

## ПІДВИЩЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ ФОРМУВАННЯМ ПОЛІГОНІЗАЦІЙНОЇ НАНОМАСШТАБНОЇ СУБСТРУКТУРИ

Дубовий О. М., Карпеченко А. А., Бобров М. М.

### ВСТУП

Консолідовані наноматеріали на даний час не набули широкого застосування через високу вартість, складність технології отримання тощо. Більш доступними є покриття з наноструктурними елементами. Формування напиленого покриття з наномасштабними структурними елементами можливо також при використанні нанорозмірних порошків при стандартних методах напилення, таких як плазмове. Великі труднощі мають місце при транспортуванні і подачі до пальника порошку розміром фракції менше 10 мкм. Такі порошки не можуть бути заздалегідь підготовленими і вирівняними за розміром, так як вони не піддаються ситовому аналізу. Для них застосовують інші методи класифікації (наприклад аеродинамічну класифікацію), що, в свою чергу, ускладнює технологічний процес отримання порошків з заданим розміром. Дрібні порошки (розміром менше 10 мкм) із-за сил молекулярного зчеплення створюють конгломерати з декількох частинок при подачі їх потоком транспортуючого газу, тому на їх основі готують суспензії або агломерати<sup>1,2</sup>, що значно ускладнює технологічний процес отримання покриттів. Від розміру частинок при нанесенні покриттів залежить і їхня швидкість руху в високотемпературному струмені. Цікавим є те, що дрібні порошокинки, порівняно з крупними, скоріше набирають швидкість та скоріше її втрачають<sup>3</sup>. Для отримання нанорозмірних елементів у структурі покриття не обов'язково застосовувати ультрадисперсні порошки. Так застосовується формування наноструктурних зміцнюючих елементів при розпаді

---

<sup>1</sup> Siegmann, S., Brandt O., Drovak M. Thermally sprayed wear resistant coatings with nanostructured hard Journal of Thermal Spray Technology. 2004. Vol. 13(1). P. 37–43.

<sup>2</sup> Tingaud, O., Denoirjean A., Couder J-F. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> finely structured multilayer architectures from suspension plasma spraying. Journal of Thermal Spray Technology. 2010. Vol. 19 (1-2). P. 207 – 218.

<sup>3</sup> Кудинов, В. В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория технология и оборудование М.: Металлургия, 1992. 250 с.

аморфної фази<sup>4</sup>, створення нанокристалічного стану в поверхневому шарі ультразвуковою і комбінованими обробками<sup>5,6</sup>.

Відомо<sup>7</sup>, що при формуванні покриття процеси удару і деформації частинок супроводжуються їх кристалізацією, причому більш інтенсивно фронт кристалізації рухається від поверхні основи у глиб частинки. До того ж слід відмітити, що при реальних умовах напилення за період кристалізації частинки на підкладці ймовірність попадання в неї напилюваної частинки практично виключена навіть на осі струменя при максимальному значенні коефіцієнта зосередженості<sup>8</sup>. Також гаряча деформація з високими швидкостями та ступенями з наступним швидким охолодженням матеріалу нижче температури рекристалізації зберігає наклеп, а при плазмовому і електродуговому напиленні покриттів швидкість охолодження деформованої частинки може досягати  $10^8$  К/с<sup>9</sup>. Така висока швидкість охолодження виключає протікання процесів динамічної рекристалізації у матеріалі покриття і зберігає деформований стан, тому актуальним є дослідження можливості проведення передрекристалізаційної термічної обробки (ПТО) для забезпечення підвищення властивостей напилених покриттів.

### **1. Вплив передрекристалізаційної термічної обробки на властивості електродугових покриттів**

Електродугове напилювання виконували на установці КДМ-2 електродуговим розпилювачем ЕМ-14М – дрти ( $d = 2$  мм) Св08Г2С, 12Х18Н9Т. Покриття наносили на пластини із Ст3 розміром  $25 \times 60 \times 5$  мм після знежирювання і струменево-абразивної обробки на установці 026-7 «Ремдеталь». Товщина покриттів складала 0,4...0,6 мм. Твердість електродугових покриттів із Св08Г2С після

---

<sup>4</sup> Калита В. И., Яркин В.В., Касимцев А.В. Формирование наноразмерных упрочняющих фаз в плазменных покрытиях из сталей, чугунов и сплавов на основе железа. Физика и химия обработки материалов. 2006. № 5. С. 29 – 40.

<sup>5</sup> Васильев М.О., Мордюк Б.М., Сидоренко С.И. та ін. Синтез деформаційних нанокомпозитів на поверхні алюмінієвого сплаву Д16 за допомогою ультразвукового ударного оброблення Металофізика та новітні технології. 2016. № 4. С. 545-563.

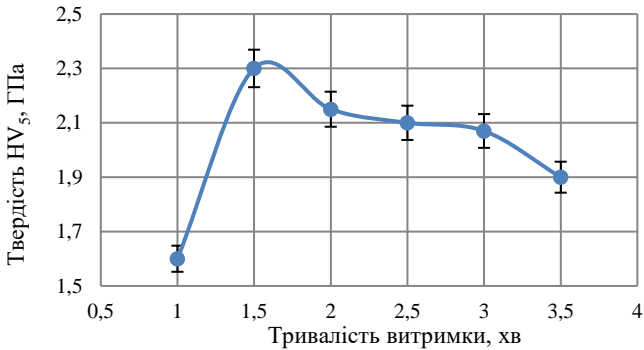
<sup>6</sup> Ivannikov A.Y., Kalita V.I., Komlev D.I. The Effect of Electromechanical Treatment on Structure and Properties of Plasma-Sprayed Fe-30Cr Coatingю Journal of Thermal Spray Technology. 2019. № 28. P. 883-892.

