

DOI 10.15589/jnn20150306
 УДК 621.793.7
 В80

**INFLUENCE OF PRE-RECRYSTALLIZATION HEAT TREATMENT
 ON THE HARDNESS AND THE SUBSTRUCTURE OF GAS-FLAME COATINGS**
**ВПЛИВ ПЕРЕДРЕКРИСТАЛІЗАЦІЙНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ТВЕРДІСТЬ
 І СУБСТРУКТУРУ ГАЗОПОЛУМЕНЕВИХ ПОКРИТТІВ**

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

Anton A. Karpechenko
 anton.karpechenko@nuos.edu.ua
 ORCID:0000-0002-7543-4159

Oleksandr O. Zhdanov
 zhdanoff.alexander2013@yandex.ru
 ORCID: 0000-0003-1967-7233

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

Tetiana O. Makrukha
 tmakruha@bk.ru
 ORCID: 0000-0001-8841-1688

О. М. Дубовий
 д-р техн. наук, проф.

А. А. Карпеченко
 канд. техн. наук, доц.

О. О. Жданов
 пров. фахів.

М. М. Бобров
 асп.

Т. О. Макруха
 фахів.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. The article considers the possibility of pre-recrystallization heat treatment and specifies its optimum conditions for gas-flame coatings of bronze powder brand PG-19Mo-01, stainless steel PR-Cr18Ni9 and nichrome brand PG-Cr20Ni80. The particle size distribution and amount of strain sprayed particles are defined by using metallographic analysis. The analysis of microstructures after coating deposition and pre-recrystallization heat treatment is obtained in optimal mode. It is established that this heat treatment of gas-flame coatings provides shredding substructural elements, resulting in increase in hardness.

Keywords: gas-flame coatings; heat treatment; hardness; substructural elements.

Анотація. У роботі досліджено можливість передрекристилізаційної термічної обробки й встановлено оптимальні режими її проведення для газополуменевих покриттів з порошків бронзи марки ПГ-19М-01, нержавіючої сталі ПРХ18Н9 і ніхрому марки ПГ-Х20Н80. З'ясовано, що дана термічна обробка газополуменевих покриттів забезпечує здрібнення субструктурних елементів, наслідком чого є підвищення твердості.

Ключові слова: газополуменеві покриття; термічна обробка; твердість; субструктурні елементи.

Аннотация. В работе исследована возможность передрекристиллизационной термической обработки и установлены оптимальные режимы её проведения для газопламенных покрытий из порошков бронзы марки ПГ-19М-01, нержавеющей стали ПРХ18Н9 и нихрома марки ПГ-Х20Н80. Выявлено, что данная термическая обработка газопламенных покрытий обеспечивает измельчение субструктурных элементов, следствием чего является повышение твердости.

Ключевые слова: газопламенные покрытия; термическая обработка; твердость; субструктурные элементы.

REFERENCES

- [1] Dubovyi O. M., Kulik S. H., Zhdanov O. O., Bobrov M. M., Myrko O. I. *Vplyv deformatsii ta lehuiuchykh elementiv na tverdost stali i napylenykh pokryttiv pislia peredrekrystalizatsiinoi termichnoi obrobky* [Influence of strain and alloying elements on the hardness of steel and sprayed coatings after pre-recrystallization heat treatment]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of Scientific Publications of NUS*, 2011, no. 2, pp. 36–44.
- [2] Dubovyi O. M., Bondarenko O. V., Zhdanov O. O., Zhyshko O. V., Bobrov M. M., Halkina T. S. *Vplyv peredrekrystalizatsiinoi termichnoi obrobky na substrukturu i tverdost deformovanykh kolorovykh metaliv i splaviv*

