

УДК 621.793.7

doi:10.20998/2413-4295.2019.10.01

ФОРМУВАННЯ ТЕРМІЧНОСТІЙКОЇ ПОЛІГОНІЗАЦІЙНОЇ СУБСТРУКТУРИ З ПІДВИЩЕНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ В ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТЯХ

О. М. ДУБОВИЙ¹, А. А. КАРПЕЧЕНКО¹, М. М. БОБРОВ¹, С. І. ШКУРАТ¹, О. О. ЛИМАР²

¹кафедра матеріалознавства і технології металів, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, УКРАЇНА

²кафедра тракторів та сільськогосподарських машин, експлуатації і технічного сервісу, Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв, УКРАЇНА
e-mail: laborantmtm@gmail.com

АНОТАЦІЯ У роботі досліджено можливість формування електродугових сталевих покриттів з дротів марок 65Г та Св-08Г2С з частково термічно стабілізованою полігонізаційною субструктурою за рахунок додаткової деформації та термічної обробки. Встановлено, що додаткова деформація пресуванням на 25% та 30% електродугових сталевих покриттів з дроту 65Г та 20% і 30% покриттів з дроту Св-08Г2С надає можливість підвищити тривалість витримки при термічній обробці до 15...20 хв без суттєвого зниження твердості за рахунок формування субструктури з підвищеною термічною стійкістю. Методом рентгеноструктурного аналізу розраховано середній розмір субзерен, кут їх розорієнтування та середню кількість наноструктурних елементів у напилених покриттях. Показано, що середній розмір субзерен електродугових покриттів зменшується при деформуванні, що зумовлює стабілізацію субструктури, на 40...45% у порівнянні з покриттями після напилення. Крім того, при проведенні термічної обробки і додаткової деформації забезпечується збільшення кількості наноструктурних елементів з 18 до 32...35% та підвищується середній кут розорієнтування субзерен. Досліджено вплив поверхневої пластичної деформації методом дробоструменевої обробки на можливість формування термічно стійкої полігонізаційної субструктури у покриттях з дроту 65Г. Встановлені оптимальні температуро-часові параметри термічної обробки вказаних покриттів за показниками мікротвердості по глибині наклепаного шару. Дробоструменева обробка забезпечує стабілізацію полігонізаційної субструктури при термічній обробці до тривалості витримки 40 хвилин. Проведено експериментальні дослідження впливу термічної обробки, поверхневої пластичної деформації та комбінованої деформаційно-термічної обробки на міцність та зносостійкість електродугових покриттів з дроту 65Г. Встановлено, що проведення термічної обробки покриттів з дроту 65Г забезпечує підвищення міцності зчеплення на 30% у порівнянні з покриттями після напилення за рахунок зменшення внутрішніх напружень. Термічна обробка додатково деформованих покриттів забезпечує значніше підвищення міцності зчеплення у порівнянні з термообробленими покриттями без деформації. Показано, що термічна обробка забезпечує підвищення зносостійкості покриттів із 65Г на 45% у порівнянні зі станом після напилення.

Ключові слова: газотермічне покриття; термічна обробка; субструктура; твердість; полігонізація; деформація

FORMATION OF A THERMALLY SUSTAINABLE POLYGONIZATION SUBSTRUCTURE WITH ENHANCED PROPERTIES IN ELECTRIC ARC COATINGS

O. DUBOVYI¹, A. KARPECHENKO¹, M. BOBROV¹, S. SHKURAT¹, O. LYMAR²

¹ Department of Material Science and technology of metals, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, UKRAINE

² Department of tractors and agricultural machinery, operation and technical service, Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv, UKRAINE

ABSTRACT The paper studies the possibility of forming electric arc steel sprayed coating from wires of grades 65G and Sv-08G2C with a partially thermally stabilized polygonal substructure due to additional deformation and heat treatment. It has been established that additional deformation by pressing 25% and 30% of electric arc steel coating from wire 65G and 20% and 30% of coatings from wire Sv-08G2S provides an opportunity to increase the duration of exposure of heat treatment for 15 ... 20 minutes without significant reduction of hardness due to the formation of partially stabilized substructure. The method of X-ray diffraction analysis has calculated the average size of sub-grains, the angle of divergence between them and the number of nanostructured elements in sprayed coatings. It has been shown that the average size of subgrains of electric arc coatings decreases with deformation and stabilization of the substructure by 40 ... 45% in comparison with coatings after spraying. Also, when carrying out the heat treatment and additional deformation, an increase in the number of nanostructured elements from 18% to 32 ... 35% is ensured and the average angle of subgrains divergence increases. The influence of surface plastic deformation by shot blasting processing on the possibility of forming a stable polygonization substructure in the coatings of 65G wire has been investigated. Shot blasting provides stabilization of the polygonal substructure during heat treatment to the duration of exposure 40 minutes. Experimental investigations of the influence of heat treatment, surface plastic deformation and combined deformation-heat treatment on the bond strength and wear resistance of the electric arc steel coatings from wire 65G have been carried out. It has been established that carrying out heat treatment of 65G wire coatings provides an increase in the bond strength by 30% compared to the coatings after deposition by reducing internal stresses. Heat treatment of additionally deformed coatings provides a significant increase in bond strength

compared to heat treated coatings without deformation. It is shown that heat treatment provides an increase in the wear resistance of coatings from 65G by 45% compared with the state after spraying.