<sup>7</sup> Петров, С.В., Карп И.Н. Плазменное газоздушное напыление К: Наукова думка, 1993. 493 с.

<sup>8</sup> Кудинов, В.В., Иванов В.М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий / М.: Машиностроение, 1981. – 192 с.

<sup>9</sup> Анциферов В. Н, Шмаков А.М., Агеев С.С. Газотермические покрытия. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. 320 с.

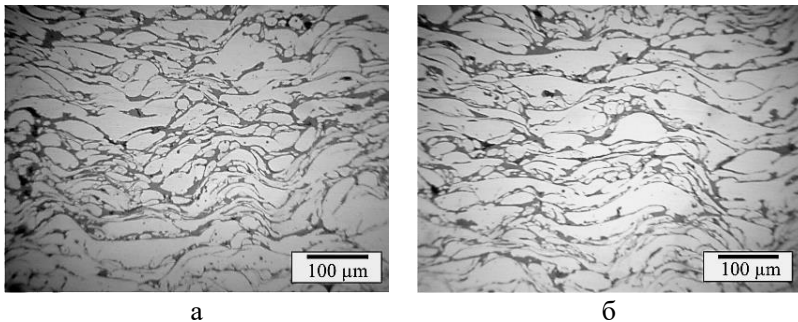
напилення складала 1,64 ГПа. Після термічної обробки при температурі 500 °С, яка відповідає температурі первинної рекристалізації цього матеріалу, максимальне значення твердості (2,32 ГПа) спостерігається після витримки 1,5 хв, що на 40 % більше від твердості в стані після напилення (рис. 1).



**Рис. 1. Залежність твердості електродугового покриття Св08Г2С від часу витримки при термічній обробці**

Аналогічні дослідження проводили і для покриттів з неіржавіючої сталі. Максимальні значення твердості отримали при температурі 880°С та часі витримки 2 хв.

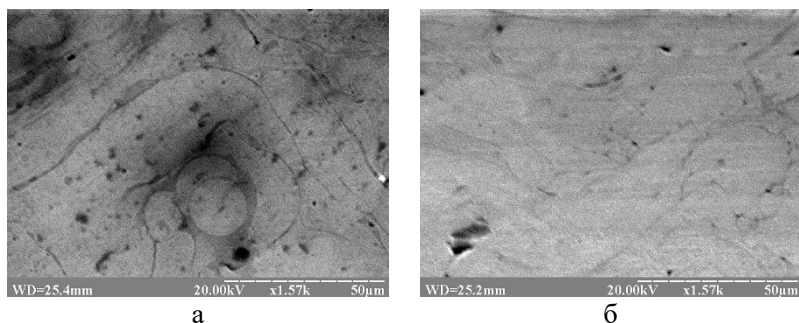
Аналіз мікроструктур отриманих за допомогою оптичного мікроскопа (рис. 2 а, б) напилених покриттів з дроту Св-08Г2С показав, що змін у структурі покриття не відбувається. Спостерігається типова луската мікроструктура.



**Рис. 2. Мікроструктури електродугових покриттів з дроту Св-08Г2С**

**а – після напилення; б – після ПТО на оптимальному режимі**

Дослідженнями на більш великих збільшеннях (1570 крат) за допомогою растрової електронної мікроскопії (РЕММА 102-02) електродугових покриттів з дроту Св-08Г2С (рис. 3), встановлено, що розмір структурних складових після термічної обробки не змінився.



**Рис. 3. Мікроструктура електродугових покриттів з дроту Св-08Г2С:**  
**а – після напильня; б – після ПТО**

Вплив тривалості термічної обробки при температурі первинної рекристалізації на субструктуру напильних покриттів оцінювали за розміром областей когерентного розсіювання (ОКР) рентгенівських променів (показано в таблиці 1).

З наведених у таблиці даних випливає, що розмір ОКР після ПТО, який забезпечує максимальну твердість, у 1,5...2,3 рази менший у порівнянні зі станом після напильня. При збільшенні тривалості ПТО до 20 хв розмір ОКР збільшується, що пов'язано з активізацією рекристалізаційних процесів, а саме коагуляцією субзерен та збільшенням їх розмірів.