- ta napylennykh pokryttiv* [Influence of the pre-recrystallization heat treatment on the hardness and substructure of deformed non-ferrous metals and alloys, and sprayed coatings]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of Scientific Publications of NUS*, 2012, no. 2, pp. 47–53.
- [3] Dubovoj A. N., Karpechenko A. A., Bobrov M. N. *Uluchshenie jekspluatacionnykh svojst napylennykh pokrytij jelektroimpul'snym vozdeystviem na dvuhfaznyj vysokotemperaturnyj potok s posledujushhej termicheskoj obrabotkoj* [Improvement of the performance of sprayed coatings by electropulse impact on the two-phase high temperature flow followed by the heat treatment]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of Scientific Publications of NUS*, 2014, no. 4, pp. 60–64.
- [4] Kalita V. I., Samokhin A. V., Alekseev N. V., Ivanov V. M., Yarkin V. V., Lubman G. U., Kasimtsev A. V., Komlev D. L. *Plazmennye pokrytiya s nanorazmernym karbonitridom titana* [Plasma coatings with nano-sized titanium carbonitride]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2007, no. 2, pp. 37–45.
- [5] Kalita V. I. *Fizika, khimiya i mekhanika formirovaniya pokrytij, uprochnennykh nanorazmernymi fazami* [Physics, chemistry and mechanics of the formation of coatings strengthened by nanoscale phases]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2005, no. 4, pp. 46–75.
- [6] Kalita V. I., Yarkin V. V., Kasimtsev A. V., Lubman G. U. *Formirovanie nanorazmernykh uprochnyayushchikh faz v plazmennyykh pokrytyakh iz staley, chugunov i splavov na osnove zheleza* [Formation of nanoscale strengthening phases in the plasma coatings made of steel, cast iron and iron-based alloys]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2006, no. 5, pp. 29–40.
- [7] Dubovyi O. M., Yankovets T. A., Karpechenko A. A., Zhdanov O. O. *Sposib nanesennia pokryttiv* [Method of coating]. Patent UA, no. a 2009 02658, 2009.
- [8] Jaworski R., Pawlowski L., Roudet F., Kozerski S., Petit F. Recent developments in suspension plasma sprayed titanium oxide and hydroxyapatite coatings spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, no. 19, pp. 240–247.
- [9] Siegmans S., Brandt O., Drovak M. Thermally sprayed wear resistant coatings with nanostructured hard phases. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2004, no. 13, pp. 37–43.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Збільшення ресурсу роботи деталей машин і конструкцій — основне завдання сучасного машинобудування. Одним із прогресивних і високо-ефективних способів відновлення зношених деталей є застосування методів газотермічного напилення покриттів, які дозволяють створювати нові поверхні із заданим складом і властивостями. Газотермічне напилення покриттів є дешевим, обладнання для нанесення таких покриттів просте в обслуговуванні. До недоліків цих методів (зокрема газополуменевого) належать низька міцність зчеплення покриттів з основою й висока пористість. Підвищення фізико-механічних й експлуатаційних властивостей газополумених покриттів, зокрема твердості, за допомогою передрекristалізаційної термічної обробки — один із перспективних напрямків розвитку даного методу.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В останні роки досягнуто значних успіхів у створенні наноструктурованих газотермічних покриттів, отриманих із аморфної фази [4–6] та напиленням ультрадисперсних порошків [8, 9]. Дані способи характеризуються високою вартістю, трудомісткістю й складністю обладнання. Одним із напрямів вирішення цієї проблеми є застосування передрекristа-

лізаційної термічної обробки напилених покриттів, сутність якої полягає у фіксації полігонізаційної субструктури охолодженням матеріалу покриття на етапі формування субзерен наномасштабного розміру [7]. Проведені дослідження свідчать, що дана термічна обробка забезпечує підвищення твердості електродугових і плазмових покриттів до 70% за рахунок здібнення субзерен [1–3], включаючи і наномасштабний розмір. Проте до цього часу не з'ясовано вплив передрекristалізаційної термічної обробки на твердість, мікро- та субструктуру газополумених покриттів.

МЕТА РОБОТИ — встановлення закономірностей впливу параметрів режиму передрекristалізаційної термічної обробки на мікро- і субструктуру й твердість газополумених покриттів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Газополуменеві покриття з порошків бронзи марки ПГ-19М-01, нержавіючої сталі — ПРХ18Н9 і ніхрому — ПГ-Х20Н80, нанесених за допомогою пальника ГН-3, досліджували в такому режимі: тиск ацетилену — 0,01...0,02 МПа, тиск кисню — 0,4...0,5 МПа, дистанція напилення — 100...120 мм. Ситову класифікацію застосовуваних порошків проводили на віброситі СО-130У2, використовуючи сітку номерів 004 і 008 за ГОСТ 6613-86. У результаті виділено порошки фракцією 40...80 мкм, які перед напиленням розміщували

в сушильній шафі HSPT-200 за температури 150°C протягом 5 годин.

