

PACS numbers: 81.05.Bx, 81.07.Bc, 81.15.Rs, 81.40.Ef, 81.40.Gh, 83.10.Tv, 83.50.Uv

**Підвищення фізико-механічних та експлуатаційних
властивостей електродугових та плазмових покриттів
формуванням термічно стабільної здрібненої
і нанорозмірної субструктури**

О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, М. М. Бобров, О. В. Лабарткава,
Ю. Є. Неделько, О. О. Лимар

*Національний університет кораблебудування імені Адмірала Макарова,
просп. Центральний, 3,
54000 Миколаїв, Україна*

У статті наведено результати досліджень по формуванню термічно-стабільної здрібненої полігонізаційної субструктури напорошених покриттів шляхом передрекristалізаційної термічної обробки. Дослідження проводили на прикладі електродугових покриттів із дротів марок Св-08Г2С, 65Г, 12Х18Н10Т, БрАМц 9-2 та плазмових покриттів з порошків ПР-Х18Н9 та ПГ-19М-01. Встановлено вплив тривалості витримки при термічній обробці, величини та виду додаткової деформації на твердість покриттів із зазначених матеріалів. У результаті рентгеноструктурного аналізу показано, що передрекristалізаційна термічна обробка (ПТО) напорошених та деформованих покриттів на режимах, що забезпечують найбільш високі показники фізико-механічних властивостей, викликає подрібнення субструктури і дозволяє формувати термічно-стабільні нанорозмірні елементи. Встановлено вплив додаткової деформації та ПТО на експлуатаційні властивості (міцність зчеплення, зносостійкість) напорошених покриттів.

Ключові слова: передрекristалізаційна термічна обробка, нанорозмірна

Corresponding author: Anton Anatoliyovych Karpechenko
E-mail: karpechenkoanton@gmail.com

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
3 Tsentralnyy Ave., UA-54000 Mykolaiv, Ukraine*

Citation: O. M. Dubovyy, A. A. Karpechenko, M. M. Bobrov, A. V. Labartkava, Yu. E. Nedelko, and O. O. Lymar, Increase of Physical-Mechanical and Operational Properties of Electric Arc and Plasma Sprayed Coatings by the Formation of a Thermally Stable Ground and Nanosize Substructure, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 41, No. 4: 461–480 (2019), DOI: [10.15407/mfint.41.04.0461](https://doi.org/10.15407/mfint.41.04.0461).

субструктура, фізико-механічні властивості напорошених покриттів.

The results of the study devoted to a thermally stable ground polygonized substructure formation by the pre-recrystallization heat treatment in sprayed coatings are presented in the article. The investigations are carried out on the example of electric arc sprayed coatings from wires Sv-08G2S, 65G, 12Kh18N10T, BrAMts 9-2 and plasma coatings from powders PR-Kh18N9 and PG-19M-01. The effect of the heat treatment exposure duration, as well as the degree and type of additional deformation, on the hardness of coatings from these materials is established. As a result of x-ray structural analysis, it is shown that pre-recrystallization heat treatment (PHT) of the sprayed and deformed coatings in the regimes, which provide the highest parameters of physical-mechanical properties, causes the substructure grounding and allows the formation of the thermally stable nanoscale elements. The effect of additional deformation and PHT on the operational properties (adhesion strength, wear resistance) of sprayed coatings is established.

Key words: pre-recrystallization heat treatment, nanoscale substructure, physical and mechanical properties of sprayed coatings.

В статье приведены результаты исследований по формированию термически-стабильной измельчённой полигонизационной субструктуры в напылённых покрытиях путём предрекристаллизационной термической обработки. Исследования проводились на примере электродуговых покрытий из проволок марок Св-08Г2С, 65Г, 12Х18Н10Т, БрАМц 9-2 и плазменных покрытий из порошков ПР-Х18Н9 и ПГ-19М-01. Установлено влияние продолжительности выдержки при термической обработке, величины и вида дополнительной деформации на твёрдость покрытий из указанных материалов. В результате рентгеноструктурного анализа показано, что предрекристаллизационная термическая обработка (ПТО) напылённых и деформированных покрытий на режимах, обеспечивающих наиболее высокие показатели физико-механических свойств, вызывает измельчение субструктуры и позволяет формировать термически-стабильные наноразмерные элементы. Установлено влияние дополнительной деформации и ПТО на эксплуатационные свойства (прочность сцепления, износостойкость) напылённых покрытий.

Ключевые слова: предрекристаллизационная термическая обработка, наноразмерная субструктура, физико-механические свойства напылённых покрытий.

(Отримано 15 травня 2018 р.; остаточн. варіант — 11 лютого 2019 р.)

1. ВСТУП

Розвиток технологічного процесу потребує постійної відповідності між властивостями нових матеріалів, які застосовують у машинобудуванні, і все більш жорсткими умовами їх роботи. Найбільш

слабким елементом в системі «деталь–робоче середовище», який визначає допустні умови експлуатації, є поверхня деталі. Економічно доцільно і виправдано застосування виробів зі спеціальними покриттями, що забезпечують необхідний комплекс властивостей.

Основною причиною виходу машин і механізмів з ладу є руйнування робочих поверхонь деталей через низьку зносостійкість, що призводить до великих витрат на їх ремонт та випуску великої кількості запасних частин. Підвищення зносостійкості нових і відновлення зношених деталей машин забезпечують економію високоякісного металу, палива, енергетичних і трудових ресурсів, а також раціональне використання природних ресурсів і охорону навколишнього середовища. Для відновлення працездатності зношених деталей потрібно в 5–8 разів менше технологічних операцій у порівнянні з виготовленням нових деталей. Витрачається в 8–30 разів менше металу, ніж при виготовленні нових деталей. Одним із способів вирішення цієї проблеми є газотермічне напорошення, що включає найбільш продуктивний та універсальний електродуговий та плазмовий методи, які широко використовуються в даний час для відновлення та зміцнення деталей машин та механізмів. Однак такі покриття не завжди забезпечують достатній рівень фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, зокрема необхідні значення твердості, міцності зчеплення та зносостійкості.

Сучасні тенденції розвитку технології газотермічного напорошення полягають переважно у підвищенні фізико-механічних властивостей покриттів шляхом наноструктурування.

Існує кілька способів отримання покриттів з наноструктурними елементами: напорошення нанорозмірних порошків та суспензій [1, 2], формування наноструктурних зміцнюючих елементів при розпаді аморфної фази [3–5], створення нанокристалічного стану в поверхневому шарі ультразвуковою і комбінованими обробками [6, 7]. Але ці способи мають істотні недоліки, пов'язані зі спеціальною трудомісткою підготовкою порошків, потребують модернізації обладнання або створення нових пристроїв.

Альтернативний шлях полягає у застосуванні передрекристалізаційної термічної обробки (ПТО) напорошених покриттів, що дозволяє підвищити їх фізико-механічні властивості за рахунок отримання здрібненої і нанорозмірної полігонізаційної субструктури [8, 9].

