

УДК 621.795.4
Д 70

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ

О. М. Дубовий, проф., д-р техн. наук;
Т. А. Янковець, аспірантка;
С. І. Шкурат, доц., канд. хім. наук;
О. О. Жданов, інж.

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

Анотація. Установлена можливість підвищення твердості та зниження теплопровідності напилених покриттів за рахунок додаткової термічної обробки. Вибрані оптимальні режими термообробки, в результаті якої твердість покриттів підвищується на 30...70 %, а теплопровідність знижується на 30 %.

Ключові слова: напилення покриттів, дисперсна частинка, термічна обробка, розмір зерна, підльотна швидкість, твердість, теплопровідність.

Аннотация. Установлена возможность повышения твердости и снижения теплопроводности напыленных покрытий за счет дополнительной термической обработки. Выбраны оптимальные режимы термообработки, в результате которой твердость покрытий повышается на 30...70 %, а теплопроводность снижается на 30 %.

Ключевые слова: напыление покрытий, дисперсная частица, термическая обработка, размер зерна, подлетная скорость, твердость, теплопроводность

Abstract. The possibility of increase of hardness and decrease in heat conductivity of the thermal spraying coatings at the expense of additional heat treatment is established. Optimal modes of heat treatment are chosen. After such heat treatment the hardness of coatings increase by 30...70 % and the heat conductivity decrease by 30 %.

Keywords: spraying of coatings, disperse particle, thermal treatment, grain size, approach speed, hardness, thermal conductivity.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Підвищення надійності та ресурсу роботи вузлів і деталей машин є досить актуальною проблемою, яка на сучасному етапі розвитку науки й техніки здебільшого вирішується нанесенням функціональних покриттів методами газотермічного напилення. Технології напилення захисних покриттів різного призначення давно знаходять застосування на сучасних промислових підприємствах, що

виготовляють та ремонтують різні деталі машин і механізмів.

Підвищення міцнісних характеристик, зокрема твердості, можливість зниження теплопровідності покриттів за рахунок структурного фактора, без порушень суцільності та зниження інших механічних властивостей, має велике практичне значення [8, 14, 16, 18–21].

Властивості матеріалів і покриттів з них у значній мірі визначаються структурними

елементами. Основною структурною одиницею покриття є напилювана частинка. Для отримання напиленого покриття з дрібнозернистою структурою (наномасштабними структурними елементами), яка забезпечує високі фізико-механічні властивості, використовують нанорозмірні порошки [8, 14]. Але такі порошки погано подаються до плазмотрона (пальника), тому на їх основі готують суспензії або агломерати [8] з розміром частинок 10...50 або 40...80 мкм.

Існує декілька способів отримання покриттів з наномасштабними елементами у структурі: напилення наноструктурованих та композиційних порошоків з нанокристалічною фазою [8, 14, 15], формування наноструктурних зміцнюючих елементів у процесі розпаду аморфної фази [9, 20, 21]. Проте ці способи мають суттєві недоліки, які пов'язані зі спеціальною ретельною підготовкою порошоків або потребують модернізації обладнання і технології напилення.

МЕТОЮ РОБОТИ є підвищення фізико-механічних властивостей напилених покриттів за рахунок здрібнення зерна за допомогою термічної обробки без формування аморфної фази.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

При плазмовому напиленні покриттів частинки порошку нагріваються до температури плавлення і прискорюються в середньому до 50...200 м/с, у деяких випадках до 300 м/с [7, 10, 11, 13]. Підлітаючи до основи, частинки напилюваного порошку знаходяться у різних агрегатних станах: повністю рідкі, частково розплавлені й тверді. Стикаючись з основою, велика кількість нагрітих (розплавлених або підплавлених) частинок деформується, розтікається і твердіє, утворюючи покриття.