Як підкладку використовували пластини розміром 50×30×4 з конструкційної вуглецевої сталі звичайної якості марки Ст 3. Підготовку поверхні зразків безпосередньо перед напиленням здійснювали на установці струменево-абразивної обробки марки 026-7 «Ремдеталь». Застосовували абразив — електрокорунд марки 7Б, шліфзерно номер 125 по ОСТ 5.9957-85. Струменево-абразивна обробка поверхні відбувалася в такому режимі: тиск стисненого повітря — 0,4...0,6 МПа, відстань від зрізу сопла до оброблюваної поверхні — 100...150 мм, діаметр сопла — 12 мм, кут падіння струменя на оброблювану поверхню — 60...90 град. Контроль якості обробленої поверхні проводився візуально. Поверхня сталевих пластин, призначена під нанесення газополумених покриттів після струменево-абразивної обробки мала сірувато-матовий відтінок. Величина шорсткості обробленої поверхні склала $R_z = 20...40$ мкм. Термічну обробку зразків реалізовували в лабораторній електричній пічці СНОЛ-1.6.2.0.08/9-М1. Твердість HV_5 визначалася на приладі типу «Віккерс» при навантаженні на індентор 5 кг (ДСТУ ISO 6507-4:2008).

Для вивчення мікроструктури газополумених покриттів виготовлялися поперечні шліфи. Зі сталевих пластин з нанесеним покриттям механічно вирізали сегмент, затискали його в металеву струбцину й для отримання паралельних площин шліфували на універсально-заточному верстаті моделі ЗЕ642Е. Подальше доведення і полірування шліфів виконували на верстаті марки Р-2G. Після закінчення полірування зразки промивалися в етиловому спирті й висушувалися.

Знімки мікроструктур отримували за допомогою цифрової камери DeltaOpticalHDCE-20С, що укомплектована програмним забезпеченням для обробки зображень ScoreImage 9.0, на оптичному металографічному мікроскопі ММУ-3. Розмірна лінійка на знімках встановлювалася за допомогою об'єкт-мікрометра ГОСТ 7513-55, який знімався на тому ж

збільшенні, що й відповідна мікроструктура. Пористість покриттів визначали за допомогою програми для металографічного аналізу MEGRAN. На рис. 1 наведено мікроструктури одержаних газополумених покриттів.

Аналіз знімків показує, що покриття мають характерну для газотермічних покриттів лускату ламелеподібну мікроструктуру. Для покриттів з порошку ПРХ18Н9 та ПГ-Х20Н80 притаманна наявність великої кількості не проплавлених недеформованих частинок, що пояснюється недостатньою температурою й швидкістю частинок. Ламелі відокремлені одна від одної тонкими оксидними плівками (1–2 мкм). Середня висота ламелей для покриття з порошку марки ПГ-19М-01 складає 13 мкм, для ПРХ18Н9 — 18 мкм, для ПГ-Х20Н80 — 25 мкм. Покриття з порошку марки ПГ-19М-01 має пористість 9%, з ПРХ18Н9 — 13%, з ПГ-Х20Н80 — 18%. Границя поділу покриття — підкладка — для всіх досліджуваних зразків має незначну кількість несущільностей в окремих місцях.

Для вивчення можливості проведення передкристалізаційної термічної обробки провели визначення величини деформації напилюваних частинок при формуванні газополумених покриттів за формулою:

$$\varepsilon = \frac{\bar{d} - h}{\bar{d}} \cdot 100\% , \quad (1)$$

де ε — величина деформації частинок, %, \bar{d} — середній зважений діаметр частинок, мкм; h — середня висота ламелей, мкм.

Середній зважений діаметр частинок \bar{d} встановили за гранулометричним складом напилюваних порошків металографічним методом. Знімки досліджуваних порошків представлено на рис. 2.