Таблиця 1

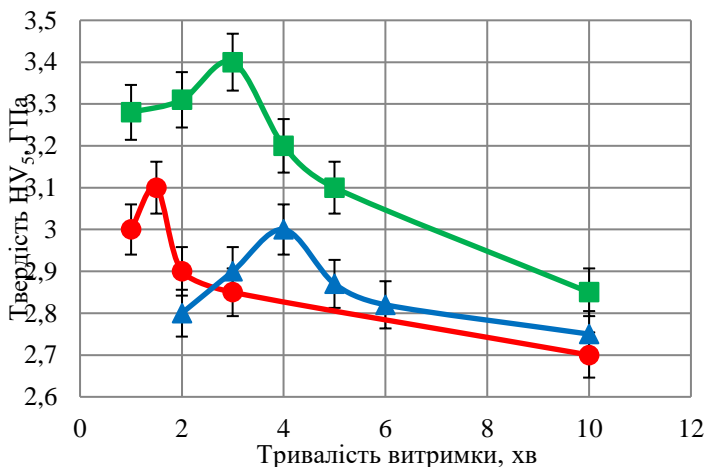
**Розмір ОКР електродугових покриттів**

Матеріал покриття	Термообробка	Фізичне розширення відображень, град		Розмір ОКР, нм
		(110)	(310)	
Св-08Г2С	Без термообробки	1,15	0,98	106
	500 °С, 1,5хв	1,25	1,05	61,9
	500 °С, 20 хв	1,12	0,88	118
12Х18Н9Т	Без термообробки	-	-	144
	880 °С, 2 хв	-	-	76
	880 °С, 20 хв	-	-	>200

При дослідженні впливу ПТО, яка забезпечує максимальні значення твердості в електродугових покриттях із 12Х18Н9Т, на теплопровідність виявлено середнє зменшення коефіцієнта теплопровідності на 40 %. При цьому збільшення величини деформації викликає більший ефект зниження теплопровідності.

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

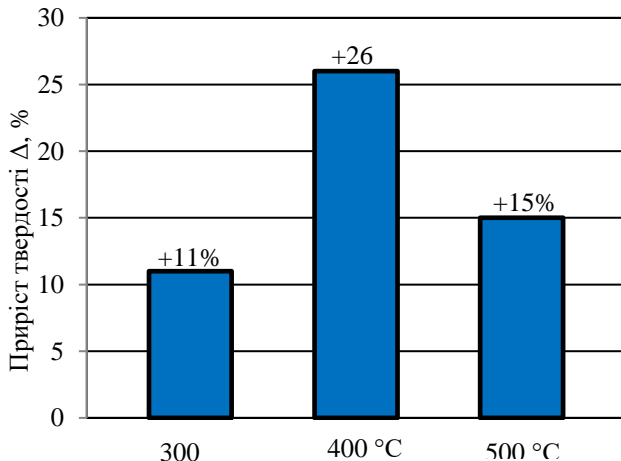
Спочатку визначали оптимальні температурно-часові параметри ПТО напилених покриттів. З практики попередніх досліджень обрали температурний інтервал 300...500°C з кроком у 100°C. Оптимізацію проводили за показниками твердості HV<sub>5</sub> (рис. 4). Твердість покриттів після напилення складала 2,7 ГПа.



**Рис. 4. Залежність твердості електродугових покриттів отриманих з дроту 65Г від температурно-часових параметрів ПТО: ▲ – 300 °С; ■ – 400 °С; ● – 500 °С**

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 зафіксовано при витримці 4 хв і складає 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 – 3,1 ГПа. Отже, при підвищенні температури точка максимального зміцнення зміщується у діапазон менших витримок, що пов'язано, можливо, зі збільшенням швидкості полігонізаційних процесів за рахунок термічної активації. Залежність приросту твердості від температури нагрівання при термічній обробці наведено на рис. 5.



**Рис. 5. Залежність приросту твердості електродугового покриття з дроту 65Г від температури при ПТО**

Згідно з приведеними даними, залежність теж носить екстремальний характер. Максимальний приріст твердості спостерігається при температурі 400 °С. Таким чином, для електродугового покриття з дроту 65Г оптимальними температуро-часовими параметрами ПТО є: температура 400 °С, витримка протягом 3 хв.

Розмір ОКР визначали за формулою Шеррера і методом гармонійного аналізу<sup>10</sup>, як і кількість наноструктурних елементів (<100 нм) і кут розорієнтування субзерен<sup>11</sup> для напилених і

<sup>10</sup> Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический анализ и электронно-оптический анализ Москва:МИСИС, 1994. 328 с.

<sup>11</sup> Задоян Д.М., Азизбекян Л. А., Валуженич М. К. Определение плотности избыточных дислокаций по рентгенографическим оценкам размеров кристаллических блоков и разориєнтування малоугольных границ Вестник Самарского государственного технического университета. 2003. №19. С. 177.

термооброблених зразків (табл. 2 ). Наведені дані свідчать, що істотне зменшення розміру ОКР і отримання максимальної кількості наноструктурних елементів забезпечує ПТО при температурі 400°C протягом 3 хв, що обумовлено отриманням наномасштабних елементів субструктури (близько 100 нм).

Таблиця 2

**Розміри ОКР, кількість наноструктурних елементів та кут розорієнтування субзерен напилених та термооброблених покриттів зі сталі 65Г, визначені за формулою Шеррера та гармонійним аналізом**

Вид обробки покриття	Розмір ОКР, нм		Відхилення, %	Кількість наноструктурних елементів, %	Кут розорієнтування субзерен, град
	За формулою Шеррера	Гармонійний аналіз			
Після напилення	149	121	18,8	21	0,10
300С, 4 хв	148	118	20,3	26	0,12
400 С, 3 хв	106	86	19,8	33	0,15
500 С, 1,5 хв	124	99	20,2	27	0,13