Висока швидкість частинок напилюваного металу призводить до їх значної деформації (близько 80...95 %) під час удару об основу [10]. Як відомо, наприклад [1], великі ступені деформації (більше 70...80 %) призводять до подрібнення зерен через ковзання, яке відбулося на значній відстані. При нагріванні пластично деформованого матеріалу починає протікати процес усунення слідів наклепу,

що складається з двох стадій: повернення та рекристалізації. Повернення проходить при відносно низьких температурах (нижче $0,3T_{пл}$), рекристалізація — при більш високих ($(0,3...0,8)T_{пл}$).

Відомо також [1], що гаряче деформування з високими швидкостями і ступенями деформації з подальшим швидким охолодженням матеріалу нижче від температури рекристалізації зберігає наклеп, а при плазмовому напиленні покриттів швидкість охолодження деформованої частинки може досягати 108 град/с [21]. Така висока швидкість охолодження запобігає протіканню динамічної рекристалізації у матеріалі покриття, а це означає, що при цьому зберігається наклеп.

Враховуючи, що під час напилення покриттів відбувається деформація дисперсних частинок і подрібнення зерен, при наступному нагріванні до температури первинної рекристалізації матеріалу покриття або одного з його компонентів відбувається формування нових більш дрібних зародків завдяки первинній рекристалізації. Через велику щільність дислокацій, значну протяжність границь деформованих зерен утворюється велика кількість зародків нових рекристалізаційних зерен, що призводить до здрібнення зерна у структурі покриття. Зафіксувати момент появи найбільшої кількості центрів первинної рекристалізації можливо при припиненні процесу первинної рекристалізації в момент досягнення зародками розмірів, що забезпечать проявлення розмірного ефекту шляхом достатньо швидкого охолодження матеріалу покриття до температури навколишнього середовища. Швидкість охолодження вибирається такою, що не викликає подальшого росту зерен. Дуже важливо, щоб час витримки був незначним і забезпечував утворення зерен первинної рекристалізації малого розміру [3, 6].

Для напилення експериментальних плазмових покриттів обрано порошки нікелю ПНК-2К10 (ГОСТ 9722–97) та неіржавіючої сталі ПХ18Н15 (ГОСТ 13084–88) фракції 40...80 мкм. Плазмове напилення порошоків проводили на установці «Київ-7», як плазмотворюючий газ використовували повітря.

Відомо, що раціональніше оптимізувати

процеси плазмового напилення покриттів можна за допомогою математичних моделей з розрахунками на ПЕОМ. Узагальнена математична модель двофазного плазмового струменя [4], яка створена на основі математичної моделі плазмового потоку, завантаженого дисперсною фазою [5], дає можливість визначити залежність швидкості частинок порошку від дистанції напилення при різних потужностях процесу.

За допомогою узагальненої математичної моделі двофазного плазмового струменя [4] розраховано оптимальні режими для напилення порошків нікелю ПНК-2К10 та неіржавіючої сталі ПХ18Н15, що забезпечують високу підльотну швидкість частинок. Так, для порошку ПНК-2К10 на дистанції напилення 140 мм оптимальна підльотна швидкість частинок складає 280 м/с, для порошку ПХ18Н15 на дистанції напилення 190 мм — 270 м/с. Для визначення впливу підльотної швидкості частинок на твердість покриття додатково наносили порошок неіржавіючої сталі ПХ18Н15 з підльотною швидкістю частинок 290 м/с.

Для визначення твердості за допомогою твердоміра типу Віккерса (згідно з ДСТУ ISO 6507-1:2007) покриття напилювали на сталеві пластини розмірами 25×60×4,8 мм після знежирення та дробоструминної обробки. Визначення теплопровідності нікелевого покриття проводили за допомогою вимірювача теплопровідності «ИТ-λ-400» на зразках діаметром 15 мм та товщиною 5 мм.

Для підвищення фізико-механічних властивостей покриттів проводили додаткову термічну обробку останніх. Зразки з покриттями нагрівали до температури первинної рекристалізації нікелю, що відповідає $(0,4...0,44)T_{\text{пл}}$ і складає 420...480 °С, та неіржавіючої сталі — $0,7T_{\text{пл}}$ і дорівнює 880 °С, витримували при заданій температурі протягом 0,5...10 хв й охолоджували до температури навколишнього середовища зі швидкістю, яка запобігає подальшому росту зерна (на масивній металевій пластині).