Keywords: thermal sprayed coating; heat treatment; substructure; hardness; polygonization; deformation

Вступ

Захист деталей машин і конструкцій від корозії і зношування, підвищення довговічності машин і механізмів – одна з найважливіших технічних проблем. Щорічно суднобудівні та судноремонтні підприємства витрачають більше 40% всього споживаного металу на виготовлення запасних деталей різних вузлів тертя, в металобрухт здаються деталі при зносі сполучних поверхонь 0,5...2,0 мм і втрати маси лише 3%. Перспективним напрямком підвищення терміну служби виробів є формування поверхневого шару, що контактує із зовнішнім середовищем, з підвищеними експлуатаційними властивостями. Найбільш ефективне і сучасне рішення цієї проблеми – використання газотермічних захисних та відновлювальних покриттів з комплексом підвищених фізико-механічних та експлуатаційних властивостей. Про це свідчить узагальнений аналіз даних, виконаний консалтинговою компанією Grand View Research Inc. у 2018 році, який показав, що річний обсяг світового ринку газотермічних покриттів у 2017 році оцінювався в 8,92 млрд. доларів США. Прогноз на період з 2018 по 2025 рік, показує поступове збільшення даних показників в середньому на 6,7 % щорічно. Крім того рушійною силою збільшення об'єму використання покриттів стануть саме переваги, що пов'язані з захистом від корозії, зносу та екологічності [1].

Приріст міцнісних властивостей компактних конструкційних металевих матеріалів в останні роки забезпечується в основному за рахунок цілеспрямованого формування здрібненої мікро- і нанокристалічної структури. Основним методом створення таких матеріалів є інтенсивна пластична деформація (ПД) [2]. Однак, наноструктурування деталей великого розміру методами ПД викликає значні технічні та технологічні труднощі і не є економічно доцільним. Основна частина цих методів не доведена до практичного застосування, тому більш перспективним є створення наноструктурованих покриттів. Щодо формування покриттів та шарів зі здрібненою мікро- та субструктурою, то для цього застосовують багато способів, таких як: напилення агломерованих порошків [3] та суспензій [4], формування наноструктурних зміцнюючих елементів при розпаді аморфної фази [5], використання нанопорошків при наплавці [6]. Але всі ці способи мають суттєві недоліки, які пов'язані зі спеціальною трудомісткою підготовкою порошків, потребують значної модернізації обладнання чи створення нових пристроїв. Окрему ланку складають способи, направлені на створення композиційних покриттів за рахунок застосування металічних матеріалів та недорогих наповнювачів (скло, полімер, кераміка та ін.) [7]. Однак, на практиці реалізовано нанесення

таких покриттів плазмовим [8] або детонаційним методом [9], що характеризуються високою вартістю за рахунок значної потужності розпилювачів та використання дорогих плазмотвірних і горючих газів та синтезованих порошків. Щодо електродугового методу напилення, який майже в 10 разів дешевше та в 3-5 разів продуктивніше, то гетерофазну композиційну структуру можна отримати лише шляхом застосування порошкових струмопровідних дротів [10], що теж значно підвищує вартість покриття, при цьому вони мають порівняно низьку міцність та високу пористість. Автори роботи [11] пропонують використання порошкового матеріалу, який подається у вільному вигляді у високотемпературну зону електродугового розпилювача за рахунок атмосферної інжекції, що дозволило значно розширити можливості даного методу шляхом отримання композиційних покриттів.

Альтернативний шлях полягає у застосуванні передрекристалізаційної термічної обробки (ПТО) напилених покриттів, що дозволяє підвищити їх фізико-механічні властивості за рахунок отримання здрібненої і нанорозмірної полігонізаційної субструктури [12,13]. Попередніми дослідженнями встановлено, що ПТО напилених покриттів дозволяє підвищити межу міцності, твердість, міцність втоми, демпфувальні властивості та знизити теплопровідність з одночасним незначним підвищенням пластичності. Але цей спосіб підвищення фізико-механічних властивостей має недолік – час витримки при температурі, яка відповідає або дещо нижче температурного порогу первинної рекристалізації, складає не більше 10 хв, що позбавляє можливості обробляти великогабаритні масивні деталі. Для вирішення цієї проблеми пропонується використання додаткової деформації після напилення.

Мета роботи

Метою статті є підвищення властивостей електродугових покриттів формуванням термічностійкої субструктури.

Виклад основного матеріалу

Електродугові покриття наносили за допомогою установки КДМ-2 в комплект якої входить металізатор ЕМ-14М. Як напилюваний матеріал використовували дроти марок Св-08Г2С та 65Г діаметром 1,2 мм. Оптимальні режими напилення встановлено у попередніх роботах [12,13].

Термічну обробку зразків проводили в лабораторній електричній пічці СНОЛ-1.6.2.0.08/9-М1. Вимірювання твердості за Віккерсом проводили з використанням твердоміру типу ТП. Деформацію зразків здійснювали за допомогою пресу Losen

Hausenwerk Dusseldorfer Maschinenbau A.G. Для пресування розраховувалась необхідна товщина покриття, яку необхідно отримати в результаті деформації. Рентгеноструктурний аналіз проводили на дифрактометрі ДРОН-3 у випромінюванні міді ($\lambda=0,154$ нм) з використанням Ni β -фільтра. Обертання зразків здійснювалось в інтервалі подвійних кутів від 18 до 23°, швидкість розгортки складала 1 град/хв. Розмір ОКР розраховували за формулою Шеррера.

Міцність зчеплення покриттів визначали шляхом витягування конусного штифта з бобишки із записом зміни зусилля, після відриву штифта від покриття визначали відношення максимального навантаження до площі торця штифта. Для розтягування зразків використовували розривну машину УММ-5. Зразки для визначення міцності зчеплення виготовляли з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45.