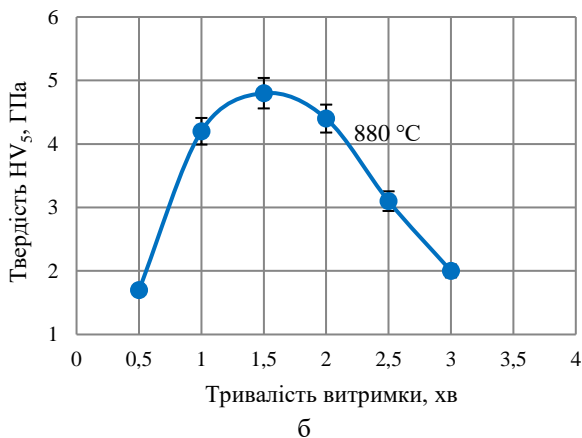
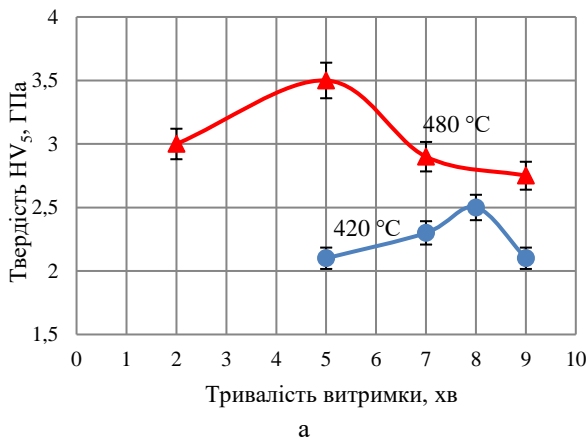
**2. Вплив режиму передрекристалізаційної термічної обробки на властивості плазмових покриттів**

Для плазмового напилування покриттів на установках «Київ-7» та УПУ-3Д використовували порошки фракції 40...80 мкм нержавіючої сталі ПХ18Н15, нікелю ПНК-2К10. Дослідження впливу часу витримки зразків з плазмовими покриттями з ПНК-2К10 при температурі початку первинної рекристалізації 480 і 420°C (рис. 6) показало, що твердість HV5 спочатку підвищується, досягає максимальних значень і далі знижується.

Після напилування покриттів на установці «Київ-7» (повітря) твердість зразків складала 2,05 ГПа (дослід 1), а на установці УПУ-3Д (аргон) – 1,4 ГПа (дослід 2). Режими напилування в досліді 1 забезпечували більш високу швидкість частинок порошку, ніж у досліді 2, що відповідає більшій деформації при формуванні покриття.

Максимальна твердість досягається після термічної обробки при 480 °С з витримкою 5 хв (охолодження на повітрі) і складає 3,45 ГПа (дослід 1) та 2,05 ГПа (дослід 2). При 420 °С максимальне значення твердості 2,75 ГПа (дослід 1) досягається після витримки 5 хв. Отримані показники на 30...70 % вищі від твердості цих покриттів у

стані після напилення. Термічна обробка покриття з ПНК-2К10 (дослід 1) при температурі 640 °С, яка вища від температури первинної рекристалізації, не привела до значного підвищення твердості – 2,24 ГПа.



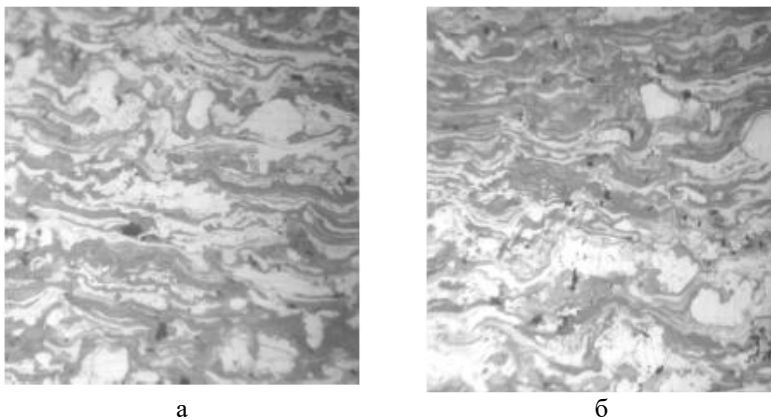
**Рис. 6. Залежність твердості покриття ПНК-2К10 (а) та ПХ18Н15 (б) від температури і часу витримки при термічній обробці**

Аналогічна залежність твердості від часу витримки при температурі первинної рекристалізації спостерігається при термічній обробці зразків з плазмовими покриттями з ПХ18Н15, напиленими



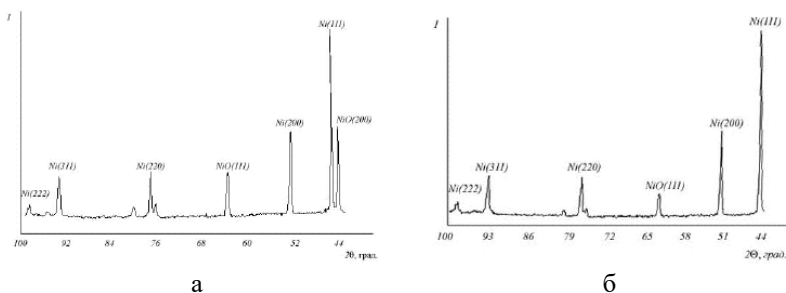
на установці «Київ-7» (повітря) на режимах, що забезпечують різну величину деформації частинок порошку при формуванні покриття (див. рис. 6).

Режим напилювання плазмового покриття в досліді 3 забезпечував меншу деформацію частинок порошку, ніж у досліді 4. Максимальне значення твердості для обох дослідів досягається після витримки 1,5 хв (при 880 °С) і складає відповідно 1,58 і 3,63 ГПа. Дослідження мікроструктури плазмових покриттів із ПНК-2К10 на оптичному металографічному мікроскопі МИМ-7 при збільшенні  $\times 500$  (рис.7 ) і на електронному мікроскопі РЭММА-102-02 при збільшенні  $\times 3000$  показали, що зміни в мікроструктурі покриттів до і після термічної обробки не спостерігаються. Це свідчить про те, що зміцнюючий ефект забезпечують структурні елементи розміром менше 0,5 мкм.



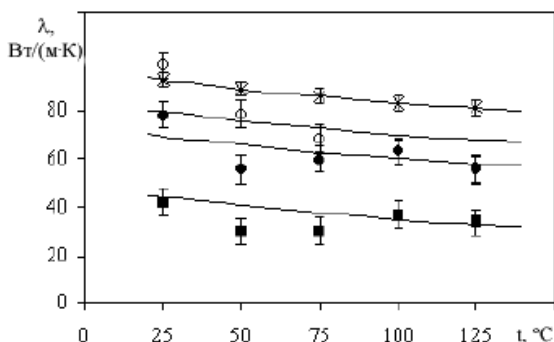
**Рис. 7. Мікроструктура плазмових покриттів із ПНК-2К10 ( $\times 500$ ): а – покриття без термічної обробки; б – покриття після термічної обробки (480°С, витримка 5 хв)**

Рентгенофазовим аналізом плазмових покриттів із ПНК-2К10 (рис. 8) встановлено, що кількість кристалічних фаз у них складає не менше 99 %. На підставі цього можна виключити процес кристалізації з аморфної фази в наведених вище дослідях.



**Рис. 8. Дифрактограми плазових покриттів ПНК-2К10:**  
**а – до термічної обробки; б – після термічної обробки**  
**(480°C, витримка 5 хв)**

Дослідження впливу ПТО, який забезпечує максимальні значення твердості плазового покриття з ПНК-2К10 (рис.9), на теплопровідність показали, що коефіцієнт теплопровідності зменшується в середньому на 30 %.



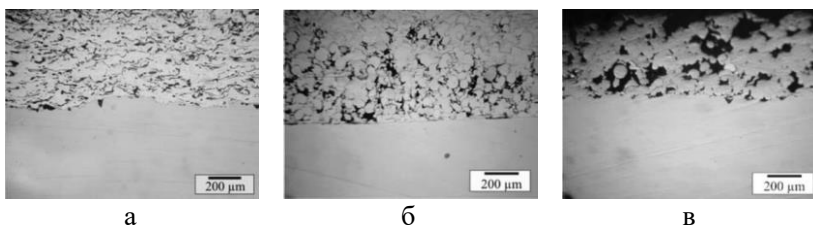
**Рис. 9. Залежність коефіцієнта теплопровідності плазового покриття з ПНК-2К10 від температури випробувань: ○ – покриття без термічної обробки; ■ – покриття після термічної обробки (480°C, 5 хв); ● – покриття після витримки 35 хв при 480°C**

### **3. Вплив режиму передрекристалізаційної термічної обробки на властивості газополумених покриттів**

Газополуменеві покриття з порошоків бронзи марки ПГ-19М-01, нержавіючої сталі – ПРХ18Н9 і ніхрому – ПГ-Х20Н80, наносили за допомогою пальника ГН-3, на такому режимі: тиск ацетилену – 0,01...0,02 МПа, тиск кисню – 0,4...0,5 МПа, дистанція наплення –

100...120 мм. Ситову класифікацію застосовуваних порошків проводили на віброситі СО-130У2, використовуючи сітку номерів 004 і 008 за ГОСТ 6613-86. У результаті виділено порошки фракцією 40...80 мкм, які перед напиленням розміщували в сушильній шафі HSPT-200 за температури 150°C протягом 5 годин. Як підкладку використовували пластини розміром 50×30×4 з конструкційної вуглецевої сталі звичайної якості марки Ст 3. Підготовку поверхні зразків здійснювали безпосередньо перед напиленням.

Аналіз мікроструктури отриманих покриттів (рис.10) показує, що для них характерна луската ламелеподібна будова. Для покриттів з порошку ПРХ18Н9 та ПГ-Х20Н80 притаманна наявність великої кількості не пропалених недеформованих частинок, що пояснюється недостатньою температурою й швидкістю частинок. Ламелі відокремлені одна від одної тонкими оксидними плівками (1 – 2 мкм). Середня висота ламелей для покриття з порошку марки ПГ-19М-01 складає 13 мкм, для ПРХ18Н9 – 18 мкм, для ПГ-Х20Н80 – 25 мкм.



**Рис. 10. Мікроструктури газополумених покриттів з порошків марок: а – ПГ-19М-01; б – ПРХ18Н9; в – ПГ-Х20Н80**

Покриття з порошку марки ПГ-19М-01 має пористість 9 %, з ПРХ18Н9 – 13 %, з ПГ-Х20Н80 – 18 %. Границя поділу покриття – підкладка – для всіх досліджуваних зразків має незначну кількість несучільностей в окремих місцях.

Для вивчення можливості проведення ПТО провели визначення величини деформації напилюваних частинок при формуванні газополумених покриттів за формулою:

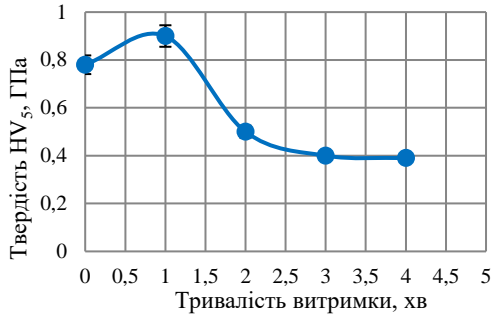
$$\varepsilon = \frac{\bar{d} - h}{\bar{d}} \cdot 100\%,$$

де  $\varepsilon$  – величина деформації частинок, %,  $d$  – середній зважений діаметр частинок, мкм;  $h$  – середня висота ламелей, мкм. Середній зважений діаметр частинок  $\bar{d}$  встановили за гранулометричним

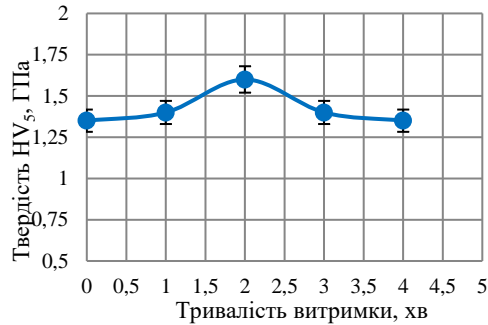
складом напилюваних порошків металографічним методом. У результаті розрахунків встановлено, що середній зважений розмір частинок порошку марки ПГ-19М-01 складає 51 мкм, а величина їх деформації при формуванні газополуменевого покриття –74 %. Для порошків марок ПРХ18Н9 і ПГ-Х20Н80 середній визначений розмір частинок і величина їх деформації відповідно становить: 60 мкм – 70 % і 66 мкм – 62 %. Менша деформація частинок порошків ПРХ18Н9 і ПГ-Х20Н80 порівняно з порошком марки ПГ-19М-01 пояснюється їх вищою температурою плавлення й окисненням у високотемпературному гетерофазному струмені з утворенням тугоплавких оксидів. Отримані зразки з газополуменевим покриттям нагрівали в печі до температури початку первинної рекристалізації матеріалу покриття: з порошку ПГ-19М-01 – до температури 350°C; з ПРХ18Н9 – до 880°C; з ПГ-Х20Н80 –500°C. Результати впливу тривалості витримки на твердість покриттів представлені на рис. 11.

Оптимізацію режиму ПТО покриттів проводили за показниками максимальної твердості за Віккерсом, HV5, які склали: для ПГ-19М-01 – 880 МПа; для ПРХ18Н9 –1630 МПа; для ПГ-Х20Н80 – 2669 МПа. Таким чином, оптимальний режим ПТО, що забезпечує максимальне підвищення твердості бронзового покриття на 14 %, полягає у витримці 1 хв. за температури 350 °С. Оптимальний режим термічної обробки покриття з порошку ПРХ18Н9, який забезпечує підвищення твердості на 36 %, такий: витримка протягом 2 хв за температури 880 °С. Щодо покриття з ніхрому, то максимальне підвищення твердості на 20 % отримали за температури 500 °С і витримки 1 хв. Аналіз знімків мікроструктур покриттів після оптимальної термічної обробки (рис.12) показав, що змін у структурі, крім пористості, покриттів до і після термообробки не виявлено.

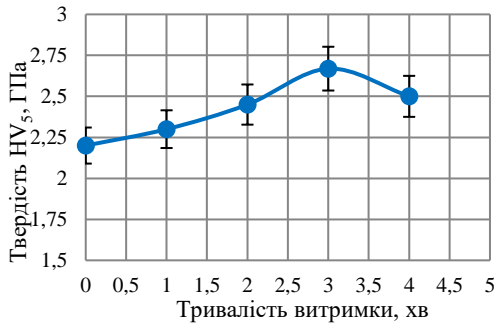
Пористість покриттів зменшилась на 10 % відносно напиленого стану. Далі розглянули зміну величини субструктурних елементів покриттів за оцінкою розмірів областей когерентного розсіювання. Встановлено, що розмір ОКР газополуменевих покриттів після ПТО на оптимальному режимі зменшується порівняно зі станом після напилення. Звідси випливає, що дана термічна обробка призводить до здрібнення субструктури, що створює «розмірний ефект», зокрема підвищення твердості.



а

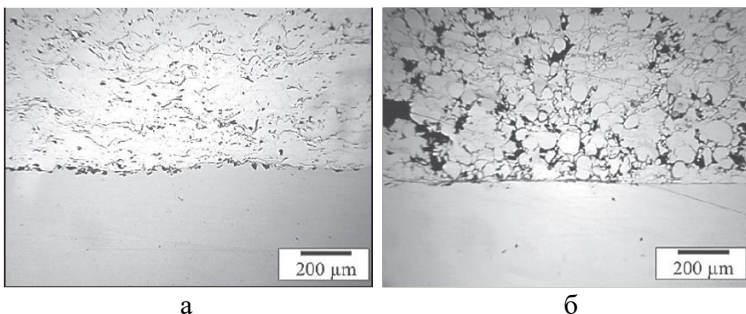


б



в

**Рис. 11. Залежність твердості газополумневих покриттів від тривалості витримки при ПТО: а – ПГ-19М-01; б – ПРХ18Н9; в – ПГ-Х20Н80**

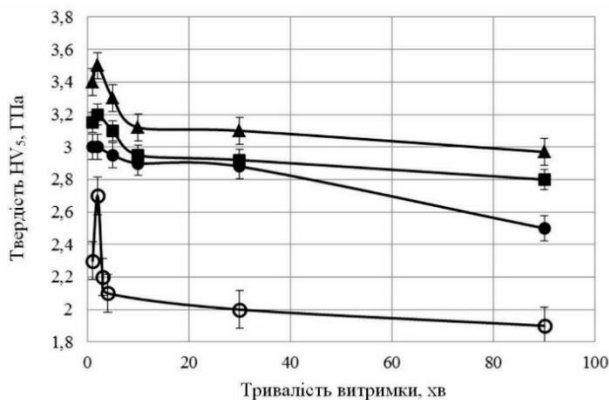


**Рис. 12. Мікроструктури газополуменевих покриттів після ПТО на оптимальному режимі з порошків: а –ПГ-19М-01; б –ПРХ18Н9; в –ПГ-Х20Н80**

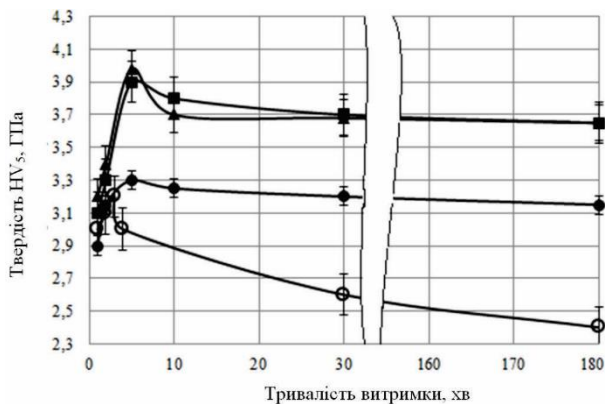
#### **4. Дослідження можливості стабілізації полігонізаційної субструктури у напилених покриттях та її вплив на їх властивості**

Проведені дослідження показують, що отримана у результаті ПТО 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. Тому актуальними є дослідження закономірностей формування термічно стабільної здрібненої і нанорозмірної субструктури з підвищеними фізико-механічними властивостями у напилених покриттях.

ПТО електродугових покриттів з дротів марок Св-08Г2С та 12Х18Н10Т проводили при температурі 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. 13.



а



б

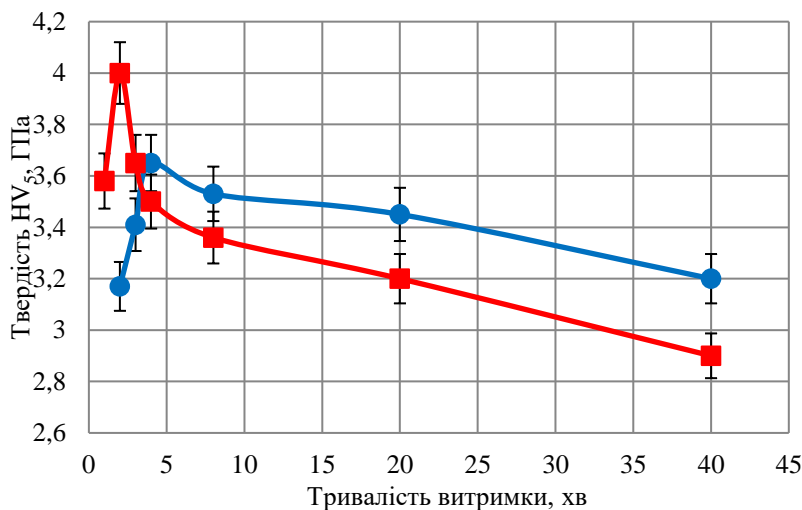
**Рис. 13. Залежність твердості електродугових покриттів із дроту Св-08Г2С (а) та 12Х18Н10Т (б) від тривалості витримки при термічній обробці та ступеня додаткової деформації:**  
**а** – ○ – без деформації; ● – 20 %; ■ – 30 %; ▲ – 40 %;  
**б** – ○ – без деформації; ● – 10 %; ■ – 15 %; ▲ – 20 %

Згідно з наведеними на рис. 13 а даними, використання наступної 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 більше 2 хв (максимум твердості) до 90 хв твердість

знижується на 30%. При використанні деформації покриття на 20%, 30% і 40% та підвищення 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 границям ламелей та руйнування покриття.

Схожа залежність спостерігається і для покриттів, отриманих з дроту 12X18Н10Т (рис.13 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 підвищення 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%.

Аналогічні дослідження проводили і для електродугових покриттів з дроту 65Г. Наступну деформацію покриттів проводили пресуванням на 15% та 30%. Після чого здійснювали ПТО при оптимальній температурі 400 °С. Результати досліджень наведено на рис. 14.



**Рис. 14.** Залежність твердості електродугових покриттів з дроту 65Г від тривалості витримки та ступеня додаткової деформації:

● – 15%; ■ – 30%;



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 4хв до 20хв 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%).