Такий вид термічної обробки дав можливість зафіксувати початок первинної рекристалізації, що характеризується дрібним зерном, за рахунок чого спостерігалось значне

підвищення фізико-механічних властивостей напилених покриттів.

Твердість напиленого покриття з порошку ПНК-2К10 до термічної обробки складала 2,05 ГПа, твердість крупнокристалічного зразка нікелю, що подана в роботі [16], складає 1,4 ГПа. Підвищення твердості напиленого покриття можна пояснити тим, що при напиленні покриттів спостерігається явище наклепу для кожної деформованої частинки. За даними авторів роботи [16] твердість зразків нікелю з розміром кристалітів близько 100 та 10 нм складає 3,0 та 6,5 ГПа відповідно. Твердість напиленого покриття з порошку ПНК-2К10 після термічної обробки при 420 °С і 8 хв витримки складала 2,75 ГПа та при 480 °С і 5 хв витримки — 3,45 ГПа (рис. 1), що на 30...70 % вище від твердості цього покриття до термічної обробки. Ці дані близькі до твердості нікелю з розміром кристалітів близько 100 нм.

Дослідження мікроструктури покриттів на електронному мікроскопі РЭММА-102-02 при збільшенні до 3000 раз показали, що зміни в мікроструктурі не спостерігається. Це свідчить про те, що розмір структурних елементів, які зміцнюють та знижують теплопровідність покриттів, менше за 100 нм. Рентгенофазовий аналіз покриттів до та після термічної обробки, проведений на рентгєнівському дифрактометрі ДРОН-3, показав, що кількість кристалічних фаз у напилених покриттях складає більше 99 %.

З рис. 1 випливає, що підвищення температури термічної обробки напилених покрит-

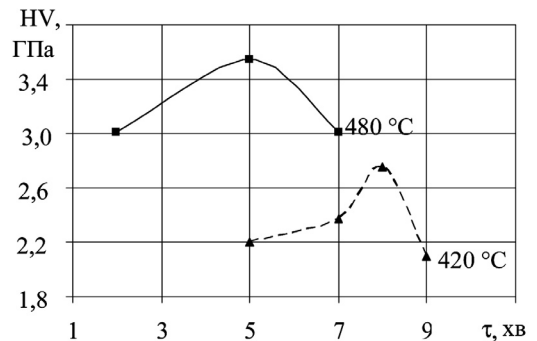


Рис. 1. Залежність твердості нікелевого покриття від температури і часу витримки при термічній обробці

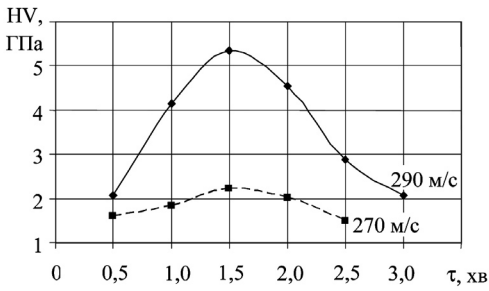


Рис. 2. Залежність твердості покриття з неіржавіючої сталі ПХ18Н15 від часу витримки при термічній обробці та підльотній швидкості частинок

тів призводить до підвищення зміцнюючого ефекту при зменшенні тривалості витримки.

Ефект підвищення твердості проявляється і при термообробці компактного електролітичного нікелю. Так, після термообробки при 480 °С холоднодеформованого металу на 70, 50, 40 % максимальна твердість складала 90, 75 і 65 HRB, твердість після деформації була відповідно 57, 40, 31 HRB.

Твердість напиленого покриття з неіржавіючої сталі ПХ18Н15 до термічної обробки складала 1,58 та 3,63 ГПа при підльотній швидкості частинок 270 та 290 м/с відповідно. Така різниця у значеннях пояснюється тим, що при вищій підльотній швидкості частинок значно збільшується ступінь їх деформації, що приводить до більшої щільності дислокацій, а відповідно і до збільшення твердості в результаті наклепу.