У процесі напорошення покриттів здійснюється деформація переважно розплавлених частинок, при цьому швидкість охолодження таких частинок досягає 10^8 °C/с. Така висока швидкість охолодження запобігає протіканню динамічної рекристалізації у матеріалі покриття, це означає що зберігається наклеп, який обумовлює ефект підвищення фізико-механічних властивостей. Однак отримана субструктура має низьку термічну стійкість (декілька хвилин)

внаслідок протікання процесів збиральної полігонізації під час тривалої витримки при підвищеній температурі у процесі її формування, що стримує застосування ПТО для масивних виробів.

Мета роботи полягає у дослідженні закономірностей формування термічно стабільної здрібненої і нанорозмірної субструктури з підвищеними фізико-механічними властивостями у напорошених покриттях.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Електродугові покриття наносили за допомогою установки КДМ-2, в комплект якої входить металізатор ЕМ-14М. В якості напорошувального матеріалу використовували дроти марок Св-08Г2С, 65Г, 12Х18Н10Т та БрАМц9-2 діаметром 1,2 мм. Плазмові покриття отримували за допомогою установки «Київ-7», яка укомплектована плазмотроном ПУН-1. Як плазмо-утворюючий і транспортуючий газ застосовували стиснуте повітря. В якості напорошувального матеріалу використовували порошок бронзи марки ПГ-19М-01 ТУУ 322-19-001-95 і порошок неіржавкої сталі ПР-Х18Н9 ГОСТ 14086-69 фракцією 40–80 мкм. Оптимальні режими напорошення обґрунтовані у роботі [8].

Термічну обробку зразків проводили в лабораторній електричній пічці СНОЛ-1.6.2.0.08/9-М1. Дослідження мікроструктури отриманих газотермічних покриттів здійснювали за допомогою оптичного металографічного мікроскопу ММУ-3. Вимірювання твердості за Віккерсом проводили з використанням твердоміру типу ТП; мікротвердості — мікротвердоміру ПМТ-3 (ДСТУ ISO 6507-4:2008). Міцність зчеплення покриттів з основою визначали методом «витягування штифта» на розривній машині УММ-5 на зразках-свідках. Зносостійкість визначали на машині тертя СМЦ-2 за схемою «ролик–колодка» в умовах обмеженого змащування. Визначення областей когерентного розсіювання рентгенівського випромінювання (ОКР) здійснювали методом рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі ДРОН-3.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Передрекристалізаційну термічну обробку електродугових покриттів з дротів марок Св-08Г2С та 12Х18Н10Т проводили за температур 450 і 600°C. Оптимізацію режиму термічної обробки здійснювали за показниками твердості за Віккерсом. Додаткове деформування покриттів здійснювали пресуванням на гідравлічному пресі П50 на різні величини деформації. Результати вимірювання твердості деформованих і термооброблених зразків наведено на рис. 1.

Згідно з наведеними на рисунку 1, *а* даними, використання подальшої деформації покриттів забезпечує менше зниження твердості при підвищенні тривалості витримки при ПТО до 90–180 хв. Так, для покриття з дроту Св-08Г2С без деформації при підвищенні тривалості витримки від 2 хв (максимум твердості) до 90 хв твердість знижується на 30%. При використанні деформації покриття на 20%, 30% і 40% та підвищенні тривалості витримки з 5 хв (максимум) до 90 хв твердість знижується на 17%, 12% і 16% відповідно. Достатню стійкість і високу твердість полігонізаційної субструктури забезпечує деформація на 40%. При деформації на 50% спостерігалися тріщини по границях ламелей та руйнування покриття.

Схожа залежність спостерігається і для покриттів, отриманих з дроту 12Х18Н10Т (рис. 1, *б*). Для покриття без деформації при підвищенні тривалості витримки з 3 хв до 180 хв твердість знижується на 25%. При використанні додаткової деформації на 10%, 15%, 20% та підвищенні тривалості витримки з 5 хв до 180 хв твердість знижується на 7%, 5% і 8% відповідно. В цьому випадку найвищу стабільність полігонізаційної субструктури забезпечує деформація на 15%.

Пояснюється це тим, що при здійсненні повторної деформації взаємодія від 50% до 75% дислокацій закінчується виникненням дислокаційних бар'єрів (Хірта, Ломер–Коттрелла), інші дислокації

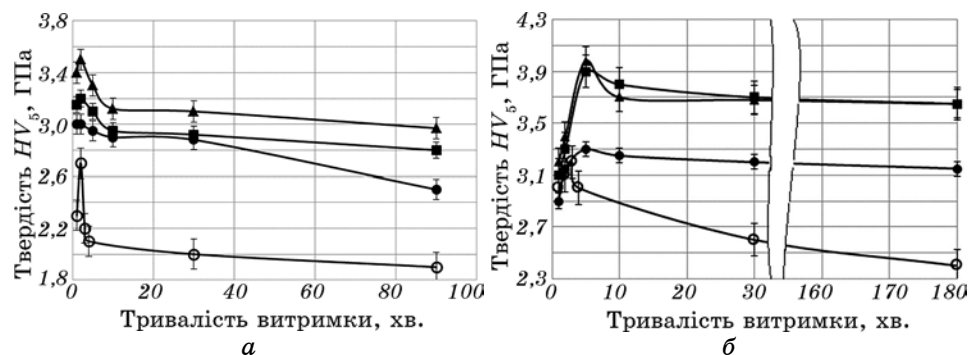


Рис. 1. Залежність твердості електродугових покриттів із дроту Св-08Г2С (*а*) та 12Х18Н10Т (*б*) від тривалості витримки при термічній обробці та ступеня додаткової деформації: \circ — без деформації, \bullet — 20%, \blacksquare — 30%, \blacktriangle — 40% деформації (*а*); \circ — без деформації, \bullet — 10%, \blacksquare — 15%, \blacktriangle — 20% деформації (*б*).

Fig. 1. Dependence of the hardness of electric arc coatings from wire Sv-08G2S (*a*) and 12Kh18N10T (*b*) vs. heat treatment exposure time duration and degree of additional deformation: \circ —without deformation, \bullet —20%, \blacksquare —30%, \blacktriangle —40% deformation (*a*); \circ —without deformation, \bullet —10%, \blacksquare —15%, \blacktriangle —20% deformation (*b*).

беруть участь у формуванні дислокаційних сплетінь. Дані дислокаційні бар'єри, які виникають вздовж напрямку перпендикулярного осі деформації, стримують рух дислокацій і, як наслідок, зменшують рухливість полігонізаційних дислокаційних субграниць, таким чином, знижуючи швидкість збиральної полігонізації й забезпечуючи стабілізуючий ефект [9].

Аналіз мікроструктур покриттів (розміру ламелей, поруватості), виконаний у попередній роботі [9], не виявив змін після ПТО. Тому вплив деформації і ПТО на субструктуру напорошених покриттів оцінювали за зміною розмірів областей когерентного розсіювання (ОКР) рентгенівського випромінювання. Результати досліджень наведено у табл. 1.