Отримані знімки аналізували за допомогою програмного забезпечення для обробки зображень ScoreImage 9.0. Всього розглянуто по 5 проб, у кожену з яких входило близько 30 частинок для окремої марки порошку. Результати досліджень можна побачити на рис. 3.

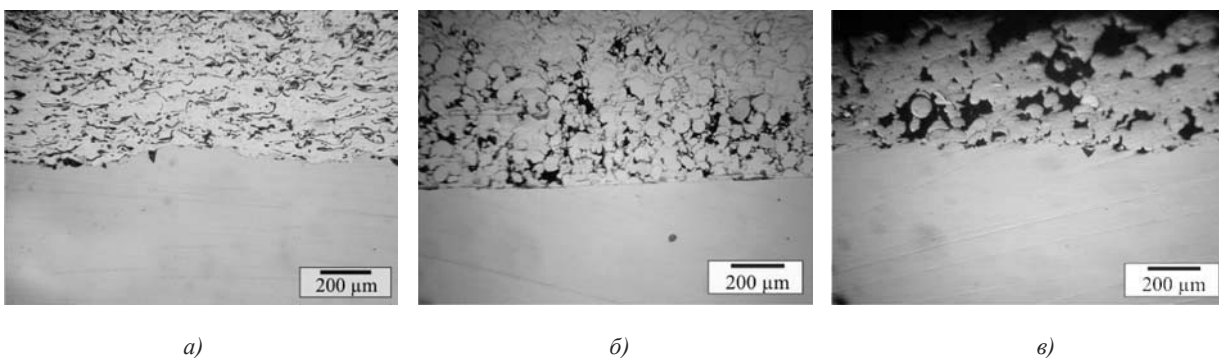


Рис. 1. Мікроструктури газополумених покриттів з порошків: а — ПГ-19М-01; б — ПРХ18Н9; в — ПГ-Х20Н80

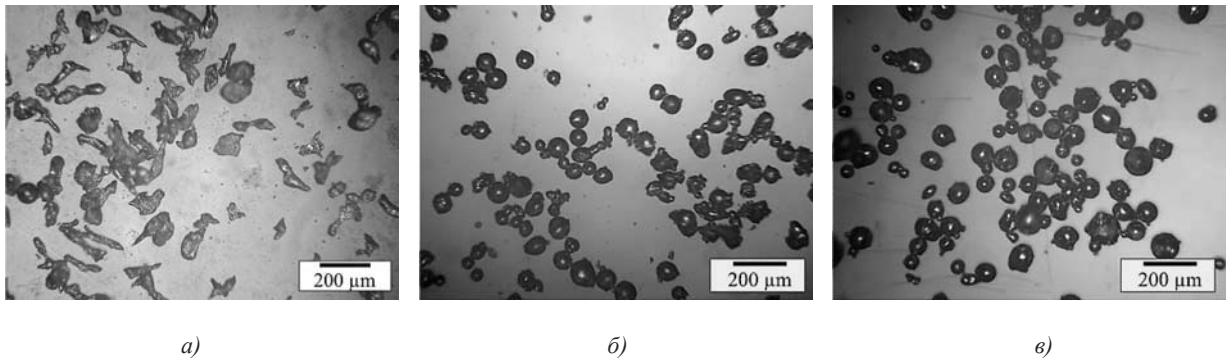


Рис. 2. Мікрофотографія частинок порошків марок:
а — ПГ-19М-01; б — ПРХ18Н9; в — ПГ-Х20Н80

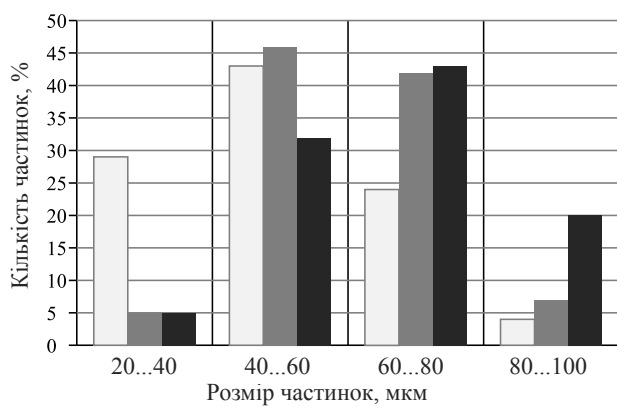


Рис. 3. Гранулометричний склад напилюваних частинок порошку марки:
□ — ПГ-19М-01; ■ — ПРХ18Н9; ■ — ПГ-Х20Н80

Для оцінки гранулометричного складу частинок знаходили середні зважені значення розміру частинок:

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^n (w_i / 100) \cdot d_i, \quad (2)$$

де w_i — кількість частинок, %; d_i — середнє значення в діапазоні розміру частинок, мкм; n — кількість діапазонів розмірів частинок.