Визначення зносостійкості проводили на машині тертя СМЦ-2 за схемою «диск-колодка». Колодку і диск виготовляли з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45. Покриття наносили на колодку.

Обговорення результатів

Твердість покриття з дроту 65Г після напilenня – 2,8 ГПа. Деформовані покриття на 25% і 30% піддавались ПТО за температури 400 °С при різних значеннях тривалості витримки. Температура обиралася згідно результатів попередніх досліджень [12,13]. Результати досліджень наведені на рис. 1.

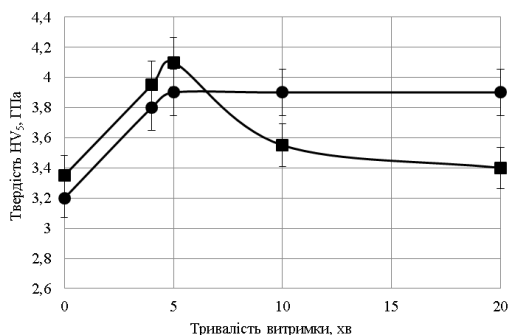


Рис. 1 - Залежність твердості додатково деформованих електродугових покриттів з дроту 65Г від тривалості витримки при ПТО та ступеня деформації:
■ – 25%; ● – 30%

Згідно до наведених даних, залежність носить екстремальний характер. Покриття із величиною деформації 25% досягає максимальної твердості 4,12 ГПа при витримці 5 хв, проте збільшення часу призводить до зменшення показників твердості. Покриття із величиною деформації 30% при аналогічній витримці має максимальну твердість – 3,91 ГПа. Подальша витримка до 20 хвилин не призводить до суттєвого зменшення приросту

твердості. Ймовірно, що у електродугових покриттях, деформованих на 25%, дислокаційні сплетіння утворились недостатньо стійкими, що зумовили прояв збиральної полігонізації субструктури. В той же час деформація пресуванням величиною 30% забезпечила термічну стійкість субструктури впродовж витримки 20 хвилин.

Подальші дослідження проводили на електродугових покриттях з дроту Св-08Г2С. Деформацію здійснювали обкатуванням на діючій моделі прокатного стану. Товщина покриттів складала 1,0...1,2 мм. Твердість покриття після напilenня – 2,7 ГПа; після прокатки на 30% - 2,9 ГПа. Температура ПТО складала 400 °С. Результати досліджень наведені на рис. 2.

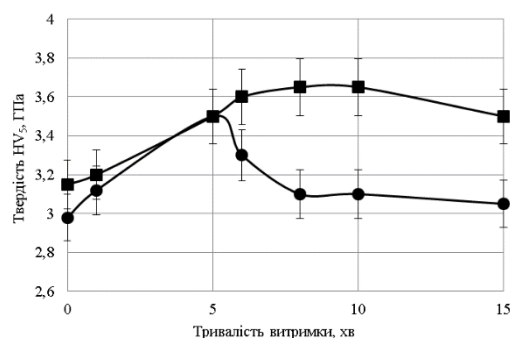


Рис. 2 - Залежність твердості додатково деформованих електродугових покриттів з дроту Св-08Г2С від тривалості витримки при ПТО та ступеня деформації:
■ – 20%; ● – 30%

Згідно даних, наведених на рис. 2, при проведенні ПТО максимальна твердість досягається при витримці 5 та 8 хвилин для ступеня деформації 30% і 20% відповідно. При цьому твердість покриття, деформованого на 20% є більш термічно стабільною, про це свідчить незначне зниження показника при витримці до 15 хв. На рис. 3-4 наведено інформацію щодо приросту твердості електродугових покриттів з дротів 65Г та Св-08Г2С у порівнянні з показниками після напilenня (без додаткової деформації та ПТО) у залежності від величини деформації та часу витримки.

Відповідно до наведених даних, максимальна твердість забезпечується при витримці 5 хв. Більший приріст твердості спостерігається при деформації на 25% - 47%, проте зі збільшенням часу витримки показники падають до 20% для покриття з дроту 65Г. Цей результат пояснюється утворенням при додатковій деформації дислокаційних сплетінь, що сповільнюють рух малокутових субграниць при нагріванні. Ймовірно, деформація величиною 25% не забезпечує достатньої термічної стабільності субструктури через недостатній рівень ущільнення дислокаційних сплетінь. Тому ПТО зумовлює підвищення твердості за короткий час із подальшою збиральною полігонізацією. Пресування на 30% є оптимальним видом деформування виробів для

підвищення термічної стійкості субструктури. Аналіз даних, представлених на рис. 4, показує, що максимальний приріст твердості спостерігається при витримці 5 хвилин деформованого на 30% покриття – 29,6%. Проте зразок, деформований на 20% досягає максимального приросту твердості на 29,2% при витримці 8 хвилин. При деформації на 30% та збільшенні тривалості витримки до 6...15 хвилин спостерігається різке зменшення приросту твердості. Отже, підвищена деформація не здатна забезпечити термічну стійкість субструктури, ймовірно, за рахунок нерівномірного розподілу дислокацій.

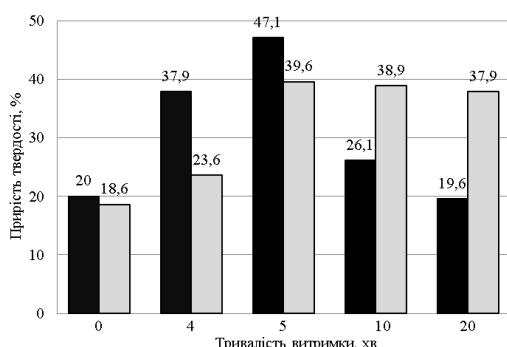


Рис. 3 - Приріст твердості деформованих пресуванням електродугових покриттів із дроту 65Г після ПТО:

■ – деформація 25%; □ – 30%

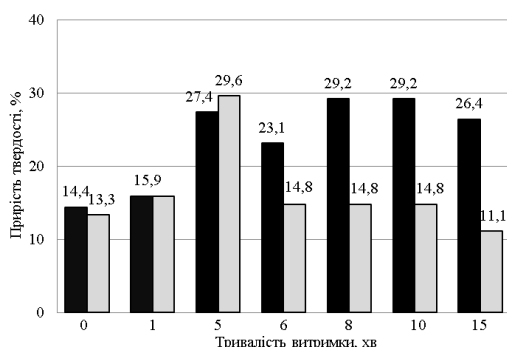


Рис. 4 - Приріст твердості деформованих пресуванням електродугових покриттів із дроту Sv-08Г2С після ПТО:

■ – деформація 20%; □ – 30%

Вплив деформації та ПТО на субструктуру напилених покриттів оцінювали за зміною розмірів областей когерентного розсіювання (ОКР) рентгенівського випромінювання. Оскільки ОКР відповідає внутрішній впорядкованій області зерна і не включає сильно спотворені границі, розмір ОКР ототожнюють із середнім розміром кристалітів. Результати досліджень наведені у табл. 1.

Таким чином, середній розмір ОКР електродугових покриттів з дроту 65Г зменшується після деформування та ПТО. Розмір ОКР стабілізованої субструктури менший на 40-45% від розміру напилених покриттів. Варто зазначити, що приріст твердості даних покриттів після проведення

деформації та ПТО становить 35-45% у порівнянні зі станом після напилення. Розмір ОКР електродугового покриття з Sv-08Г2С після стабілізації субструктури зменшився на 40%. При цьому приріст твердості становить близько 30%.

Таблиця 1 - Розмір ОКР електродугових покриттів (нм)

Покриття з дроту 65Г			
Пресування			
Після напилення	25%	25%+ПТО (400°C, 5 хв)	30%+ПТО (400°C, 5 хв)
104	92	58	66
Покриття з дроту Sv-08Г2С після обкатування			
Після напилення	20%+ПТО 400°C, 8 хв		
121	72		

На основі отриманих дифрактограм розраховано відносну кількість наноструктурних елементів та кут розорієнтування субзерен електродугових покриттів за методом гармонійного аналізу [14]. Для розрахунку кутів розорієнтування обрано як еталон дифрактограма технічно чистого заліза після відпалу при температурі 1000 °С протягом 60 хвилин. Результати досліджень зазначені в табл. 2.

Таблиця 2 - Кількість наноструктурних елементів та середній кут розорієнтування субзерен напилених і оброблених покриттів

Вид обробки	Кут роз., °	Максимальне значення кутів роз., °	Відносна кількість нанострукт. елементів, %
Покриття з дроту 65Г			
Напилення	0,34	0,44	18
Деформація 25%	0,32		22
25%+ ПТО 5 хв	0,37		35
30%+ ПТО 5 хв	0,37		32
Покриття з дроту Sv-08Г2С			
Напилення	0,28	0,43	16
20%+ПТО 8 хв	0,29		26

Згідно з наведених даних, після додаткової деформації та ПТО спостерігається підвищення кількості наноструктурних елементів з 18% до 32...35%. Збільшується і середній кут розорієнтування, тоді як максимальне значення кута розорієнтування залишається постійним. Це означає, що стабілізація субструктури сприяє збільшенню кутів розорієнтування і, ймовірно, що це забезпечується за рахунок збільшення кількості наноструктурних елементів. При деформуванні металу виникає комірчаста структура із певним кутом розорієнтування між комірками. Із збільшенням ступеня деформації відбувається утворення дислокаційних сплетінь, що поступово заповнюють весь об'єм [14]. Тобто, зі збільшенням ступеня деформації зменшується середній розмір комірок і зменшується кут їх розорієнтування.

У багатьох випадках підвищені властивості поверхневого шару можна досягти саме шляхом поверхневої пластичної деформації (ППД) (наприклад, для деталей типу тіл обертання). У результаті зміцнюється поверхневий шар, підвищується зносостійкість, вдається підвищити запас міцності при змінних навантаженнях у 1,5...3 рази [15]. Як метод ППД у роботі використовували дробоструменеву обробку, що пояснюється простою реалізацією, технологічністю та ефективністю даного способу. Для цього використовували установку 026-7 «Ремдеталь». Як робоче тіло використовували литий дріб із чавуну (ДЧЛ) номер 08 ГОСТ 11964-81. Тривалість обробки складала 1 хв. Обробці піддавали електродугові покриття з дроту 65Г, оскільки саме вони викликають практичний інтерес через широке застосування як зносостійкі [16]. Мікротвердість вимірювали за допомогою твердоміра ПМТ-3 по глибині наклепаного шару від поверхні зразка при навантаженні на індентор 50г. Результати наведено на рис. 5.

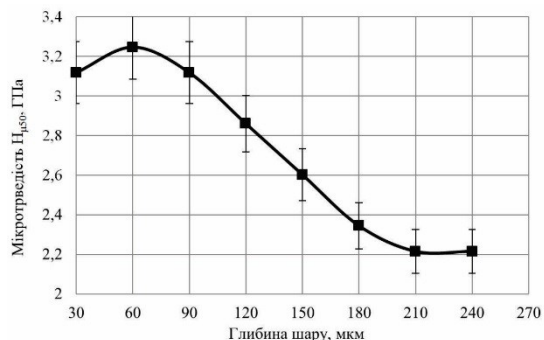


Рис.5 - Залежність мікротвердості від глибини наклепаного шару електродугових покриттів з дроту марки 65Г

Згідно з наведеними даними, максимальна мікротвердість покриттів спостерігається не на їх поверхні, а на глибині приблизно 60 мкм (+47%). Пояснюється це тим, що у місці удару дроби виникає локальне нагрівання, яке й призводить до зниження наклепу тонких шарів і зміщення зони максимального значення мікротвердості до підповерхневого шару.

Після дробоструменевої обробки покриття піддавали ПТО. Результати визначення мікротвердості на глибині 60 мкм в залежності від тривалості витримки при ПТО представлені на рис. 6.

Згідно з представленими даними, мікротвердість електродугового покриття підвищується при витримці 2хв з 3,25ГПа до 4,1ГПа і залишається достатньо високою до 25...30 хв та суттєво вище ніж після напilenня.

Для визначення експлуатаційних властивостей отриманих покриттів проведено випробування на міцність їх зчеплення з основою та зносостійкість. Основні параметри експериментів наведено у роботі [17] Результати досліджень представлені на рис.7, 8.

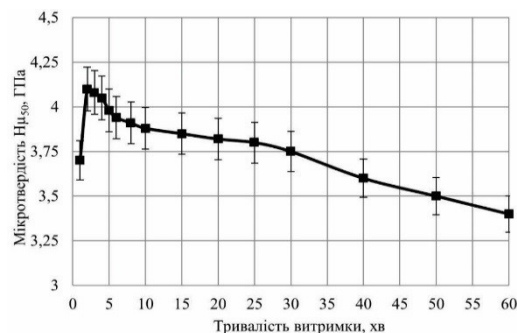


Рис. 6 - Залежність мікротвердості на глибині 60 мкм від тривалості витримки при термічній обробці електродугових покриттів з дроту 65Г

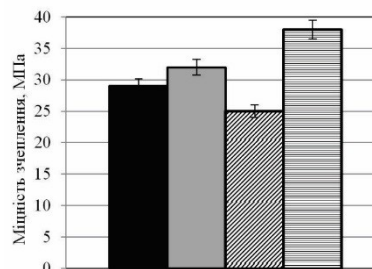


Рис. 7 - Результати визначення міцності зчеплення покриттів з дроту 65Г:

■ - після напilenня; ■ -напilenня+термічна обробка; ▨ -напilenня+ППД; ▩ -напilenня+ППД+термічна обробка

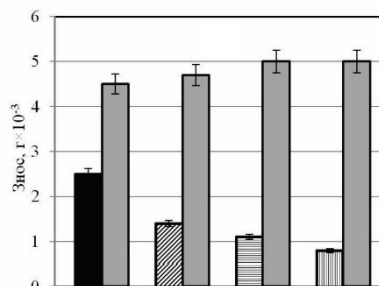


Рис. 8 - Результати визначення зносостійкості покриттів з дроту 65Г:

■ - після напilenня; ▨ -напilenня+термічна обробка; ▩ -напilenня+ППД; ▩ -напilenня+ППД+термічна обробка; ■ -контр тіло

Відповідно до наведеної інформації, проведення передрекристалізаційної термічної обробки покриттів забезпечує підвищення міцності зчеплення на 30% у порівнянні з покриттями після напilenня ймовірно за рахунок зменшення внутрішніх напружень. Наступна дробоструменева обробка знижує міцність зчеплення покриттів на 15% у порівнянні з покриттями після напilenня, вірогідно, за рахунок виникнення додаткових значних внутрішніх напружень у поверхневому шарі покриття. Термічна обробка додатково деформованих покриттів забезпечує підвищення міцності зчеплення на 20% у порівнянні з термообробленими покриттями без деформації за рахунок більшої тривалості витримки та зняття внутрішніх напружень, які виникли у

процесі формування покриттів та їх ППД. ПТО покриттів забезпечує підвищення зносостійкості на 45% у порівнянні зі станом після напилення. Знос контртіла обернено пропорційний зносу покриття: чим більша твердість та зносостійкість покриття тим більше зношується контртіло, але менш динамічно. Так, наприклад, при підвищенні зносостійкості покриття з дроту 65Г після ППД та термічної обробки на 68% у порівнянні зі станом після напилення, зносостійкість контртіла зменшилася лише на 10%.

Висновки

Встановлено, що додаткова деформація пресуванням на 25% та 30% електродугових сталевих покриттів з дроту 65Г та 20% і 30% покриттів з дроту Св-08Г2С надає можливість підвищити тривалість витримки при ПТО до 15...20 хв без суттєвого зниження твердості за рахунок формування субструктури з підвищеною термічною стійкістю. Показано, що оптимальною величиною деформації для покриттів з дроту 65Г є 30% при цьому витримка впродовж 20 хв забезпечує приріст твердості на 38%; для покриттів з дроту Св-08Г2С – деформація 20%, приріст твердості 26% (витримка 15хв). Середній розмір ОКР електродугових покриттів зменшується при деформуванні, що зумовлює стабілізацію субструктури, на 40...45% у порівнянні з покриттями після напилення. Проведення ПТО та додаткової деформації з ПТО забезпечує підвищення кількості наноструктурних елементів з 18% до 32...35% та збільшення середнього кута розорієнтування субзерен. Мікротвердість електродугового покриття з дроту 65Г максимально підвищується при витримці 2 хв з 3,25 ГПа до 4,1 ГПа (+26%). Дробоструменева обробка забезпечує стабілізацію полігонізаційної субструктури при термічній обробці до тривалості витримки 40 хв. У цьому діапазоні витримок не відбувається значного зниження твердості матеріалу та збільшення середнього розміру субзерен покриттів у порівнянні зі станом після ППД. Встановлено, що проведення ПТО покриттів з дроту 65Г забезпечує підвищення міцності зчеплення на 30% у порівнянні з покриттями після напилення за рахунок зменшення внутрішніх напружень. ПТО додатково деформованих покриттів забезпечує значніше підвищення міцності зчеплення у порівнянні з термообробленими покриттями без деформації за рахунок більшої тривалості витримки та ефективнішому зняттю внутрішніх напружень, які виникають у процесі формування покриттів та їх ППД. Показано, що ПТО забезпечує підвищення зносостійкості покриттів із 65Г на 45% у порівнянні зі станом після напилення. При цьому додаткова дробоструменева обробка покриття з наступною ПТО підвищує зносостійкість ще на 40% внаслідок зміцнення поверхневого шару.

Список літератури

1. Thermal spray coatings market analysis report by product, by technology, by application, by region, and segment forecasts, 2019 – 2025: (Market research report) URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/thermal-spray-coatings-market>.
2. Valiev, R. Z. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications / R. Z. Valiev, A. P. Zhilyaev, T. G. Langdon. John Wiley & Sons, Inc., 2013. – 456 p. - doi: 10.1002/9781118742679.
3. Pulsford, J. Effect of Particle and Carbide Grain Sizes on a HVOAF WC-Co-Cr Coating for the Future Application on Internal Surfaces: Microstructure and Wear / J. Pulsford, S. Kamnis, J. Murray, M. Bail, T. Hussain // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2018. – Vol. 27. – P. 207-218. - doi: 10.1007/s11666-018-0726-y.
4. Gupta, M. Influence of bondcoat spray process on lifetime of suspension plasma-sprayed thermal barrier coatings / W. Gupta, N. Markocsan, X.-H. Li, L. Ostargen // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2018. – Vol. 27. – P. 84 – 97. – doi: 10.1007/s11666-017-0672-0.
5. Горанский, Г. Г. Термодинамическая модель оценки энергии активации процесса кристаллизации многокомпонентной аморфной фазы / Г. Г. Горанский, Б. Б. Хина, В. И. Жорник, А. И. Поболь // *Вестник Витебского государственного технологического университета*. – 2014. – № 27. – С. 126-135.
6. Кузнецов, В. Д. Износостойкая наплавка с вводом в сварочную ванну нанопорошков / В. Д. Кузнецов, Д. В. Степанов // *Автоматическая сварка*. – 2015. – № 5-6. – С. 52-56.
7. Montemor, M. F. Smart Composite Coatings and Membranes / M. F. Montemor. Woodhead Publishing, 2015. – 490 p. – doi:10.1016/C2013-0-16518-X.
8. Mal'tseva, S. V. Structure and properties of modified plasma-sprayed composite coatings on a titanium base / S. V. Mal'tseva, I. P. Mel'nikova, A. V. Lyasnikova, A. M. Zaharevich // *Mechanics of Composite Materials*. – 2016. – Vol. 52. – P. 531-534. – doi: 10.1007/s11029-016-9603-2.
9. Борисов, Ю. С. Детонационные покрытия из композиционного порошка ферромолибден-карбид кремния, полученного методом механохимического синтеза / Ю.С. Борисов, А. Л. Борисова, Е. А. Астахов и др. // *Автоматическая сварка*. - 2014. - 3. - С. 28-35.
10. Коржик, В. Н. Особенности структуры покрытий из порошковой проволоки системы Fe-Cr-Al полученных в условиях сверхзвуковой электродуговой металлизации / В. Н. Коржик, А. Л. Борисова, Г. Н. Гордань, Н. П. Лютик, А. А. Чайка, Т. В. Кайда // *Автоматическая сварка*. – 2014. – № 2. – С. 33-38.
11. Dubovoj, A. N. Manufacture of coatings with mixed compositions by means of powder arc spraying using a facility developed specifically for this purpose / A. N. Dubovoj, S.A. Prokudin, A.A. Karpechenko // *Thermal spray bulletin*. – 2013. – Vol. 2. – P. 102-107.
12. Дубовий, О. М. Вплив параметрів режиму напилення покриттів щодо отримання наномасштабної субструктури з підвищеною стабільністю / О. М. Дубовий, М. М. Бобров, Ю. Є. Неделько, О. В. Чечель // *Зб. наук. праць НУК*. – Миколаїв: НУК, 2016. – № 4. – С. 35-40.
13. Дубовий, О. М. Формування нанорозмірної полігонізаційної субструктури та її вплив на фізико-механічні властивості металів і сплавів та напилених покриттів / О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, М. М. Бобров, О.О. Жданов, Т. О. Макруха, Ю. Є. Неделько // *Металлофізика і новітні технології*. – 2017. – Т.39, № 2. – С. 209-243. - doi: 10.15407/mfint.39.02.0209.
14. Горелик, С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. – М.: Металлургия, 1970. – 336 с.

15. **Одинцов, Л. Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник / **Л. Г. Одинцов.** – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
 16. **Ивашко, В. С.** Анализ материалов для восстановления шеек валов активированным электродуговым напылением / **В. С. Ивашко, К. В. Буйкус** // *Наука – образованию, производству, экономике : материалы 14-й Международной научно-технической конференции.* – Минск : БНТУ, 2016. – Т. 2. – С. 121.
 17. **Dubovyi, O. M.** Perspectives of improved physical and mechanical properties of thermal coatings by electropulse exposure / **O. M. Dubovyi, O. V. Chechel, M. M. Bobrov, Yu. Ye. Nedel'ko** // *Науковий вісник НГУ.* – 2017. – №1. – С. 82-87.
- References (transliterated)**
1. Thermal spray coatings market analysis report by product, by technology, by application, by region, and segment forecasts, 2019 – 2025: (Market research report). Available at: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/thermal-spray-coatings-market>
 2. **Valiev, R. Z., Zhilyaev, A. P., Langdon, T. G.** Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. John Wiley & Sons, Inc., 2013, 456, doi: 10.1002/9781118742679.
 3. **Pulsford, J.** Effect of Particle and Carbide Grain Sizes on a HVOAF WC-Co-Cr Coating for the Future Application on Internal Surfaces: Microstructure and Wear. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2018, **27**, 207-218, doi: 10.1007/s11666-018-0726-y.
 4. **Gypta, M.** Influence of bondcoat spray process on lifetime of suspension plasma-sprayed thermal barrier coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2018, **27**, 84-97, doi: 10.1007/s11666-017-0672-0.
 5. **Goranskiy, G. G.** Termodinamicheskaya model otsenki energii aktivatsii protsessa kristallizatsii mnogokomponentnoy amorfnoy fazyi [Thermodynamic model for estimating the activation energy of the crystallization process of a multicomponent amorphous phase]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta [Bulletin of Vitebsk State Technological University]*, 2014, **27**, 125-135.
 6. **Kuznetsov, V. D.** Iznosostoykaya naplavka s vvidom v svarochnuyu vannu nanoporoshkov [Wear-resistant surfacing with the addition of nanopowders into the weld pool]. *Avtomaticheskaya svarka [Automatic welding]*, 2015, **5-6**, 52-56.
 7. **Montemor, M. F.** Smart Composite Coatings and Membranes. *Woodhead Publishing*, 2015, 490, doi: 10.1016/C2013-0-16518-X.
 8. **Mal'tseva, S. V., Mel'nikova, I. P., Lyasnikova, A. V., Zaharevich, A. M.** Structure and properties of modified plasma-sprayed composite coatings on titanium base. *Mechanics of Composite Materials*, 2016, **52**, 531-534, doi: 10.1007/s11029-016-9603-2.
 9. **Borisov, Yu. S., Borisova, A. L., Astahov, E. A.** Detonatsionnye pokrytiya iz kompozitsionnogo poroshka ferromolibden–karbid kremniya, poluchennogo metodom mehanohimicheskogo sinteza [Detonation coatings from composite powder ferromolybdenum – silicon carbide, obtained by the method of mechanic-chemical synthesis]. *Avtomaticheskaya svarka [Automatic welding]*, 2014, **3**, 28-35
 10. **Korzhih, V. N., Borisova, A. L., Gordan, G. N., Lyutik, N. P., Chayka, A. A., Kayda, T. V.** Osobennosti struktury i pokrytiy iz poroshkovoy provoloki sistemy Fe–Cr–Al poluchennykh v usloviyah sverhzhukovoy elektrodugovoy metallizatsii [Peculiarities of the structure of coatings from flux-cored wire of the Fe – Cr – Al system obtained under superionic arc metallization conditions]. *Avtomaticheskaya svarka [Automatic welding]*, 2014, **2**, 33-38.
 11. **Dubovoj, A.N., Prokudin, S.A., Karpechenko, A.A.** Manufacture of coatings with mixed compositions by means of powder arc spraying using a facility developed specifically for this purpose. *Thermal spray bulletin*, 2013, **2**, 102-107.
 12. **Duboviy, O. M., Bobrov, M. M., Nedelko, Yu. E, Chechel, O. V.** Vpliv parametriv rezhimu napileniya pokrytivy schodo otrimannya nanomasshtabnoyi substrukturi z pidvischenoyu stabilnistyu [Influence of spray parameters on obtaining nanoscale substructure with increased stability]. *Zb. nauk. prats NUK [Collection of scientific papers]*, 2016, **4**, 35- 40.
 13. **Duboviy, O. M., Karpechenko, A. A., Bobrov, M. M., Zhdanov, O. O., Makruha, T. O., Nedelko, Yu. E.** Formuvannya nanorozmirnoyi poligonizatsiynoyi substrukturi ta yiyi vpliv na fiziko-mehanichni vlastivosti metaliv i splaviv ta napilennykh pokrytivy [Formation of nanosized polygonal substructure and its influence on physical and mechanical properties of metals and alloys and spray coatings]. *Metallofizika i noveyshie tehnologii [Metallophysics and the latest technology]*, 2017, **2**, 209-1243, doi: 10.15407/mfint.39.02.0209.
 14. **Gorelik, S. S., Rastorguev, L. N., Skakov, Yu. A.** Rentgenograficheskiy i elektronnoopticheskiy analiz [X-ray and electron optical analysis]. М.: Metallurgy, 1970, 336.
 15. **Odintsov, L. G.** Uprochnenie i otdelka detaley povehnostnyim plasticheskim deformirovaniem: Spravochnik [Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation. Directory]. М.: Metallurgy, 1987, 328.
 16. **Ivashko, V. S., Buykus, K. V.** Analiz materialov dlya vosstanovleniya sheek valov aktivirovannyim elektrodugovym napyleniem [Analysis of materials for the restoration of the necks of shafts by activated arc spraying]. *Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike : materialy 14-y Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. Minsk : BNTU [Science - education, production, economics: materials of the 14th International Scientific and Technical Conference. Minsk: BNTU]*, 2016, **2**, 121.
 17. **Dubovyi, O. M., Chechel, O. V., Bobrov, M. M., Nedel'ko, Yu. Ye.** Perspectives of improved physical and mechanical properties of thermal coatings by electropulse exposure. *Naukoviy visnik NGU [Scientific Bulletin of of National Mining University]*, 2017, **1**, 82-87.

