УДК 621.78
В 80

ВПЛИВ СПОСОБУ ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ НА МІКРОСТРУКТУРУ І ТВЕРДІСТЬ ПОКРИТТІВ ПІСЛЯ ПЕРЕДРЕКРИСТАЛІЗАЦІЙНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

А. А. Карпеченко, канд. техн. наук, доц.;
С. А. Лой, старш. викл.;
О. О. Жданов, асп.;
М. М. Бобров, асп.;
Н. В. Біч, магістрант

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

Анотація. Досліджено вплив способу плазмового напилення (на повітрі і в динамічному вакуумі) покриттів на мікроструктуру і твердість покриттів після передрекристалізаційної термічної обробки.
Ключові слова: плазмове напилення покриттів, мікроструктура, твердість, передрекристалізаційна термічна обробка.

Аннотация. Исследовано влияние способа плазменного напыления (на воздухе и в динамическом вакууме) покрытий на микроструктуру и твердость покрытий после предрекристаллизационной термической обработки.
Ключевые слова: плазменное напыление покрытий, микроструктура, твердость, предрекристаллизационная термическая обработка.

Abstract. The effect of plasma spraying method (in air and dynamic vacuum) of coatings on the microstructure and hardness of coatings after the recrystallization heat treatment has been studied.
Keywords: plasma coatings spray, microstructure, hardness, recrystallization heat treatment.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Збільшення терміну експлуатації деталей машин можна забезпечити шляхом створення на поверхні цих деталей покриттів, які захищають їх від корозії та ерозії, зносу, високотемпературної дії агресивних середовищ.

Серед методів нанесення покриттів плазмове напилення завдяки своїм технологічним властивостям знаходить найбільш широке застосування. Застосовуючи плазму, можна наносити покриття практично з усіх матеріалів, у тому числі з тугоплавких. Якість покриттів залежить від великої кількості змінних факторів, зокрема таких, як конструкція розпилювача, рід і витрати плазмотвірного газу, величина електричної потужності, грануляція напилюваного матеріалу, швидкість його подачі, відстань від розпилювача до виробу, температурний режим процесу формування покриття.

Сучасні підходи до проблеми підвищення фізико-механічних властивостей металів і сплавів полягають переважно в наданні матеріалам наноструктурного стану [1, 2]. Як відомо, наноструктурними прийнято називати матеріали, основні структурні елементи яких (кристаліти, зерна, шари, волокна, пори) не перевищують 100 нм, принаймні в одному напрямі.

Існує декілька способів отримання покриттів з наноструктурними елементами: напилення наноструктурованих і композиційних порошків з нанокристалічною фазою, формування наноструктурних зміцнюючих елементів при розпаді аморфної фази, створення наноструктурного стану в поверхневому шарі ультразвуковою і комбінованими обробками. Але ці способи мають суттєві недоліки, які пов'язані зі спеціальною трудомісткою підготовкою порошків, потребують модернізації обладнання чи створення нових пристроїв.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У роботах [3–11] запропоновано спосіб підвищення твердості деформованих металів і сплавів та напилених покриттів за рахунок формування субмікроструктурних елементів у процесі полігонізації, який полягає в нагріванні до температури початку первинної рекристалізації деформованого чи напиленого матеріалу покриття або одного з його компонентів, короткочасній витримці (до 10 хв) з наступним охолодженням до температури навколишнього середовища зі швидкістю, яка унеможливлює ріст зерен. Викликає науковий і практичний інтерес дослідження впливу способу плазмового напилення на ефект підвищення міцності покриттів після передрекристалізаційної термічної обробки.

МЕТА РОБОТИ – дослідження впливу способу плазмового напилення покриттів на мікроструктуру та ефект підвищення твердості після передрекристалізаційної термічної обробки.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для формування плазмових покриттів використовували порошки Ni та NiCr фракцією 40…80 мкм, а як плазмотвірний газ – аргон. Напилення проводили на повітрі на установці УПУ-3Д та в динамічному вакуумі на установці УПНКА при тиску близько 10 кПа. Термічну обробку зразків здійснювали в лабораторній електричній печі СНОЛ-1.6.2.0.08/9-М. Твердість вимірювали на приладі типу Віккерс (ДСТУ ISO 6507-4:2008). Металографічні дослідження проводили на мікроскопі ММР-2Р. Зміну субструктури отриманих покриттів оцінювали за розміром областей когерентного розсіювання (ОКР) рентгенівських променів.