У результаті розрахунків встановлено, що середній зважений розмір частинок порошку марки ПГ-19М-01 складає 51 мкм, а величина їх деформації при формуванні газополуменевого покриття — 74%. Для порошків марок ПРХ18Н9 і ПГ-Х20Н80 середній визначений розмір частинок і величина їх деформації відповідно становить: 60 мкм — 70% і 66 мкм — 62%. Менша деформація частинок порошків ПРХ18Н9 і ПГ-Х20Н80 порівняно з порошком марки ПГ-19М-01 пояснюється їх вищою температурою плавлення й окисненням у високотемпературному гетерофазному струмені з утворенням тугоплавких оксидів. Авторами роботи [1] з'ясовано, що передрекристилізаційна термічна обробка забезпечує прояв «розмірного ефекту» за деформації матеріалів,

більшої за 40%, тому аналогічний ефект від її проведення можна прогнозувати й для газополуменевих покриттів.

Отримані зразки з газополуменевим покриттям нагрівали в печі до температури початку первинної рекристалізації матеріалу покриття, як у роботах [1, 2]: покриття з порошку ПГ-19М-01 — до температури 350 °С; з ПРХ18Н9 — до 880 °С; з ПГ-Х20Н80 — 500 °С. Результати впливу тривалості витримки на твердість покриттів презентовано на рис. 4.

Оптимізацію режиму передрекристилізаційної термічної обробки покриттів проводили за показниками максимальної твердості за Віккерсом, $HV_0.05$, які склали: для ПГ-19М-01 — 880 МПа; для ПРХ18Н9 — 1630 МПа; для ПГ-Х20Н80 — 2669 МПа.

Таким чином, оптимальний режим передрекристилізаційної термічної обробки, що створює максимальне підвищення твердості бронзового покриття на 14%, полягає у витримці 1 хв. за температури 350 °С. Оптимальний режим термічної обробки покриття з порошку ПРХ18Н9, який створює підвищення твердості на 36%, такий: витримка протягом 2 хв. за температури 880 °С. Щодо покриття з ніхрому, то максимальне підвищення твердості на 20% отримали за температури 500 °С і витримки 1 хв.

На рис. 5 зображено мікроструктури газополуменевих покриттів після проведення передрекристилізаційної термічної обробки на оптимальному режимі, які одержані при збільшенні оптичного металографічного мікроскопа.

Аналіз знімків показав, що змін у структурі, крім пористості, покриттів до і після термообробки не виявлено (див. рис. 1). Це свідчить про те, що зміцнювальний ефект забезпечують структурні елементи, розмір яких менший за 0,5 мкм. Пористість покриттів зменшилась на 10% відносно напиленого стану. Далі розглянули зміну величини субструктурних елементів покриттів за оцінкою розмірів областей когерентного розсіювання, які визначали на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3, результати наведено у табл. 1.

