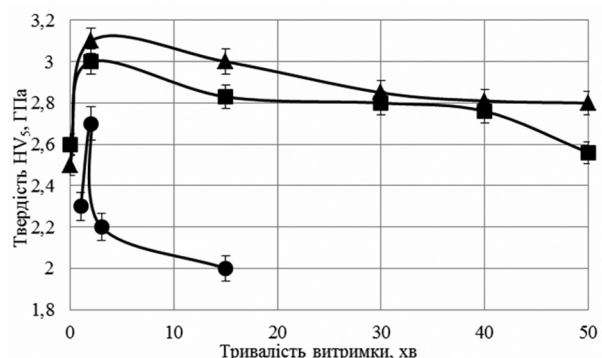
Передрекristалізаційна термічна обробка напелених покриттів створює здрибнення полігонізаційної субструктури з приростом твердості на 9...38%. Най-

більша ефективність цієї термічної обробки виявляється на плазмових і особливо на електродугових покриттях, в яких зафіксовано наномасштабні середні розміри субзерен.

З практичної точки зору основним недоліком передрекristалізаційної термічної обробки є невелика тривалість витримки в декілька хвилин, тому актуальним постає дослідження можливості стабілізації здрибненої полігонізаційної субструктури напеленого покриття при більш тривалій витримці в процесі термічної обробки за рахунок наступної деформації.

Для досліджень обрали електродугові покриття з дроту Св-08Г2С, оскільки вони характеризуються найменшим значенням ОКР (табл. 4) і найвищим ефектом підвищення твердості після передрекristалізаційної термічної обробки (рис. 2). З метою гальмування руху дислокаційних субграниць в процесі збиральної полігонізації, який виявляється при нагріванні (тривалій витримці) здійснювали додаткове деформування покриття двома способами: пресуванням на гідравлічному пресі при навантаженні 10 т (ступінь деформації 30%) і шляхом поверхневої пластичної деформації (ППД) сталевими кульками діаметром 0,1...0,3 мм протягом 2 хв. Температуру нагрівання деформованих зразків знизили до 400 °С з огляду на те, що при збільшенні величини деформації температурний поріг рекristалізації знижується [7]. Результати наведено на рис. 4.

Аналіз наведених даних показує, що використання наступної деформації забезпечує менше зниження твердості при підвищенні тривалості витримки при передрекristалізаційній термічній обробці до 15 хв. Дана тенденція спостерігається для обох видів деформації покриття. Так, наприклад, твердість покриття без наступної деформації при підвищенні тривалості витримки з 2 хв до 15 хв зменшується з 2,7 ГПа до 2 ГПа (-35%), а при проведенні наступної деформації — з 3 ГПа до 2,8 ГПа (-7%) та з 3,1 ГПа до 3 ГПа (-3%) для ППД і пресування відповідно. Взагалі, до-



**Рис. 4.** Залежність твердості електродугових покриттів з дроту Св - 08Г2С від тривалості витримки та виду наступної деформації:

● — без додаткової деформації (температура 450 °С); ■ — ППД; ▲ — пресування

статньо високі значення твердості спостерігаються при витримці до 40 хв для ППД, а для пресування навидь більше. Пояснюється це тим, що при здійсненні повторної деформації дислокаційна взаємодія закінчується виникненням від 50% до 75% дислокаційних бар'єрів (Хірта, Ломер-Коттрелла) решта бере участь у формуванні дислокаційних сплетінь. Дані дислокаційні бар'єри, які виникають вздовж напрямку, перпендикулярного осі деформації, стримують рух дислокацій та, як наслідок, зменшують рухливість полігонізаційних субмеж, таким чином, знижуючи швидкість полігонізаційних процесів, забезпечується стабілізуючий ефект [7].