Твердість покриття ПХ18Н15 після термічної обробки підвищилася в середньому на 40 % і її максимальне значення дорівнює 2,1 і 5,3 ГПа для відповідних значень підльотної швидкості частинок, що показано на рис. 2. Оптимальним режимом термічної обробки

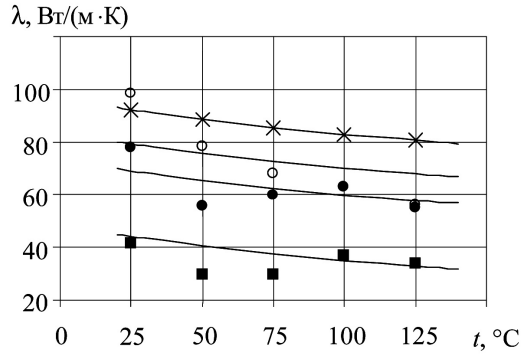


Рис. 3. Залежність коефіцієнта теплопровідності сталевого зразка з нікелевим покриттям від температури випробувань: ○ — без термічної обробки; ■ — після термічної обробки (480 °С, 5 хв); ● — після витримки 35 хв при 480 °С; × — компактний нікель

покриття з порошку ПХ18Н15 є нагрівання зразка до температури 880 °С, витримка протягом 1,5 хв з наступним охолодженням до температури навколишнього середовища.

Аналіз даних, які представлено на рис. 2, показує, що збільшення підльотної швидкості частинок порошку призводить до підвищення зміцнюючого ефекту при однакових параметрах термічної обробки.

Вплив термічної обробки на субструктуру напиленого покриття з ПНК-2К10 оцінювали за зміною розміру областей когерентного розсіювання (ОКР). Розміри ОКР визначали методом рентгенівського аналізу за відомою методикою [2].

Результати досліджень наведені у таблиці. З наведених даних видно, що після оптимальної термічної обробки відбувається зменшення ОКР, збільшення витримки до 35 хв призводить до її збільшення.

Дослідження впливу термічної обробки на коефіцієнт теплопровідності покриттів з нікелю ПНК-2К10 здійснювали за допомогою вимірювача теплопровідності «ИТ-λ-400» на композиційних зразках «скло-покриття» [12,

Параметри субструктури плазмового покриття з нікелю ПНК-2К10 до і після термічної обробки

Вид термічної обробки	Фізичне розширення інтерференцій, град		Розмір ОКР D, нм
	(111)	(311)	
Без термообробки	0,275	0,15	309
480 °С, витримка 5 хв	0,3	0,15	206
480 °С, витримка 35 хв	0,25	0,125	617

17] з урахуванням кореляційного коефіцієнта для нікелю. Вплив термічної обробки на коефіцієнт теплопровідності при різних температурах показано на рис. 3.

Оцінювання коефіцієнта теплопровідності напилених покриттів з порошку нікелю ПНК-2К10 до нагрівання та після термічної обробки, яка привела до значного підвищення твердості (480 °С, 5 хв витримки, приріст твердості склав 70 %), показало зменшення коефіцієнта теплопровідності на 30 %, що значно покращує теплозахисні властивості даного покриття.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено можливість формування зміцнюючих та знижуючих теплопровідність

структурних елементів у напилених покриттях за допомогою термічної обробки без аморфотизації структури. 2. Вибрано оптимальні режими термічної обробки напилених покриттів з нікелю ПНК-2К10 та неіржавіючої сталі ПХ18Н15, які відповідно складають 480 °С — витримка 5 хв і 880 °С — 1,5 хв та забезпечують підвищення твердості на 30...70 % і зниження теплопровідності на 30%. 3. Встановлено, що підвищення температури термічної обробки напилених покриттів призводить до підвищення зміцнюючого ефекту при зменшенні тривалості витримки. Збільшення підльотної швидкості частинок порошку теж призводить до підвищення зміцнюючого ефекту при однакових параметрах термічної обробки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Горелик С.С., Добаткина С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. — 3-е изд. — М.: МИСИС, 2005. — 432 с.
- [2] Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электроннооптический анализ. — Изд. 2-е. — М.: Металлургия, 1970. — 336 с.
- [3] Декларацийний патент на корисну модель № 43984U, Україна, МПК С23С4/00. Спосіб нанесення електродугових покриттів / О.М. Дубовий, А.А. Карпеченко, Т.А. Янковець, О.О. Жданов. — № u200903877; Заявлено 21.04.2009; Опубл. 10.09.2009. Бюл. № 17.
- [4] Дубовий О.М., Янковець Т.А. Математична модель плазмового струменя та її практичне застосування для визначення режимів плазмової обробки металів // Зб. наук. пр. НУК. — 2004. — № 6 (399). — С. 43–50.
- [5] Дубовой А.Н. Математическая модель двухфазной плазменной струи // Автоматическая сварка. — 1999. — № 11. — С. 26–28.
- [6] Заявка на винахід, Україна, 7МПКС23С4/18. Спосіб нанесення покриттів / О.М. Дубовий, Т.А. Янковець, А.А. Карпеченко, О.О. Жданов. — № a200902658; Заявлено 23.03.2009; Рішення про видачу патенту на винахід від 02.09.2009 (Лист № 10157/1 від 03.09.2009).
- [7] Інженерія поверхні: Підручник / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. — К.: Наук. думка, 2007. — 560 с.
- [8] Калита В.И. Физика, химия и механика формирования покрытий, упрочненных наноразмерными фазами // Физика и химия обработки материалов. — 2005. — № 4. — С. 46–57.
- [9] Ковнеристый Ю.К. Объемно-аморфизирующиеся металлические сплавы и наноструктурные материалы на их основе // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2005. — № 7. — С. 14–16.
- [10] Кудинов В.В., Иванов В.М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. — М.: Машиностроение, 1981. — 192 с.
- [11] Максимович Г.Г., Шатинский В.Ф., Копылов В.И. Физико-химические процессы при плазменном напылении материалов с покрытиями. — К.: Наук. думка, 1983. — 264 с.
- [12] Нацокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: Учеб. пособие для энергетических специальностей вузов. — М.: Высшая шк., 1975. — 496 с.

- [13] *Петров С.В., Карп И.Н.* Плазменное газовоздушное напыление. — К.: Наук. думка, 1993. — 495 с.
- [14] Плазменные покрытия с наноразмерным карбонитридом титана / В.И. Калита, А.В. Самохин и др. // Физика и химия обработки материалов. — 2007. — № 2. — С. 37–45.
- [15] Прогресс исследований покрытий из композиционного материала с металлической матрицей, упрочненной наночастицами / Zhang Hui, He Yi-zhu // Anhuigongye daxue xuebao. Zizhan gexue ban: J. Anhui. Univ. Technol. Natur. Sci. — 2006. — 23, № 1. — P. 21–25.
- [16] *Рагуля А.В., Скороход В.В.* Консолидированные наноструктурные материалы. — К.: Наук. думка, 2007. — 376 с.
- [17] *Скороход В.В.* Слоистые композиты: структурная классификация, теплофизические и механические свойства // Порошковая металлургия. — 2003. — № 9/10. — С. 1–12.
- [18] *Скороход В.В., Уварова І.В., Рагуля А.В.* Фізико-хімічна кінетика в наноструктурних системах. — К.: Академперіодика, 2001. — 180 с.
- [19] *Суздалев И.П.* Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. — М.: КомКнига, 2006. — 529 с.
- [20] Формирование наноразмерных упрочняющих фаз в плазменных покрытиях из сталей, чугунов и сплавов на основе железа / В.И. Калита, В.В. Яркин, А.В. Касимцев, Г.У. Лубман // Физика и химия обработки материалов. — 2006. — № 5. — С. 29–40.