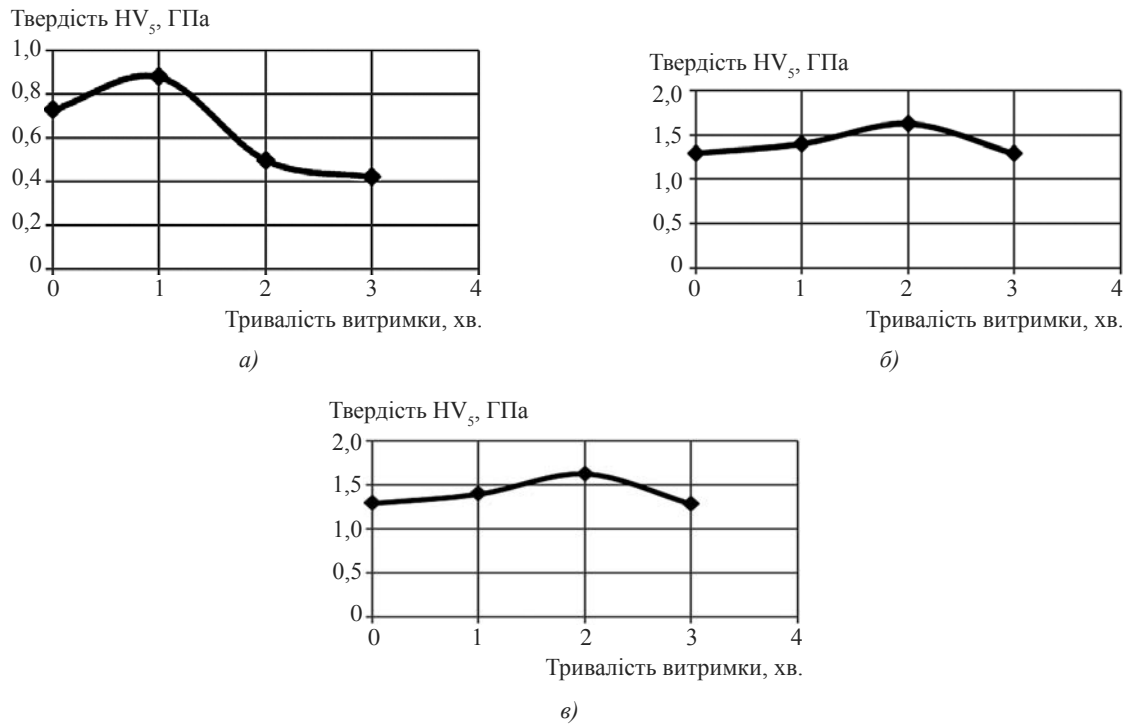


Рис. 4. Залежність твердості газополумених покриттів від тривалості витримки при передрекристалізаційній термічній обробці:

a — ПГ-19М-01; *б* — ПРХ18Н9; *в* — ПГ-Х20Н80

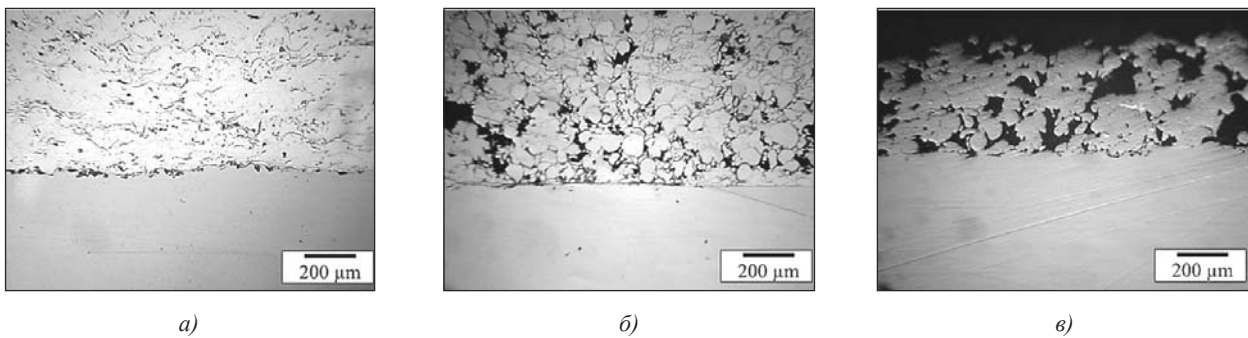


Рис. 5. Мікроструктури газополумених покриттів після передрекристалізаційної термічної обробки на оптимальному режимі:

a — з порошку марки ПГ-19М-01; *б* — з порошку марки ПРХ18Н9; *в* — з порошку марки ПГ-Х20Н80

Таблиця 1. Розмір областей когерентного розсіювання рентгенівського випромінювання газополумених покриттів після наплення і термічної обробки