**ВИСНОВКИ.** 1. Визначено оптимальні параметри передрекристалізаційної термічної обробки плазмових (з порошку ПГ-19М-01 та ПР-Х18Н9), електродугових (з дроту Св-08Г2С) і газополумєневих (з ПР-Х18Н9) покриттів, напилених при різних параметрах технологічних режимів.

2. Встановлено, що підвищення потужності при напиленні забезпечує кращий приріст твердості

після передрекристалізаційної термічної обробки газотермічних покриттів за рахунок зростання швидкості часток у гетерофазному потоці і, як наслідок, збільшення ступеня їх деформації. При підвищенні потужності (плазмове та електродугове напилення) і витрат розпилюючого газу (газополумєнєве напилення) при напиленні покриттів оптимальний режим передрекристалізаційної термічної обробки зміщується у діапазон менших витримок, що пов'язано з більшою деформацією напилюваних частинок.

3. Передрекристалізаційна термічна обробка забезпечує формування наномасштабних елементів у напилених плазмових — з ПР-Х18Н9 та електродугових — з Св-08Г2С покриттях.

4. Встановлено, що проведення наступної деформації (ППД і пресуванням) електродугових покриттів дозволяє збільшити час витримки при передрекристалізаційній термічній обробці (до 15...40 хв) без суттєвого зменшення твердості (на 3%...7%) за рахунок зниження рухливості малокутових полігонізаційних субмеж.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Горелик, С. С. Рентгенографический и электроннооптический анализ [Текст] / С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. — М. : МИСИС, 1994. — 328 с.
- [2] Гусев, А. И. Аттестация нанокристаллических материалов по размеру частиц (зерен) [Текст] / А. И. Гусев, А. С. Курлов // Металлофизика и новейшие технологии. — 2008. — т. 30. № 5. — С. 679–694.
- [3] Дубовий, О. М. Вплив деформації та легуючих елементів на твердість сталей і напилених покриттів після передрекристалізаційної термічної обробки [Текст] / О. М. Дубовий, С. Г. Кулік, О. О. Жданов, М. М. Бобров, О. І. Мирко // 36. наук. праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2011. — № 2 (437). — С. 36–44.
- [4] Дубовий, О. М. Вплив передрекристалізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості напилених покриттів та деформованих металів та сплавів [Текст] / О. М. Дубовий, Н. Ю. Лебедева, Т. А. Янковець // Металознавство та обробка металів, 2010. — № 3. — С. 7–10.
- [5] Дубовий, О. М. Дослідження можливостей підвищення фізико-механічних властивостей деформованих металів і сплавів термічною обробкою [Текст] / О. М. Дубовий, Н. Ю. Лебедева, Т. А. Янковець, А. А. Карпеченко, О. О. Жданов // Збірник наукових праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2010. — № 3. — С. 69–78.
- [6] Дубовой, А. Н. Улучшение эксплуатационных свойств напыленных покрытий электроимпульсным воздействием на двухфазный высокотемпературный поток с последующей термической обработкой [Текст] / А. Н. Дубовой, А. А. Карпеченко, М. Н. Бобров // Збірник наукових праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2014. — № 4. — С. 60–64.
- [7] Пат. у 2015 10721 Україна, МПК С23С 4/00. Спосіб деформаційно термічної обробки електродугових покриттів [Текст] / О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, О. О. Жданов, М. М. Бобров, А. М. Портная; заявник та патентоодержувач Національний університет кораблебудування. — № 106450; заявл. 03.11.15; опубл. 25.04.16; Бюл. № 8.
- [8] Пат. а 2009 02658 Україна, МПК С23С 4/18. Спосіб нанесення покриттів [Текст] / О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, Т. А. Янковець, О. О. Жданов; заявник та патентоодержувач Національний університет кораблебудування. — № 88755; заявл. 23.03.09; опубл. 10.11.09, Бюл. № 21.

© О. М. Дубовий; Ю. Є. Неделько; М. М. Бобров; О. В. Чечель

Надійшла до редколегії 20.07.2016

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницький