

ФОРМУВАННЯ НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ ЗІ ЗДРІБНЕНОЮ ТА НАНОРОЗМІРНОЮ ПОЛІГОНІЗАЦІЙНОЮ СУБСТРУКТУРОЮ

Д.т.н., проф. О.М. Дубовий, к.т.н., доц. А.А. Карпеченко, к.т.н. М.М. Бобров,
Ю.Є. Неделько

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

E-mail: oleksandr.dubovyj@nuos.edu.ua

У роботі проведено експериментальні дослідження щодо формування покриттів з полігонізаційною субструктурою за рахунок електроімпульсної дії та передрекristалізаційної термічної обробки. Показано можливість збільшення часу витримки покриттів при передрекristалізаційній термічній обробці без суттєвого зменшення їх твердості за рахунок наступної деформації.

Поставка проблеми. В останні роки значного поширення набули процеси напилення багатофункціональних покриттів, які надають можливість суттєво скоротити витрати дефіцитних матеріалів, підвищити якість та надійність машин, обладнання тощо. Подальше підвищення функціональних властивостей напилених покриттів наноструктуруванням має значне народногосподарче значення.

Аналіз останніх досліджень. Існує декілька способів отримання покриттів з наноструктурними елементами: напилення нанокристаличних і композиційних порошків з нанокристаличною фазою [1], формування наноструктурних зміцнюючих елементів при розпаді аморфної фази [2], створення нанокристаличного стану в поверхневому шарі ультразвуковою і комбінованими обробками [3]. Але ці способи мають суттєві недоліки, які пов'язані зі спеціальною трудомісткою підготовкою порошків, потребують модернізації обладнання чи створення нових пристроїв. Розроблено спосіб деформаційно-термічної обробки (передрекristалізаційна термічна обробка) напилених покриттів [4], що забезпечує підвищення твердості на 30 ... 70 % та зниження теплопровідності на 30 %. Спосіб полягає у формуванні полігональної субструктури шляхом нагрівання покриттів до температури початку первинної рекristалізації з короткочасною (до 10 хвилин) витримкою та наступного охолодження до температури навколишнього середовища зі швидкістю, яка унеможливорює ріст субзерен. Також запропоновано використання електроімпульсної дії при електродуговому та плазмовому напиленні [5, 6], що забезпечує отримання покриттів з комплексом підвищених фізико-механічних властивостей за рахунок здрібнення та прискорення частинок дисперсної фази на дистанції напилення.

Мета роботи – експериментальне встановлення закономірностей формування здрібненої та нанорозмірної полігонізаційної субструктури напилених покриттях з високими фізико-механічними властивостями електроімпульсною дією та передрекristалізаційною термічною обробкою.

Методика досліджень. Плазмові покриття наносили на установці «Київ-7», що укомплектована плазмотроном ПУН-1. Як плазмотвірний та транспортуючий газ використовували стиснене повітря. Електродугові покриття наносили за допомогою установки КДМ-2, у комплект якої входить електродуговий розпилювач ЕМ-14М. Електричні імпульси накладали на дистанції напилення за допомогою RC-генератора. Режими електроімпульсної дії та напилення покриттів наведені у роботі [7].

Передрекristалізаційну термічну обробку виконували в електричній печі СНОЛ-1.6.2.0.08/9-М1. Охолодження зразків здійснювали зі швидкістю не менше 5 °C/с.

Твердість визначали згідно з ДСТУ ISO 6507-4:2008 на приладі типу Віккерс при навантаженні на індентор 5 кг. Аналіз мікроструктури проводили на металографічному мікроскопі ММР-2Р. Визначення розмірів областей когерентного розсіювання (ОКР)

рентгенівського випромінювання виконували методами рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі ДРОН-3 у випромінюванні $\text{Cu}_{K\alpha}$.

Виклад основного матеріалу. Відомо, що при напилюванні покриттів відбувається інтенсивна пластична деформація частинок внаслідок їх високої швидкості і співудару з підкладкою (в реальних процесах плазмового напилювання до 300 м/с). При цьому величина деформації може складати 90 – 95%, а швидкість охолодження деформованої частинки досягає 10^8 °C/с [8], що запобігає протіканню динамічної рекристалізації у матеріалі покриття. При використанні електроімпульсної дії при напиленні спостерігається підвищення швидкості частинок дисперсної фази на 20 ... 25 % та, як наслідок, величини їх деформації [7].

Тому для подальшого підвищення фізико-механічних властивостей отриманих покриттів, напилених з використанням електроімпульсної дії встановлено оптимальні режими їх передрекристалізаційної термічної обробки, які визначалися за показниками твердості при різній тривалості витримки зразків [4] (рис. 1).

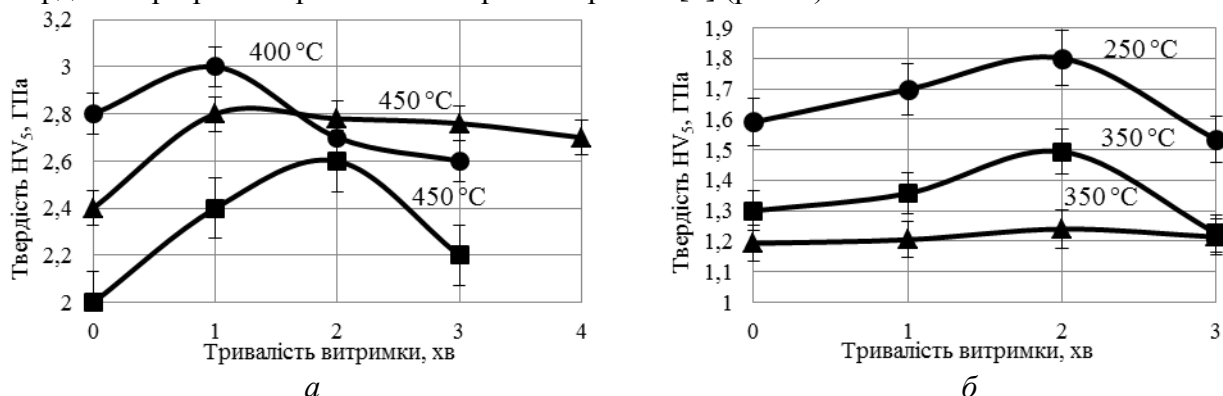


Рис.1. Залежність твердості електродугових покриттів з дроту Св-08Г2С (а) та плазмових покриттів з ПГ-19М-01(б) від тривалості витримки при передрекристалізаційній термічній обробці: ■ – нанесених за традиційною технологією; ▲, ● – з використанням електроімпульсної дії

Згідно з представленими даними встановлено, що залежність носить екстремальний характер з виразним максимумом, при цьому відповідну температуру і витримку можна вважати оптимальними. Зменшення твердості при підвищенні тривалості витримки пояснюється збільшенням розміру субзерен через збільшення рухливості субмеж.

Значення твердості електродугових покриттів підвищуються після передрекристалізаційної термічної обробки при температурі 450 °C і витримці 2 хв для покриття, нанесеного за традиційною технологією з 2 ГПа до 2,6 ГПа. Для покриття, нанесеного з використанням електроімпульсної дії, оптимальною є витримка 1 хв при температурі 400 °C при цьому значення твердості підвищується з 2,7 ГПа до 3 ГПа, тобто ще на 12%, а у порівнянні з покриттями, напиленими за традиційною технологією – на 50 %.

Аналогічна залежність спостерігається і для плазмових покриттів (рис. 1 б). Оптимальний режим передрекристалізаційної термічної обробки для плазмового покриття з порошку ПГ-19М-01, нанесеного за традиційною технологією, полягає у нагріванні до температури 350 °C і витримці протягом 2 хв та забезпечує підвищення твердості з 1,3 ГПа до 1,5 ГПа. Для покриття, напиленого із застосуванням електроімпульсної дії, оптимальний режим термічної обробки також зміщується в область більш низьких температур і полягає у нагріванні до 250 °C і витримці протягом 2 хв. При цьому твердість збільшується з 1,6 ГПа до 1,8 ГПа, тобто ще на 13%, а у порівнянні з покриттями, напиленими за традиційною технологією – на 38 %. Таким чином, можна зробити висновок, що для покриттів, напилених із застосуванням електроімпульсної дії, оптимальний режим передрекристалізаційної термічної обробки зміщується у діапазон менших температур і витримок. Це пояснюється більш високим ступенем деформації частинок при формуванні покриттів за рахунок їх підвищеної швидкості. Аналіз мікроструктур на оптичному металографічному мікроскопі показав, що змін у структурі покриттів до і після

термообробки не спостерігається. Це свідчить про те, що зміцнювальний ефект забезпечують структурні елементи, розмір яких менший за 0,5 мкм, що пояснюється роздільною здатністю людського ока та оптичного мікроскопа. Тому для кількісної оцінки впливу передрекristалізаційної термічної обробки на субструктуру покриттів провели визначення розмірів ОКР рентгенівського випромінювання, які ототожнюють з середнім розміром субзерен (табл. 1). Дослідження проводили для електродугових покриттів з дроту Св-08Г2С, оскільки саме для них виявлений значніший зміцнювальний ефект.

Таблиця 1

Розмір ОКР рентгенівського випромінювання електродугових покриттів з Св-08Г2С

Технологія наплення та величина деформації частинок	Термообробка	Розмір ОКР, нм
За традиційною технологією. Деформація 83%.	Без т.о.	>200
	450 °С, 2хв	106
З використанням електроімпульсної дії. Деформація 87%.	Без т.о.	>200
	400 °С, 1 хв	87

Згідно з приведеними даними при використанні електроімпульсної дії на гетерофазний високотемпературний струмінь у процесі наплення спостерігається зменшення ОКР рентгенівського випромінювання, що пояснюється здрібненням субструктури покриттів. Після подальшої передрекristалізаційної термічної обробки, вище названих покриттів, ОКР мають значно менші значення у порівнянні з термообробленими покриттями, отриманими за традиційною технологією. Так, ОКР електродугового покриття зменшується з 106 нм до 87 нм. Таким чином, аналіз отриманих даних дає підстави стверджувати, що проведення передрекristалізаційної термічної обробки дозволяє отримувати субзеренну структуру наномасштабного розміру. Пояснюється це тим, що після проведення термічної обробки покриттів, наплених з використанням електроімпульсної дії, формуються субзерна меншого розміру за рахунок більшого ступеня деформації частинок. З практичної точки зору основним недоліком передрекristалізаційної термічної обробки є невелика тривалість витримки у декілька хвилин, тому актуальним являється дослідження можливості стабілізації здрібненої полігонізаційної субструктури напленого покриття при більш тривалій витримці у процесі термічної обробки за рахунок наступної деформації. З метою гальмування руху дислокаційних субграниць у процесі збиральної полігонізації, який проявляється при нагріванні (тривалій витримці) здійснювали додаткове деформування покриття двома способами: пресуванням на гідравлічному пресі при навантаженні 10 т (ступінь деформації 30%) та 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 рекристалізації знижується [9]. Результати наведені на рис. 2.

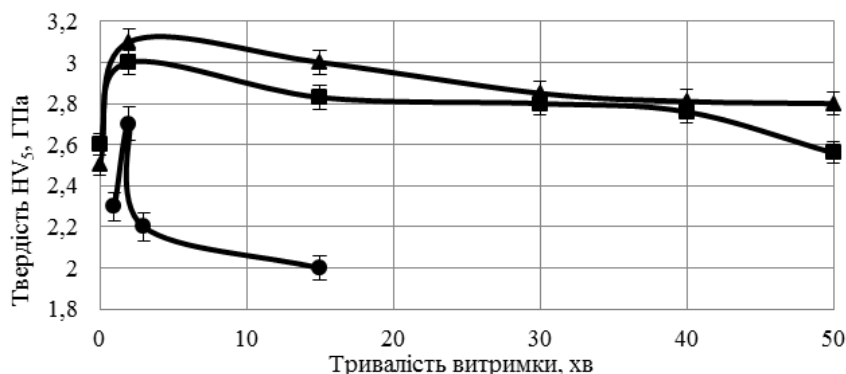


Рис. 2. Залежність твердості електродугових покриттів з дроту Св-08Г2С від тривалості витримки та виду наступної деформації: ● – без додаткової деформації (температура 450 °С); ■ – ППД; ▲ – пресування

Аналіз наведених даних показує, що використання наступної деформації покриттів забезпечує менше зниження твердості при підвищенні тривалості витримки при передрекристалізаційній 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 та пресування відповідно. Взагалі, достатньо високі значення твердості забезпечується при витримці до 40 хв для ППД, а для пресування навіть 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 субграниць, чим знижується швидкість полігонізаційних процесів і забезпечується стабілізуючий ефект.

Висновки. Визначені оптимальні режими передрекристалізаційної термічної обробки електродугового із дроту Св-08Г2С та плазмового з порошку ПГ-19М-01 покриттів, напилених з використанням електроімпульсної дії, що забезпечують підвищення твердості у середньому на 15 % у порівнянні з аналогічно термообробленими покриттями, нанесеними за традиційною технологією, за рахунок формування субзерен наномасштабного розміру. Встановлено, що проведення наступної деформації (ППД та пресуванням) електродугових покриттів дозволяє збільшити час витримки при передрекристалізаційній термічній обробці (до 15...40 хв) без суттєвого зменшення твердості, що забезпечується здрібненою субструктурою, за рахунок зниження рухливості малокутових полігонізаційних субграниць. Це дозволить розширити промислове застосування передрекристалізаційної термічної обробки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Калита, В. И. Физика, химия и механика формирования покрытий, упрочненных наноразмерными фазами / В. И. Калита // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 4. – С. 46 – 57.
2. Куракова, Н. В. Формирование плазменных покрытий с нано и аморфной структурой / Н. В. Куракова, В. В. Молоканов, В. И. Калита, Д. И. Комлев, П. П. Умпов // Физика и химия обработки материалов. – 2007. – № 4. – С. 36–39.
3. Воронов, А. В. Создание наноструктурных состояний в поверхностных слоях комбинированным методом ионной имплантации – магнетронного распыления – ультразвуковой обработки / А. В. Воронов // Физическая мезомеханика. – 2005. – № 8. – С. 113–116.
4. Пат. 88755 Україна, МПК С 23 С 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.
5. Пат. 107988 Україна, МПК (2015.01) С23С 4/00 Спосіб електродугового напилення покриття / Дубовий О.М., Карпеченко А.А., Овсянников В.М., Бобров М.М.: заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. – № 107988; заявл. 22.04.2013; опубл. 10.03.2015, бюл. № 5.
6. Пат. 111031 Україна, МПК (2015.01) С23С 4/00 Спосіб плазмового напилення / Дубовий О.М., Карпеченко А.А., Бобров М.М.: заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. – № 111031; заявл. 30.12.2014; опубл. 10.03.2016, бюл. № 5.
7. Дубовой А.Н. Повышение эксплуатационных свойств электродуговых и плазменных покрытий электроимпульсным воздействием на двухфазный высокотемпературный поток / А.Н. Дубовой, А.А. Карпеченко, М.Н. Бобров // Автоматическая сварка. – 2014. – № 8 (734). – С. 39–43.
8. Петров, С.В. Плазменное газозоодушное напыление / С. В. Петров, И.Н. Карп // – К: Наукова думка, 1993. – 493 с.
9. Горелик, С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С. С. Горелик, С. В. Добаткина, Л. М. Капуткина // – 3-е изд. – М.: МИССИС, 2005. – 432 с.