Згідно з наведеними даними, розмір ОКР (субзерен) як деформованих, так і покриттів без додаткової деформації після проведення ПТО, яка забезпечує максимальну твердість, в 1,5–3 рази менше, ніж в стані після напорошення. При збільшенні тривалості витримки до 90 і 150 хв деформованих покриттів з Св-08Г2С та 12Х18Н10Т відповідно, розмір ОКР збільшується незначним чином, що корелює з незначним зменшенням твердості.

Таким чином, проведення додаткової деформації на 40% і 15% і

ТАБЛИЦЯ 1. Залежність розмірів ОКР рентгенівського випромінювання електродугових покриттів від виду обробки.

TABLE 1. Dependence of the size of coherent x-rays scattering regions of electric arc coatings vs. the type of treatment.

Матеріал покриття	Вид обробки	ОКР, нм
Св-08Г2С	Після напорошення	> 200
	Напорошення + ПТО (2 хв, 450°C)	62
	Напорошення + деформація на 30%	163
	Напорошення + деформація на 30% + ПТО (5 хв, 450°C)	82
	Напорошення + деформація на 30% + ПТО (90 хв, 450°C)	111
12Х18Н10Т	Після напорошення	> 200
	Напорошення + ПТО (3 хв, 600°C)	153
	Напорошення + деформація на 15%	164
	Напорошення + деформація на 15% + ПТО (5 хв, 600°C)	87
	Напорошення + деформація на 15% + ПТО (150 хв, 600°C)	138

ПТО напорошених електродугових покриттів з дротів Св-08Г2С та 12Х18Н10Т дозволяє формувати нанорозмірну полігонізаційну субструктуру підвищеної термічної стійкості, яка забезпечує підвищену твердість у порівнянні зі станом після напорошення на 75% і 54% відповідно.

Аналогічні дослідження проводили і для електродугових покриттів з дроту 65Г, оскільки даний матеріал характеризується високою твердістю, тому викликає зацікавленість з точки зору практичного застосування в якості основи для зносостійких відновлювальних покриттів.

Спочатку визначали оптимальні температурно-часові параметри ПТО напорошених покриттів. З практики попередніх досліджень обрали температурний інтервал 300–500°C з кроком у 100°C. Оптимізацію проводили за показниками твердості HV_5 покриттів (рис. 2). Твердість покриттів після напорошення склала 2,7 ГПа.

Згідно з наведеними даними встановлено, що залежність носить екстремальний характер з виразним максимумом, висота якого залежить від температури нагрівання, при цьому відповідну витримку можна вважати оптимальною. Так для температури 300°C максимальне значення твердості було зафіксовано при витримці 4 хв і склало 3,0 ГПа; для температури 400°C оптимальною є витримка 3 хв, при цьому твердість — 3,4 ГПа; для температури 500°C витримка — 1,5 хв, твердість — 3,1 ГПа. Отже, при підвищенні температури точка максимального зміцнення зміщується у діапазон мен-

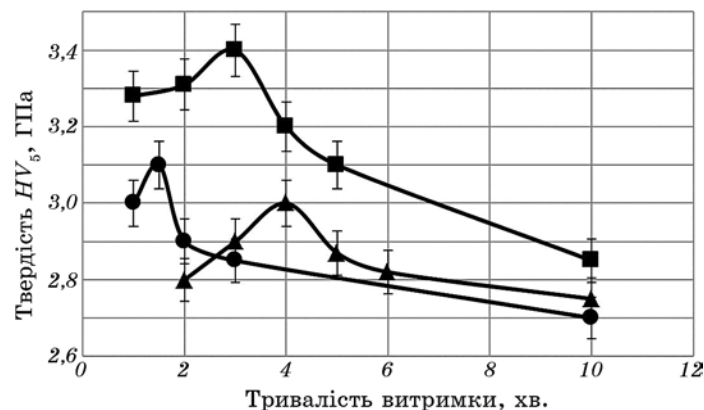


Рис. 2. Залежність твердості електродугових покриттів отриманих з дроту 65Г від температурно-часових параметрів ПТО: ▲ — 300°C, ■ — 400°C, • — 500°C.

Fig. 2. Dependence of the hardness of electric arc coatings from wire 65G on temperature-time parameters of pre-recrystallization heat treatment: ▲ — 300°C, ■ — 400°C, and • — 500°C.

ших витримок, що пов'язано, можливо, зі збільшенням швидкості полігонізаційних процесів за рахунок термічної активації. Максимальний приріст твердості спостерігається при температурі 400°C. Таким чином, для електродугового покриття з дроту 65Г оптимальними температуро-часовими параметрами передрекристалізаційної термічної обробки є: температура 400°C і витримка протягом 3 хв.

Подальшу деформацію покриттів проводили пресуванням на 15% та 30%. Після чого здійснювали ПТО при оптимальній температурі 400°C. Результати досліджень наведено на рис. 3.

Аналіз наведених даних дає підстави стверджувати, що оптимальною величиною додаткової деформації є 15%, тому що при підвищенні тривалості витримки під час термічної обробки, наприклад, з 4 хв до 20 хв спостерігається зменшення твердості покриття з 3,6 ГПа до 3,45 ГПа (–4%), а при деформації 30% — з 4 ГПа до 3,2 ГПа (–20%).

Пластична деформація пресуванням покриттів на готовому виробі пов'язана з проблемою її технологічної та конструктивної реалізації, тому актуальним є дослідження можливості отримання стабілізованої здрібненої полігонізаційної субструктури за рахунок попередньої поверхневої пластичної деформації (ППД).

У багатьох випадках оптимальних властивостей поверхневого шару можна досягти саме шляхом ППД. У результаті зміцнюється поверхневий шар, підвищується зносостійкість, вдається підвищити запас міцності при змінних навантаженнях у 1,5–3 рази [9]. В

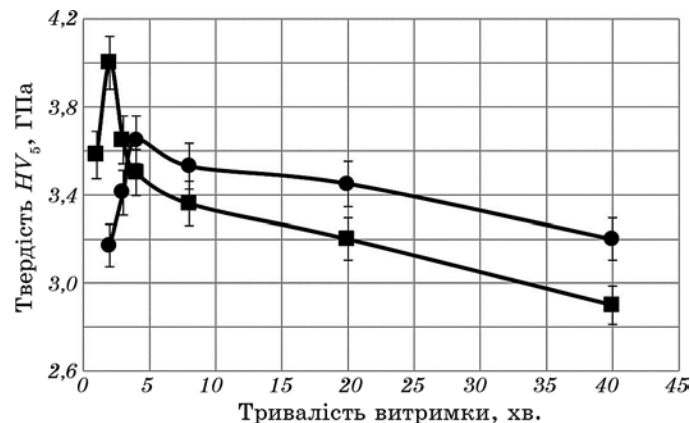


Рис. 3. Залежності твердості електродугових покриттів з дроту 65Г від тривалості витримки та ступеня додаткової деформації: ● — 15%, ■ — 30%.

Fig. 3. Dependences of the hardness of electric arc coatings from wire 65G on heat treatment exposure time duration and degree of additional deformation: ●—15%, ■—30%.

якості методу ППД у роботі використовували дробоструменеву обробку, що пояснюється простотою реалізації, 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 дробоструменевої обробки розраховували за формулою [8]:

$$t = \frac{7,6ld\sqrt{H}}{k_i v m_{\text{др}} \sin^2 \alpha},$$

де l — відстань від сопла до оброблюваної поверхні [мм], d — діаметр дробу [мм], H — твердість оброблюваного матеріалу, k_i — коефіцієнт, що враховує кількість ударів для забезпечення необхідного зміцнення ($k_i = 0,8$), v — швидкість дробу [м/с], $m_{\text{др}}$ — витрати дробу [кг/хв.], α — кут між потоком дробу і оброблюваною поверхнею [град].

Тривалість дробоструменевої обробки зразків з покриттями складала 1 хв. Необхідність визначення часу пов'язана з тим, що більш тривалий наклеп знижує твердість поверхні за рахунок появи великої кількості дефектів, які сприяють передчасному руйнуванню [10].

Обробці піддавали електродугові покриття з дротів 12Х18Н10Т, БрАМц 9-2 і 65Г та плазмові покриття з порошоків ПР-Х18Н9 і ПГ-19М-01. Мікротвердість вимірювали на ПМТ-3 по глибині наклепаного шару від поверхні зразка при навантаженні на індентор 50 г (рис. 4). Результати визначення мікротвердості наведено на рис. 5–7.

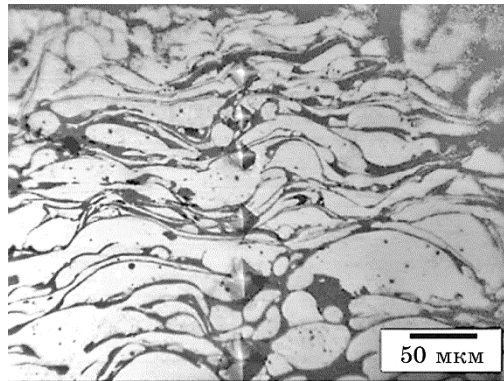


Рис. 4. Залежність розмірів відбитків алмазної піраміди ПМТ-3 від глибини наклепаного шару електродугового покриття з дроту 65Г.

Fig. 4. Dependence of the sizes of diamond pyramid impressions of PMT-3 on the depth of the cold-hardened layer of electric arc coating from wire 65G.

Згідно з наведеними даними, у всіх випадках максимальна мікротвердість покриттів спостерігається не на їх поверхні, а на глибині приблизно 60 мкм. Пояснюється це тим, що у місці удару дробу виникає локальне нагрівання, яке й призводить до зниження наклепу тонких шарів і зміщення зони максимального значення мікротвердості до підповерхневого шару. Так, мікротвердість електро-

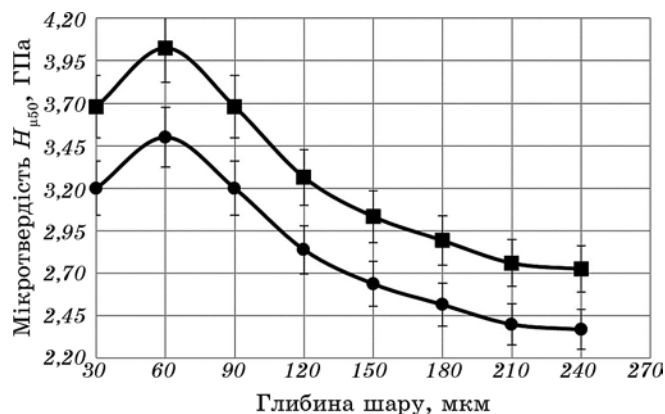


Рис. 5. Залежність мікротвердості від глибини наклепаного шару покриттів: ■ — електродугових з 12X18N10T, ● — плазмових з ПР-X18N9.

Fig. 5. Dependence of the microhardness on the depth of the cold-hardened layer of coatings: ■—electric arc from 12Kh18N10T, ●—plasma from PR-Kh18N9.

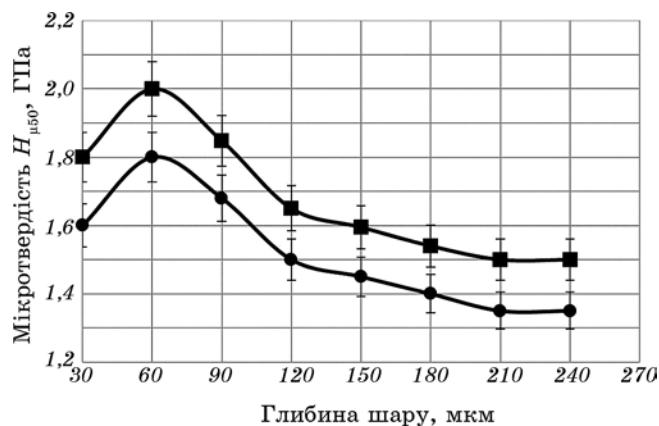


Рис. 6. Залежність мікротвердості від глибини наклепаного шару покриттів: ■ — електродугових з БрАМц 9-2, ● — плазмових з ПГ-19М-01.

Fig. 6. Dependence of the microhardness on the depth of the cold-hardened layer of coatings: ■—electric arc from BrAMts 9-2, ●—plasma from PG-19M-01.

дугового покриття з дроту 12Х18Н10Т у точці максимального зміцнення підвищується з 2,7 ГПа до 4 ГПа (+48%), з БрАМц 9-2 — з 1,5 ГПа до 2,0 ГПа (+30%), з 65Г — з 2,2 ГПа до 3,25 ГПа (+47%). Для плазових покриттів зі сталі (ПР-Х18Н9) — з 2,3 ГПа до 3,5 ГПа (+52%), а з бронзи (ПГ-19М-01) — з 1,35 ГПа до 1,8 ГПа (+33%).

Більший ефект підвищення твердості покриттів з неіржавких сталей пояснюється їх здатністю до деформаційного зміцнення за рахунок формування α' -фази мартенситного типу [11]. Глибина наклепаного шару складає 180–200 мкм, після чого мікротвердість набуває значень, що відповідають необробленому матеріалу покриття. Після дробоструменевої обробки покриттів проводили їх передрекристалізаційну термічну обробку при температурах: 880°C для електродугових з 12Х18Н10 та плазових з ПР-Х18Н9; 350°C — електродугових з БрАМц 9-2 та плазових з ПГ-19М-01; 400°C — електродугових з 65Г.

Результати визначення мікротвердості на глибині 60 мкм в залежності від тривалості витримки при термічній обробці представлено на рис. 8–10.

Згідно з представленими даними, мікротвердість електродугового покриття з дроту 12Х18Н10Т максимально підвищується при витримці 1,5 хв з 4 ГПа до 5 ГПа (+20%), з БрАМц 9-2 — при 2 хв з 2 ГПа до 2,35 ГПа (+17%), з 65Г — при 2 хв з 3,25 ГПа до 4,1 ГПа (+26%), а плазових покриттів з ПР-Х18Н9 при витримці 1,5 хв з 3,5 ГПа до 4,3 ГПа (+23%), з ПГ-19М-01 — при 2 хв з 1,8 ГПа до 2,05 ГПа (+11%). При підвищенні тривалості витримки покриттів, на-

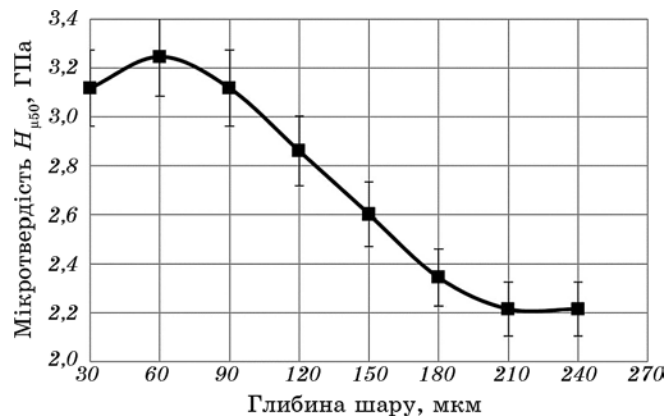


Рис. 7. Залежність мікротвердості від глибини наклепаного шару електродугових покриттів з дроту марки 65Г.

Fig. 7. Dependence of the microhardness on the depth of the cold-hardened layer of electric arc coatings from wire 65G.

приклад, до 30–40 хв спостерігається незначне зменшення мікротвердості покриттів — у середньому на 5–8% у порівнянні з повним поверненням до вихідної твердості при відсутності додаткової деформації.

Для визначення впливу додаткової деформації на розмір субст-

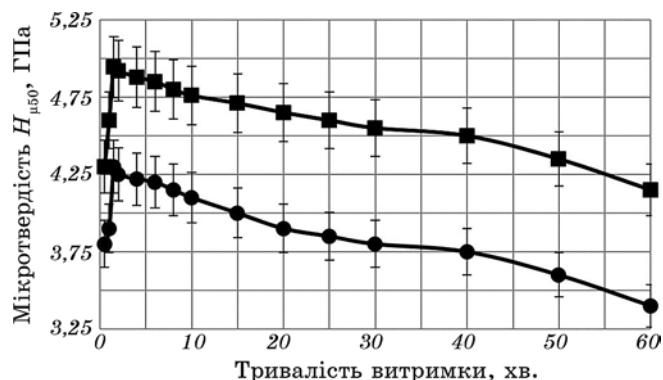


Рис. 8. Залежність мікротвердості на глибині 60 мкм від тривалості витримки при термічній обробці: ■ — електродугових покриттів з дроту 12X18H9T, • — плазмових з порошку ПР-Х18Н9.

Fig. 8. The dependence of the microhardness on the depth 60 μm vs. exposure time during heat treatment: ■—electric arc coatings from wire 12Kh18N9T, •—plasma from powder PR-Kh18N9.

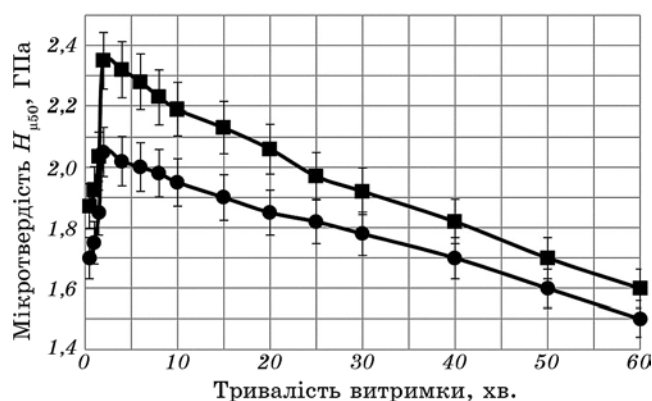


Рис. 9. Залежність мікротвердості на глибині 60 мкм від тривалості витримки при термічній обробці: ■ — електродугових покриттів з дроту БрАМц 9-2, • — плазмових з порошку ПГ-19М-01.

Fig. 9. The dependence of the microhardness on the depth 60 μm vs. exposure time during heat treatment: ■—electric arc from BrAMts 9-2, •—plasma from powder PG-19M-01.

руктури обчислювали значення ОКР зразків (рис. 11).

Згідно з наведеними даними, при підвищенні тривалості витримки спостерігається незначне збільшення розміру ОКР. Витримка, що відповідає максимуму твердості, характеризується найменшим значенням ОКР. Отже, чим дрібніша сформована у результаті дробоструменевої обробки субструктура, тим вище твердість покриття.

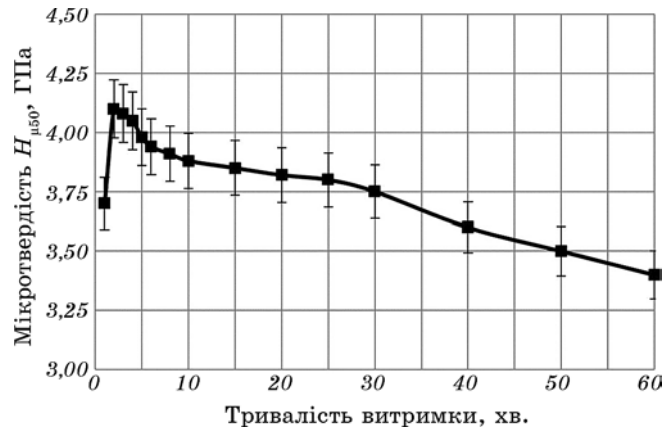


Рис. 10. Залежність мікротвердості на глибині 60 мкм від тривалості витримки при термічній обробці електродугових покриттів з дроту 65Г.

Fig. 10. Dependence of the microhardness at depth of 60 μm vs. heat treatment exposure time duration for electric arc coatings from wire 65G.

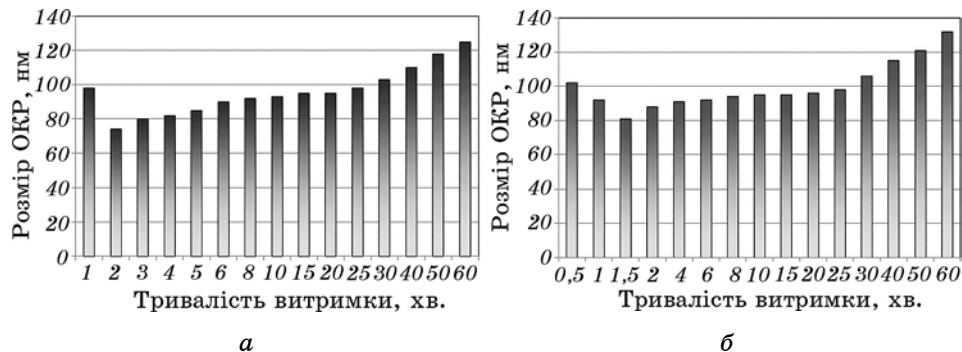


Рис. 11. Залежність розміру ОКР від тривалості витримки при деформаційно-термічній передрекristалізаційній обробці: електродугових покриттів з дроту 65Г (а), плазмових покриттів з порошку ПР-Х18Н9 (б).

Fig. 11. Dependence of the size of coherent scattering regions vs. exposure time of pre-recrystallization deformation-heat treatment: electric arc coatings from wire 65G (a), plasma coatings from powder PR-Kh18N9 (b).

При витримках від 6 до 25 хв спостерігається стабілізація розміру ОКР покриттів, що корелює з відносно постійними значеннями твердості у цьому ж часовому інтервалі.

Таким чином, дробоструменева обробка забезпечує стабілізацію полігонізаційної субструктури при термічній обробці до тривалості витримки 30–40 хв. У цьому діапазоні не відбувається значного зниження твердості матеріалу покриттів та підвищення значень середнього розміру субзерен у порівнянні зі станом після ППД.

Однією з найважливіших характеристик покриття є його міцність зчеплення з основою. Для отримання результатів по міцності зчеплення покриттів напорошення на одному режимі виконували в один прохід на 5 зразках, які виготовляли з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45. Перед нанесенням покриттів поверхню, яка підлягала напорошенню, обезжирювали технічним етанолом та піддавали струменево-абразивній обробці. Товщина нанесених покриттів складала 0,5–0,6 мм. Для кожного режиму проводили по 5 паралельних дослідів. Обробку результатів міцності зчеплення проводили методами математичної статистики [12]. Визначення середньої міцності зчеплення розраховували з довірчою ймовірністю 0,95. Результати визначення міцності зчеплення напорошених та оброблених покриттів із зазначених матеріалів наведено на рис. 12.

Згідно з представленими даними, проведення передрекристилізаційної термічної обробки покриттів забезпечує підвищення міцності зчеплення на 30–40% у порівнянні з покриттями після напорошення, ймовірно, за рахунок зменшення внутрішніх напружень. Так, найбільш помітний приріст міцності зчеплення спостерігається для покриттів із неіржавких сталей, оскільки температура термічної обробки таких покриттів найвища. Подальша дробоструменева обробка знижує міцність зчеплення покриттів на 10–15% у порівнянні з покриттями після напорошення, 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.

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. Перед нанесенням покриття колодку та диск знежирювали технічним спиртом і піддавали струменево-абразивній обробці.

Диски піддавалися термічному поліпшенню. Гартування сталевих дисків та колодок здійснювали від температури 840°C з витримкою протягом 50 хв. Охолодження виконували у воді. Після гар-

тування твердість складала 54–55 HRC. Потім проводили відпуск при температурі 550°C, витримували протягом 1 години і охолоджували на повітрі. Твердість після відпуску складала 30–32 HRC.

Отримані зразки встановлювалися на вали машини тертя СМЦ-2 таким чином, щоб радіальне биття їх при провертанні валів вручну не перевищувало 0,1 мм. Далі проводили прироблювання колодки до диску при окружній швидкості обертання диска 1,3 м/с і тиску на колодку 1 МПа. Притирання проводили до тих пір, поки не притерлося 90% площі покриття.

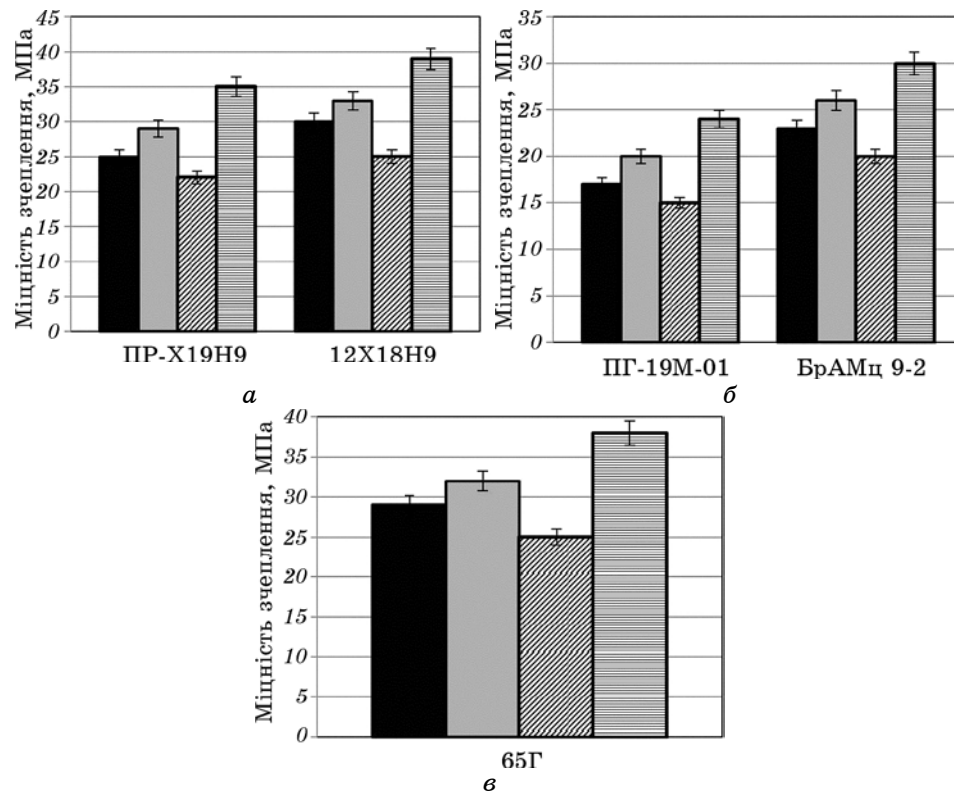


Рис. 12. Результати визначення міцності зчеплення плазмових покриттів з порошків ПР-Х18Н9, ПГ-19М-01 та електродугових покриттів з дротів 12Х18Н9Т, БрАМц 9-2 та 65Г: ■ — після напорошення, □ — напорошення + термічна обробка, ▨ — напорошення + ППД, ▩ — напорошення + ППД + термічна обробка.

Fig. 12. Results of determination of the adhesion strength of plasma coatings from powders PR-Kh18N9, PG-19M-01 and electric arc coatings from wires 12Kh18N9T, BrAMts 9-2, and 65G: ■—after spraying, □—spraying + heat treatment, ▨—spraying + surface plastic deformation (SPD), ▩—spraying + SPD + heat treatment.

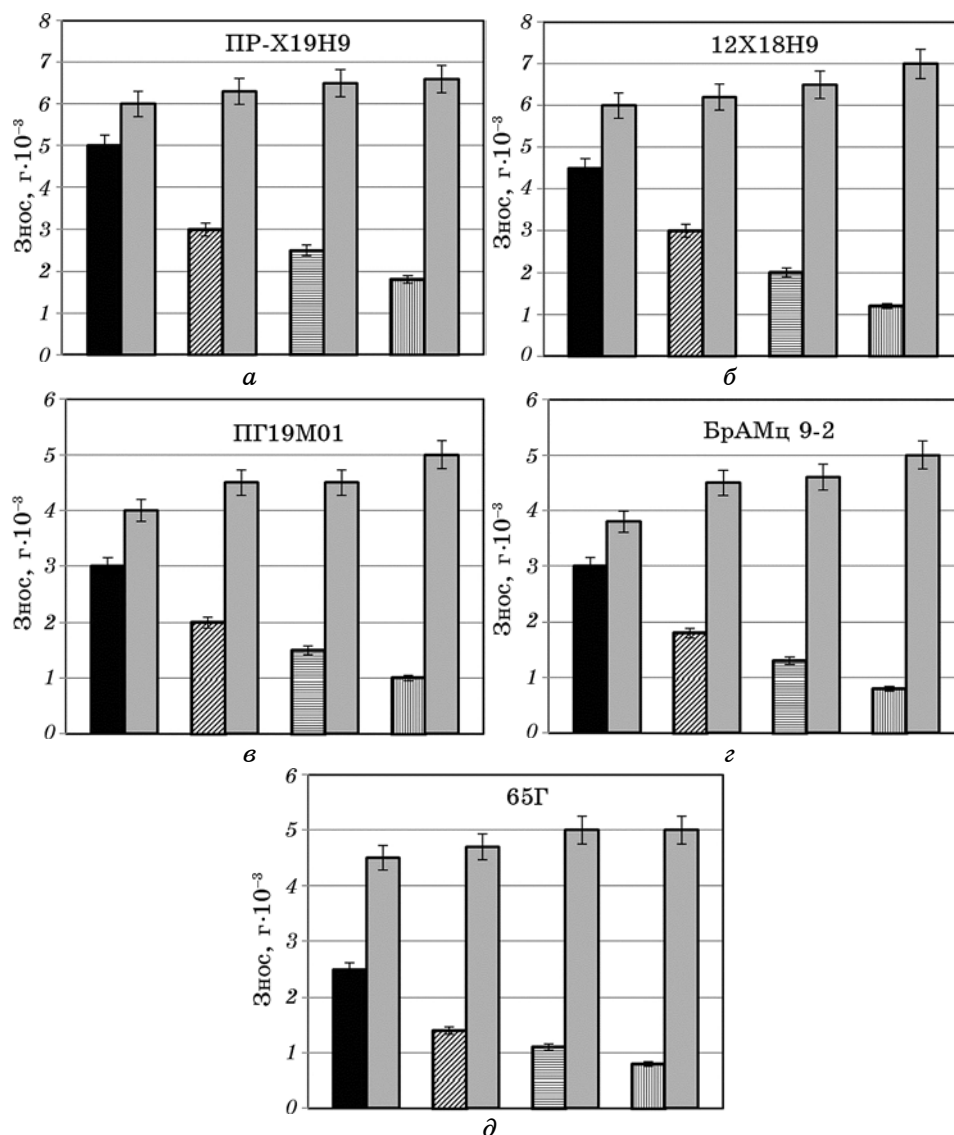


Рис. 13. Результати визначення зносостійкості плазмових (а, в) та електродугових покриттів (б, г, д) із зазначених матеріалів: ■ — після напорошення, □ — напорошення + термічна обробка, ▨ — напорошення + ППД, ▩ — напорошення + ППД + термічна обробка, ▤ — контртіло.

Fig. 13. Results of determination of the wear resistance of plasma (a, v) and electric arc coatings (б, г, д) from specified materials: ■—after spraying, □—spraying + heat treatment, ▨—spraying + SPD, ▩—spraying + SPD + heat treatment, ▤—counterface.

Для змащування пари тертя використовували моторне мастило марки М10Г2К ГОСТ 8581-75. Швидкість подачі мастила складала 1 г/хв, окружна швидкість обертання диска — 0,8 м/с, тиск на колодку — 4 МПа.

Знос покриттів визначали за втратою маси зразка через кожні 10 км пройденого шляху. Результати визначення зносостійкості напорошених та оброблених покриттів із зазначених матеріалів наведено на рис. 13.

Згідно з представленими даними, ПТО плазмових та електродугових покриттів забезпечує підвищення зносостійкості від 30% (бронзові покриття) до 45% (покриття з неіржавкої сталі та 65Г) у порівнянні зі станом після напорошення.

Ефект збільшення зносостійкості покриттів корелює з ефектом підвищення їх твердості. Після дробоструменевої обробки зносостійкість покриттів також зростає від 40% для бронзових покриттів до 50% для неіржавких внаслідок значного зміцнення поверхневого шару. Для останніх покриттів характерне деформаційне зміцнення за рахунок формування α' -фази мартенситного типу, що й пояснює високу зносостійкість після ППД.

Термічна обробка оброблених покриттів забезпечує подальше зменшення зносу внаслідок підвищення твердості шару за рахунок формування здрібненої полігонізаційної субструктури. Знос контртіла обернено пропорційний зносу покриття: чим більша твердість та зносостійкість покриття, тим більше зношується контртіло, але остання характеристика зростає менш динамічно, ніж твердість покриття. Так, наприклад, при підвищенні зносостійкості покриття з дроту 65Г після ППД та термічної обробки на 68% у порівнянні зі станом після напорошення, знос контртіла збільшився лише на 10%.

На рисунку 14 наведено результати вимірювання сумарного зносу пар тертя (покриття + контртіло) після напорошення та подальшої поверхневої пластичної деформації і передрекристалізаційної термічної обробки. Згідно з представленими даними при однакових умовах випробувань пар тертя встановлено, що плазмові покриття з неіржавкої сталі ПР-Х18Н9 та електродугові з 12Х18Н9 мають приблизно однаковий рівень зносу. Аналогічна залежність зносу спостерігається і для пар тертя з бронзовими покриттями — плазмовими з ПГ-19М-01 та електродуговими з БрАМц 9-2.

Найменший сумарний знос (рис. 14) має пара тертя з електродуговим покриттям з 65Г після ППД і ПТО, який приблизно на 35% менший, ніж у пар тертя з неіржавких сталей (ПР-Х18Н9 і 12Х18Н9), та на 9% менший, ніж у бронзових покриттів (ПГ-19М-01 і БрАМц 9-2).

За результатами експериментальних досліджень експлуатаційних властивостей можна зробити висновок, що найбільш перспек-

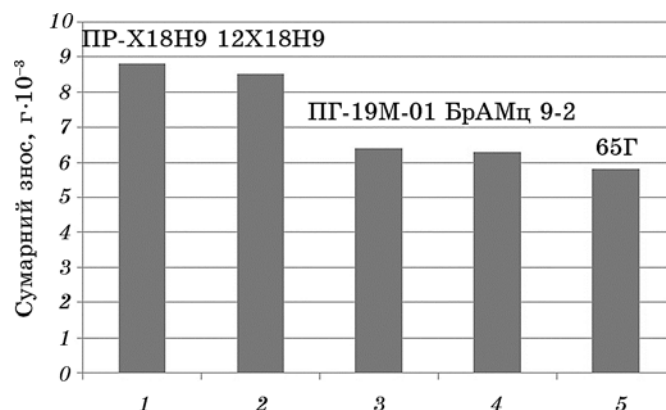


Рис. 14. Результати визначення сумарної зносостійкості (покриття + контртіло) плазмових (1, 3) та електродугових покриттів (2, 4, 5) із зазначених матеріалів.

Fig. 14. Results of determination of total wear resistance (coating + counterface) of plasma (1, 3) and electric arc coatings (2, 4, 5) from specified materials.