Напилювання покриттів із NiCr та Ni плазмовим методом на повітрі здійснювалося при потужності електричного струму 15…18 кВт, дистанція напилювання 200 мм.

Мікроструктури покриттів, які отримані напиленням на повітрі, наведені на рис. 1.

а *б*

Рис. 1. Плазмові покриття, напилені на повітрі (×370): ***а*** – NiCr; ***б*** – Ni

Зображення мікроструктури плазмових покриттів на рис. 1 свідчать, що покриття мають типову лускату мікроструктуру з пористістю не вище 12 %.

Отримані покриття піддавали передрекристалізаційній термообробці при температурі, яка відповідала температурі первинної рекристалізації матеріалу зразка (для NiCr – 500 °С, для Ni – 480 °С). На рис. 2 наведені залежності твердості плазмових покриттів від часу витримки при передрекристалізаційній термічній обробці.

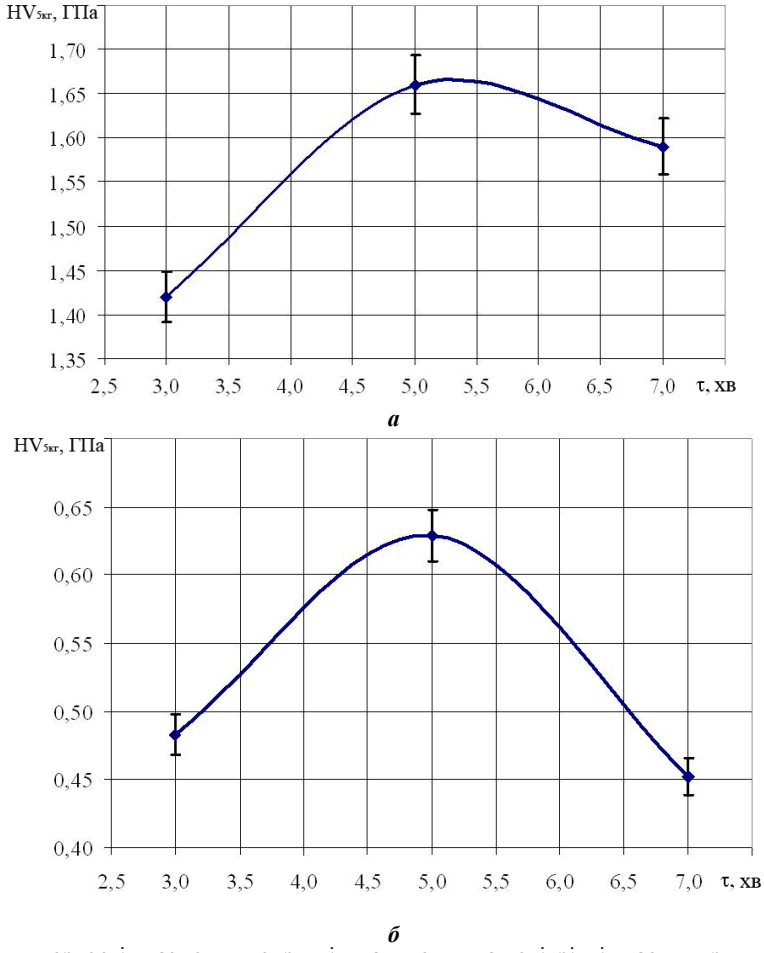
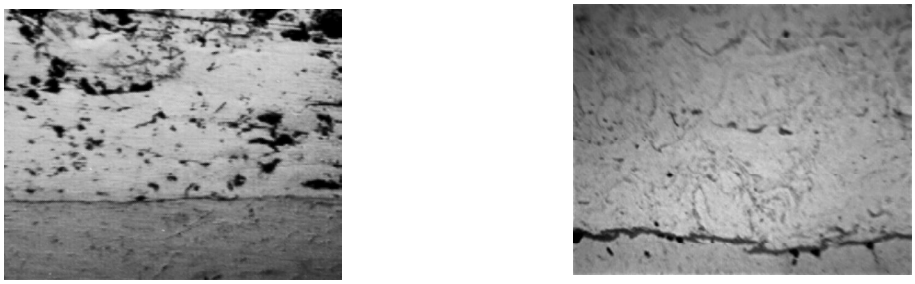