Матеріал покриття	Термообробка	Розмір ОКР, нм
Покриття з порошку марки ПГ-19М-01. Величина деформації частинок — 74%	Без термічної обробки	413
	350 °С, 1 хв.	387
Покриття з порошку марки ПРХ18Н9. Величина деформації частинок — 70%	Без термічної обробки	351
	880 °С, 2 хв.	317
Покриття з порошку марки ПГ-Х20Н80. Величина деформації частинок — 67%	Без термічної обробки	385
	500 °С, 1 хв.	327

Показники у табл. 1 свідчать про те, що розмір ОКР газополуменевих покриттів після передрекристиалізаційної термічної обробки на оптимальному режимі зменшується порівняно зі станом після наплення. Звідси випливає, що дана термічна обробка призводить до здрібнення субструктури, що створює «розмірний ефект», зокрема підвищення твердості.

Таким чином, перспективи подальших досліджень полягають у встановленні впливу передре-

кристалізаційної термічної обробки на тонку структуру покриттів та їх експлуатаційні властивості.

ВИСНОВКИ. 1. Обрано оптимальні режими передрекристиалізаційної термічної обробки газополуменевих покриттів з порошків марок ПГ-19М-01, ПРХ18Н9 та ПГ-Х20Н80, що забезпечують підвищення твердості на 14%, 36% та 20% відповідно.

2. Встановлено, що такий тип обробки призводить до здрібнення субструктурних елементів, наслідком чого є підвищення твердості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Дубовий, О. М.** Вплив деформації та легуючих елементів на твердість сталей і напилених покриттів після передрекристиалізаційної термічної обробки [Текст] / О. М. Дубовий, С. Г. Кулік, О. О. Жданов, М. М. Бобров, О. І. Мирко // Зб. наук. праць НУК. — 2011. — № 2. — С. 36–44.
- [2] **Дубовий, О. М.** Вплив передрекристиалізаційної термічної обробки на субструктуру і твердість деформованих кольорових металів і сплавів та напилених покриттів [Текст] / О. М. Дубовий, О. В. Бондаренко, О. О. Жданов, О. В. Жишко, М. М. Бобров, Т. С. Галкіна // Зб. наук. праць НУК. — 2012. — № 2. — С. 47–53.
- [3] **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 // Зб. наук. праць НУК. — 2014. — № 4. — С. 60–64.
- [4] **Калита, В. И.** Плазменные покрытия с наноразмерным карбонитридом титана [Текст] / В. И. Калита, А. В. Самохин, Н. В. Алексеев, В. М. Иванов, В. В. Яркин, Г. У. Лубман, А. В. Касимцев, Д. Л. Комлев // Физика и химия обработки материалов. — 2007. — № 2. — С. 37–45.
- [5] **Калита, В. И.** Физика, химия и механика формирования покрытий, упрочненных наноразмерными фазами [Текст] / В. И. Калита // Физика и химия обработки материалов. — 2005. — № 4. — С. 46–57.
- [6] **Калита, В. И.** Формирование наноразмерных упрочняющих фаз в плазменных покрытиях из сталей, чугунов и сплавов на основе железа [Текст] / В. И. Калита, В. В. Яркин, А. В. Касимцев, Г. У. Лубман // Физика и химия обработки материалов. — 2006. — № 5. — С. 29–40.
- [7] **Пат. 88755 Україна МПК (2009) C23C 4/18.** Спосіб нанесення покриттів / О. М. Дубовий, Т. А. Янковець, А. А. Карпеченко, О. О. Жданов; заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. — № а 2009 02658, заявл. 23.03.2009; опубл. 10.11.2009, бюл. № 21.
- [8] **Jaworski, R.** Recent developments in suspension plasma sprayed titanium oxide and hydroxyapatite coatings spraying [Text] / R. Jaworski, L. Pawlowski, F. Roudet, S. Kozerski, F. Petit // Journal of Thermal Spray Technology. — 2010. — № 19. — Pp. 240–247.
- [9] **Siegmann, S.** Thermally sprayed wear resistant coatings with nanostructured hard phases [Text] / S. Siegmann, O. Brandt, M. Drovak // Journal of Thermal Spray Technology. — 2004. — № 13. — Pp. 37–43.

© О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, О. О. Жданов та інш.

Надійшла до редколегії 24.04.2015

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. О. О. Мочалов