Сведения об авторах (About authors)

Дубовий Олександр Миколайович – доктор технічних наук, професор, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, завідувач кафедри матеріалознавства і технології металів, м. Миколаїв, Україна; ORCID: 0000-0002-2843-1879; e-mail: oleksandr.duboviy@nuos.edu.ua.

Oleksandr Duboviy – Doctor of Technical Sciences, Professor, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Head of Department Material science and technology of metals, Mykolaiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2843-1879; e-mail: oleksandr.duboviy@nuos.edu.ua.

Карпеченко Антон Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, доцент кафедри матеріалознавства і технології металів, м. Миколаїв, Україна; ORCID:0000-0002-7543-4159; e-mail: karpchenkoanton@gmail.com.

Anton Karpechenko – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Docent, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Docent of Department Material science and technology of metals, Mykolaiv, Ukraine; ORCID:0000-0002-7543-4159; e-mail: karpchenkoanton@gmail.com.

Бобров Максим Миколайович – кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Україна; ORCID: 0000-0002-9098-6912; e-mail: laborantmtm@gmail.com.

Maksym Bobrov - Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Scientific Associate, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Mykolaiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9098-6912; e-mail: laborantmtm@gmail.com.

Шкурат Сергій Іванович – кандидат хімічних наук, доцент, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, доцент кафедри матеріалознавства і технології металів, м. Миколаїв, Україна.

Serhiy Shkurat - Candidate of Chemical Sciences (Ph.D.), Docent, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Docent of Department Material science and technology of metals, Mykolaiv, Ukraine.

Лимар Олександр Олександрович – кандидат фізико-математичних наук, Миколаївський національний аграрний університет, асистент кафедри тракторів та сільськогосподарських машин, експлуатації і технічного сервісу, м. Миколаїв, Україна; ORCID: 0000-0001-9471-8272; e-mail: aleksandr1402a@mail.ua.

Oleksandr Lyamar - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Mykolaiv National Agrarian University, Assistant of Department of tractors and agricultural machinery, operation and technical service, Mykolaiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-9471-8272; e-mail: aleksandr1402a@mail.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Дубовий, О. М. Формування термічно стійкої полігонізаційної субструктури з підвищеними властивостями в електродугових покриттях / **О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, С. І. Шкурат, М. М. Бобров, Є. Ю. Неделько** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 10 (1335). – С. 3–10. – doi:10.20998/2413-4295.2019.10.01.

Please cite this article as:

Dubovyy, O., Karpechenko, A., Bobrov, M., Shkurat, S., Lyamar, O. Formation of a thermally sustainable polygonization substructure with enhanced properties in electric arc coatings. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 10 (1335), 3–10, doi:10.20998/2413-4295.2019.10.01.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Дубовой, А. Н. Формирование термически стойкой полигонизационной субструктуры с повышенными свойствами в электродуговых покрытиях/ **А. Н. Дубовой, А. А. Карпеченко, М. Н. Бобров, С. И. Шкурат, А. А. Лимарь** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 10 (1335). – С. 3–10. – doi:10.20998/2413-4295.2019.10.01

АННОТАЦИЯ В работе исследована возможность формирования электродуговых стальных покрытий из проволок марок 65Г и Св-08Г2С с частично термически стабилизированной полигонизационной субструктурой за счет дополнительной деформации и термической обработки. Установлено, что дополнительная деформация прессованием на 25% и 30% электродуговых стальных покрытий из проволоки 65Г и 20% и 30% покрытий из проволоки Св-08Г2С позволяет повысить продолжительность выдержки при термической обработке до 15 ... 20 мин без существенного снижения твердости за счет формирования субструктуры с повышенной термической стойкостью. Методом рентгеноструктурного анализа рассчитан средний размер субзерен, угол их разориентировки и среднее количество наноструктурных элементов в напыленных покрытиях. Показано, что средний размер субзерен электродуговых покрытий уменьшается при деформации, что приводит к стабилизации субструктуры, на 40 ... 45% по сравнению с покрытиями после напыления. Кроме того, при проведении термической обработки и дополнительной деформации обеспечивается увеличение количества наноструктурных элементов с 18 до 32 ... 35% и повышается средний угол разориентировки субзерен. Исследовано влияние поверхностной пластической деформации методом дробеструйной обработки на возможность формирования термически устойчивой полигонизационной субструктуры в покрытиях из проволоки 65Г. Установлены оптимальные температурно-временные параметры термической обработки указанных покрытий по показателю микротвердости по глубине наклепанного слоя. Дробеструйная обработка обеспечивает стабилизацию полигонизационной субструктуры при термической обработке при продолжительности выдержки 40 минут. Проведены экспериментальные исследования влияния термической обработки, поверхностной пластической деформации и комбинированной деформационно-термической обработки на прочность и износостойкость электродуговых покрытий из проволоки 65Г. Установлено, что проведение термической обработки покрытий из проволоки 65Г обеспечивает повышение прочности сцепления на 30% по сравнению с покрытиями после напыления за счет уменьшения внутренних напряжений. Термическая обработка дополнительно деформированных покрытий обеспечивает значительное повышение прочности сцепления по сравнению с термообработанными покрытиями без деформации. Показано, что термическая обработка обеспечивает повышение износостойкости покрытий из 65Г на 45% по сравнению с состоянием после напыления.

Ключевые слова: газотермическое покрытие; термическая обработка; субструктура; твердость; полигонизация; деформация

Поступила (received) 27.05.2019