Рис. 2. Залежність твердості плазмових покриттів, напилених на повітрі, від часу витримки при передрекристалізаційній термічній обробці: ***а*** – NiCr; ***б*** – Ni

Залежність твердості покриттів від часу витримки екстремальна з вираженим максимумом. У порівнянні з вихідною твердістю покриттів після напилення на повітрі (NiCr – 1495 МПа, Ni – 577 МПа), максимальна твердість після передрекристалізаційної термообробки підвищилась на 11 та 9 % відповідно, при цьому аналіз мікроструктури на оптичному мікроскопі не виявив змін після передрекристалізаційної термічної обробки. Це може свідчити про те, що зміцнюючий ефект забезпечують структурні елементи розміром менше 1 мкм.

Напилення покриттів у динамічному вакуумі здійснювалося за такими параметрами: дистанція напилювання 730 мм, сила струму 275 А, напруга 65 В.

Мікроструктури покриттів, що були отримані напилюванням у динамічному вакуумі, наведені на рис. 3.

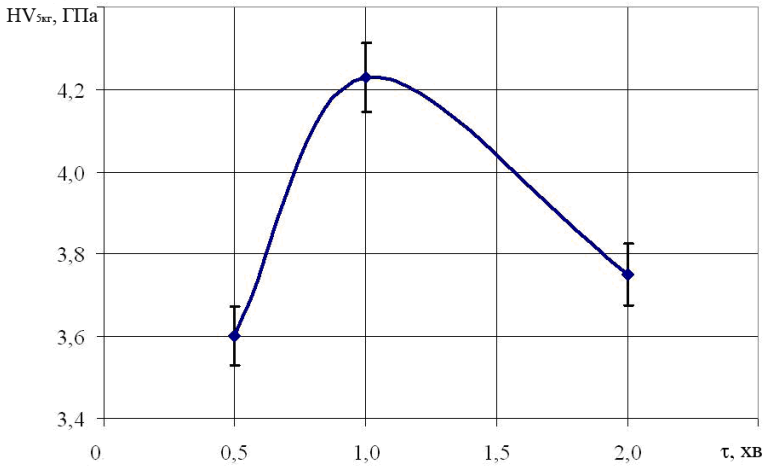


а *б*

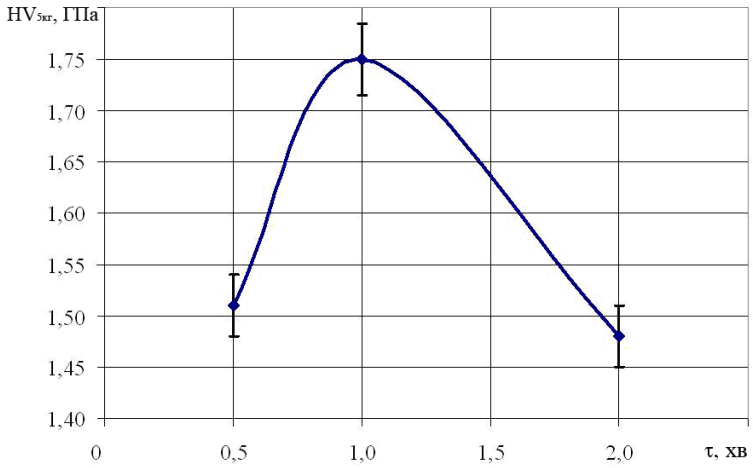
Рис. 3. Плазмові покриття, напилені в динамічному вакуумі (×370): ***а*** – NiCr; ***б*** – Ni

Зображення мікроструктури плазмових покриттів, напилених у динамічному вакуумі, свідчать про майже відсутню лускатість та пористість близько 6 %.

Отримані в динамічному вакуумі покриття піддавали передрекристалізаційній термообробці при тих же температурах, що і покриття, напилені на повітрі (рис. 4).



а



б

Рис. 4. Залежність твердості плазмових покриттів, напилених у вакуумі, від часу витримки при передрекристалізаційній термічній обробці: ***а*** – NiCr; ***б*** – Ni

У порівнянні з вихідною твердістю після напилення в динамічному вакуумі (NiCr – 3203 МПа, Ni – 1372 МПа), твердість покриттів після передрекристалізаційної термообробки (ТО) підвищилась на 22 та 17 % відповідно, при цьому мікроструктура не змінилася.

Визначення розмірів областей когерентного розсіювання проводилося на дифрактометрі ДРОН-3 у випромінюванні Cu_{K_α} з довжиною хвилі $\lambda_{ср} = 0{,}154178$ нм методом апроксимації [6]. Результати вимірювань та розрахунків наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Матеріали покриття	Спосіб плазмового напилення	Приріст твердості, %	Розмір ОКР, нм
NiCr	На повітрі	–	283
	У вакуумі	–	340
	На повітрі + ТО	8	230
	У вакуумі + ТО	32	216
Ni	На повітрі	–	321
	У вакуумі	–	453
	На повітрі + ТО	3	297
	У вакуумі + ТО	17	251

Наведені результати досліджень, а також аналіз розмірів ОКР свідчать про те, що передрекристалізаційна термічна обробка приводить до підвищення твердості за рахунок здрібнення субструктури.

У плазмових покриттів, напилених у вакуумі, твердість вища, ніж у напилених на повітрі. Це пояснюється, ймовірно, більшою швидкістю, а отже і більшою деформацією частинок при напиленні в динамічному вакуумі.

Для підтвердження цього експериментально визначали швидкість частинок за допомогою цифрового фотоапарата фірми Canon марки SX40HS.

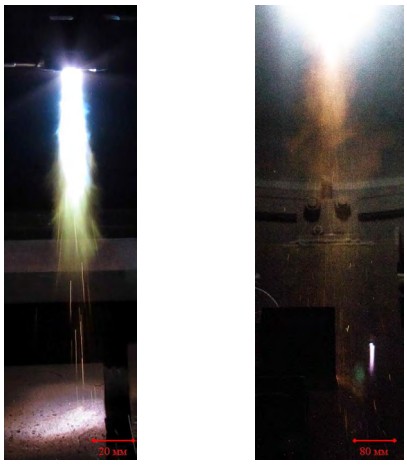
Проведено розрахунок швидкості частинок порошку NiCr фракції 40…80 мкм, напиленого на повітрі при потужності електричного струму 15 кВт з дистанції 200 мм.

Фотографії двофазного струменя (рис. 5) зроблені при експозиції 0,00025 с.

Відповідно швидкість частинок обчислювалася як відношення шляху, який пролетіла частинка (довжина треку, м), до часу, за який цей шлях пройдено (час експозиції, с). Довжину треків визначали за допомогою програмного комплексу AutoCAD 2006 методом масштабування 1:1.

Середня підлітна швидкість частинок для покриття з NiCr, напиленого на повітрі, складала 94,8 м/с.

Покриття з NiCr у динамічному вакуумі напилювалось при силі електричного струму 275 А та напрузі 65 В на дистанції напилення 700 мм. При напиленні в динамічному вакуумі вісь потоку розгледіти майже неможливо, тому визначена швидкість частинок на різних зонах двофазного струменя (див. рис. 5,***б***), для цього його розділили вздовж осі на три зони з кроком 150…100 мм та виділили по два треки в кожній зоні. Результати розрахунків наведено в табл. 2.



а ***б***

Рис. 5. Фото плазмового струменя при напиленні порошку NiCr: ***а*** – на повітрі; ***б*** – в динамічному вакуумі

Таблиця 2

Відстань від сопла плазмотрона, мм	Довжина треків, мм	Середня швидкість частинок для кожної зони, м/с
450	82,16 (83,23)	330,80
600	79,60 (82,25)	323,70
700	74,02 (72,81)	293,70

Виходячи з отриманих даних загальна середня швидкість частинок порошку NiCr, напиленого в динамічному вакуумі, на дистанції 700 мм складає 293,7 м/с.

Підлітна швидкість частинок при плазмовому напиленні в динамічному вакуумі значно більша (293,7 м/с), ніж на повітрі (94,8 м/с). Це забезпечує більший ступінь деформації частинок і більший приріст твердості після передрекристалізаційної термічної обробки.

Таким чином, *перспективи подальших досліджень* полягають у детальному вивченні впливу способу плазмового напилення (величини деформації) та наступної передрекристалізаційної термічної обробки на теплопровідність, міцність зчеплення покриття з основою.

ВИСНОВКИ

1. Передрекристалізаційна термічна обробка забезпечує підвищення твердості плазмових покриттів, напилених на повітрі і в динамічному вакуумі, за рахунок здрібнення субструктури.

2. Більш висока твердість покриттів, напилених у динамічному вакуумі, в порівнянні з напиленими на повітрі, після передрекристалізаційної термообробки пояснюється більшою деформацією частинок порошку через їх більш високу швидкість співудару з основою.

3. Визначено середню швидкість частинок порошку NiCr при плазмовому напиленні на повітрі та в динамічному вакуумі методом швидкісної цифрової фотозйомки: 94,8 та 293,7 м/с відповідно.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] **Андриевский, Р. А.** Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р. А. Андриевский // Российский химический журнал. – 2002. – № 5. – С. 50–56.

[2] **Андриевский, Р. А.** Современные проблемы наноструктурного материаловедения [Текст] / Р. А. Андриевский // Наноструктурное материаловедение. – 2005. – № 1. – С. 5–13.

[3] **Борисов, Ю. С.** Плазменные порошковые покрытия [Текст] / Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова. – К. : Техника, 1986. – 144 с.

[4] 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 // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2011. – № 2. – С. 36–44.

[5] **Горелик, С. С.** Рекристаллизация металлов и сплавов [Текст] / С. С. Горелик, С. В. Добаткина, Л. М. Капуткина. – М. : МИССИС, 2005. – 432 с.

[6] **Горелик, С. С.** Рентгенографический и электроннооптический анализ [Текст] / С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. – М. : Металлургия, 1970. – 336 с.

[7] Дослідження можливостей підвищення фізико-механічних властивостей деформованих металів і сплавів термічною обробкою [Текст] / О. М. Дубовий, Н. Ю. Лебедєва, Т. А. Янковець, А. А. Карпеченко, О. О. Жданов // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2010. – № 3(432). – С. 69–78.

[8] **Дубовий, О. М.** Вплив передрекристалізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості напилених покриттів та деформованих металів та сплавів [Текст] / О. М. Дубовий, Н. Ю. Лебедєва, Т. А. Янковець // Металознавство та обробка металів. – 2010. – № 3. – С. 7–10.

[9] **Пат. а 2010 02248 Україна, МІЖ С2Ш 8/00 С22F 1/00.** Спосіб деформаційно-термічної обробки металів та сплавів [Текст] / Дубовий О. М., Янковець Т. А., Лебедєва Н. Ю., Казимиренко Ю. О., Жданов О. О., Бобров М. М. ; заявник та патентовласник Національний університет кораблебудування. – № 95378 ; заявл. 01.03.2010 ; опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14.

[10] **Пат. а 2009 02658 Україна, МПК С23С 4/18.** Спосіб нанесення покриттів [Текст] / Дубовий О. М., Карпеченко А. А., Янковець Т. А., Жданов О. О. ; заявник та патентовласник Національний університет кораблебудування. – № 88755 ; заявл. 23.03.2009 ; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21. – 6 с.

[11] **Пат. и 2009 03877 Україна, МІЖ С23С 4/00.** Спосіб нанесення електродугових покриттів [Текст] / Дубовий О. М., Карпеченко А. А., Янковець Т. А., Жданов О. О. ; заявник та патентовласник Національний університет кораблебудування. – № 43984 ; заявл. 21.03.2009 ; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 17. – 6 с.

© Авторський колектив

Надійшла до редколегії 22.04.13
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. О. М. Дубовий