тивними з точки зору зносостійкості, технологічності та собівартості є електродугові покриття, нанесені з дроту марки 65Г з наступною ППД та ПТО, які мають достатньо високу міцність зчеплення з основою і не поступаються якості плазмовим покриттям.

Таким чином, запропонований спосіб підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей плазмових та електродугових покриттів дозволяє регулювати їх структуру та властивості, підбираючи мінімальний сумарний знос пари тертя.

4. ВИСНОВКИ

1. Забезпечення подальшої деформації пресуванням електродугових покриттів з Св-08Г2С та 12Х18Н10Т дозволяє збільшити час витримки при передрекристалізаційній термічній обробці (до 15–40 хв) без суттєвого зменшення твердості (на 3–7%), ймовірно, за рахунок зниження рухливості малокутових полігонізаційних субмеж.

2. Досліджено вплив ППД дробоструменевою обробкою на можливість формування стабільної полігонізаційної субструктури у напорошених покриттях ПТО. Мікротвердість електродугового покриття з дроту 12Х18Н10Т максимально підвищується при витримці 1,5 хв з 4 ГПа до 5 ГПа (+20%), з БрАМц 9-2 — при 2 хв з 2 ГПа до 2,35 ГПа (+17%), з 65Г — при 2 хв з 3,25 ГПа до 4,1 ГПа (+26%). Аналогічно для плазмових покриттів — з ПР-Х18Н9 при витримці

1,5 хв з 3,5 ГПа до 4,3 ГПа (+23%), з ПГ-19М-01 — при 2 хв з 1,8 ГПа до 2,05 ГПа (+11%). 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.

3. Встановлено, що проведення ПТО покриттів забезпечує підвищення міцності зчеплення на 30–40% у порівнянні з покриттями зі згаданих матеріалів після напорошення за рахунок зменшення внутрішніх напружень. ПТО додатково деформованих покриттів забезпечує більше підвищення міцності зчеплення у порівнянні з термообробленими покриттями без деформації за рахунок більшої тривалості витримки та ефективнішого зняття внутрішніх напружень, які виникли у процесі формування покриттів та їх ППД.

4. Показано, що ПТО електродугових та плазмових покриттів забезпечує підвищення зносостійкості від 30% (бронзові покриття) до 45% (покриття з неіржавкої сталі на 65Г) у порівнянні зі станом після напорошення. Після дробоструменевої обробки зносостійкість покриттів також зростає від 40% для бронзових покриттів до 50% для неіржавких внаслідок значного зміцнення поверхневого шару. ПТО оброблених покриттів забезпечує подальше зменшення зносу до 70% внаслідок підвищення твердості покриття за рахунок формування дрібної полігонізаційної субструктури.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. R. Vaßen, H. Kaßner, G. Mauer, and D. Stöver, *J. Thermal Spray Technology*, **19**, Iss. 1–2: 219 (2010).
2. B. H. Kear, R. K. Sadangi, M. Jain, R. Yao, Z. Kalman, G. Skandan, and W. E. Mayo, *J. Thermal Spray Technology*, **9**, Iss. 3: 399 (2000).
3. В. И. Калита, В. В. Яркин, А. В. Касимцев, Г. У. Лубман, *Физика и химия обработки материалов*, № 5: 29 (2006).
4. Ю. К. Ковнеристый, *Металловедение и термическая обработка*, № 7: 14 (2005).
5. Н. В. Куракова, В. В. Молоканов, В. И. Калита, *Физика и химия обработки материалов*, № 4: 36 (2007).
6. В. П. Алехин, Е. А. Лесюк, А. И. Капранова, *Перспективные технологии и оборудование для материаловедения, микро- и нанoeлектроники* (Астрахань: МГНУ: 2006).
7. А. В. Воронов, *Физическая мезомеханика*, № 8: 113 (2005).
8. О. М. Дубовий, М. М. Бобров, Ю. Є. Неделько, О. В. Чечель, *Збірник наукових праць НУК*, № 4: 35 (2016).
9. О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, М. М. Бобров, О. О. Жданов, Т. О. Макруха, Ю. Є. Неделько, *Металлофиз. новейшие технол.*, **39**, № 2: 209 (2017).
10. Л. Г. Одинцов, *Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник* (Москва: Машиностроение: 1987).

11. Г. М. Бородулин, Е. И. Мошкевич, *Нержавеющие стали* (Москва: Металлургия: 1973).
12. С. Й. Пінчук, *Організація експерименту при моделюванні та оптимізації технічних систем* (Дніпропетровськ: Дніпро-VAL: 2009).

REFERENCES

1. R. Vaßen, H. Kaßner, G. Mauer, and D. Stöver, *J. Thermal Spray Technology*, **19**, Iss. 1–2: 219 (2010).
2. B. H. Kear, R. K. Sadangi, M. Jain, R. Yao, Z. Kalman, G. Skandan, and W. E. Mayo, *J. Thermal Spray Technology*, **9**, Iss. 3: 399 (2000).
3. V. I. Kalita, V. V. Yarkin, A. V. Kasimtsev, and G. U. Lubman, *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, No. 5: 29 (2006) (in Russian).
4. Yu. K. Kovneristyy, *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka*, No. 7: 14 (2005) (in Russian).
5. N. V. Kurakova, V. V. Molokanov, and V. I. Kalita, *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, No. 4: 36 (2007) (in Russian).
6. V. P. Alekhin, E. A. Lesyuk, and A. I. Kapranova, *Perspektivnye Tekhnologii i Oborudovaniye dlya Materialovedeniya, Mikro- i Nanoelektroniki* [Perspective Technologies and Equipment for Materials Science, Micro- and Nanoelectronics] (Astrakhan': MGNU: 2006) (in Russian).
7. A. V. Voronov, *Fizicheskaya Mezomekhanika*, No. 8: 113 (2005) (in Russian).
8. O. M. Dubovyy, M. M. Bobrov, Yu. Ye. Nedel'ko, and O. V. Chechel', *Zbirnyk Naukovykh Prats' NUK*, No. 4: 35 (2016) (in Ukrainian).
9. O. M. Dubovyy, A. A. Karpechenko, M. M. Bobrov, O. O. Zhdanov, T. O. Makrukha, and Yu. E. Nedelko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 2: 209 (2017) (in Ukrainian).
10. L. G. Odintsov, *Uprochnenie i Otdelka Detaley Poverkhnostnym Plasticheskim Deformirovaniem: Spravochnik* [Hardening and Conditioning of Parts by Surface Plastic Deformation: Handbook] (Moscow: Mashinostroenie: 1987) (in Russian).
11. G. M. Borodulin and E. I. Moshkevich, *Nerzhaveyushchie Stali* [Stainless Steel] (Moscow: Metallurgiya: 1973) (in Russian).
12. S. Y. Pinchuk, *Orhanizatsiya Eksperymentu pry Modelyuvanni ta Optymizatsiyi Tekhnichnykh System* [Experiment Organization in the Simulation and Optimization of Technical Systems] (Dnipropetrovsk: Dnipro-VAL: 2009) (in Ukrainian).