Встановлені залежності пояснюються це тим, що при здійсненні повторної деформації дислокаційна взаємодія закінчується виникненням від 50% до 75% дислокаційних бар'єрів (Хірта, Ломер-Котгрелла) інша бере 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, забезпечують стабілізуючий ефект.

Аналіз мікроструктур покриттів (розмір ламелей, пористість не виявив змін після ПТО. Тому вплив деформації і ПТО на субструктуру напилених покриттів оцінювали за зміною розмірів областей когерентного розсіювання (ОКР) рентгенівського випромінювання. Результати досліджень наведені у табл. 3.

Таблиця 3

**Залежність розмірів ОКР рентгенівського випромінювання електродугових покриттів від виду обробки**

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

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 напилення. При збільшенні тривалості витримки до 90 і 150 хв деформованих покриттів з Св-08Г2С та 12Х18Н10Т відповідно, розмір ОКР збільшується незначно, що корелюється з незначним зменшенням твердості.

Таким чином, проведення додаткової деформації на 40 і 15% і ПТО напилених електродугових покриттів з дробів Св-08Г2С, 12Х18Н10Т, 65Г дозволяє формувати нанорозмірну полігонізаційну субструктуру підвищеної термічної стійкості, яка забезпечує підвищену твердість у порівнянні зі станом після напилення на 50...70%.

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 оптимальні властивості 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. Як метод 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<sup>12</sup>:

$$t = \frac{7.6ld\sqrt{H}}{k_i v m_{dp} \sin^2 \alpha}$$

де  $l$  – відстань від сопла до оброблюваної поверхні, мм;  $d$  – діаметр дробу, мм;  $H$  – твердість оброблюваного матеріалу;  $k_i$  – коефіцієнт, що враховує кількість необхідних ударів для забезпечення необхідного зміцнення ( $k_i=0,8$ );  $v$  – швидкість дробу, м/с;  $m_{dp}$  – витрати дробу, кг/хв;  $\alpha$  – кут між потоком дробу і оброблюваною поверхнею, град. Тривалість дробоструменевої обробки зразків з покриттями складала 1 хв. Необхідність визначення часу пов'язана з

---

<sup>12</sup> Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.

тим, що більш тривалий наклеп знижує твердість поверхні за рахунок появи великої кількості дефектів, які сприяють передчасному руйнуванню.

Обробці піддавали електродугові покриття з дротів 12Х18Н10Т, БрАМц 9-2 та 65Г та плазмові покриття з порошку 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. 15).

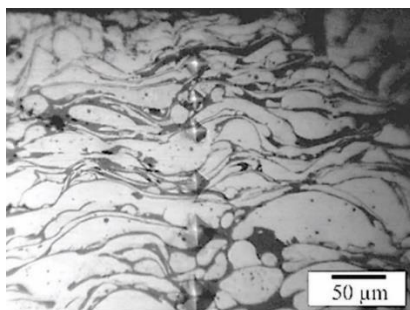


Рис. 15. Залежність розмірів відбитків алмазної піраміди ПМТ-3 від глибини наклепаного шару електродугового покриття з дроту 65Г

Результати визначення мікротвердості наведено на рис. 16, 17, 18.

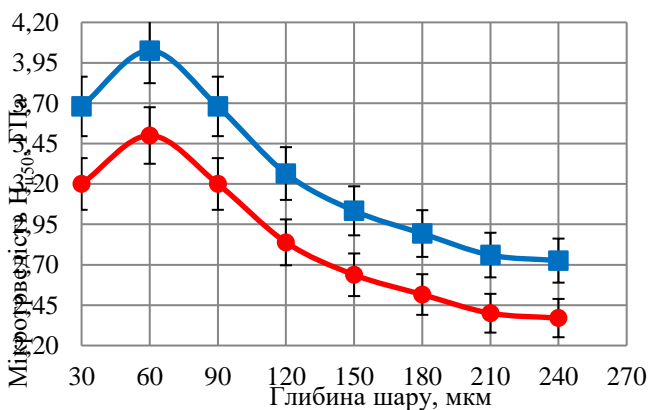


Рис. 16. Залежність мікротвердості від глибини наклепаного шару покриттів: ■ – електродугових з 12Х18Н10Т; ● – плазмових з ПРХ18Н9

Згідно з наведеними даними, максимальна мікротвердість покриттів спостерігається не на їх поверхні, а на глибині приблизно 60 мкм у всіх випадках. 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 електродугового покриття з дроту 12X18H10T у точці максимального зміщення підвищується з 2,7 ГПа до 4 ГПа (+48%); Бр АМц 9-2 – з 1,5 ГПа до 2,0 ГПа (+30%); 65Г – з 2,2 ГПа до 3,25 ГПа (+47%). Плазмових покриттів з ПР-Х18Н9 – з 2,3ГПа до 3,5ГПа (+52%); ПГ-19М-01 – з 1,35 ГПа до 1,8 ГПа (+33%).

Більший ефект підвищення твердості покриттів з неіржавіючих сталей пояснюється їх здатністю до деформаційного зміцнення за рахунок формування  $\alpha'$ -фази мартенситного типу<sup>13</sup>. Глибина наклепаного шару складає 180...200 мкм, після чого мікротвердість набуває значень, що відповідають необробленому матеріалу покриття. Після дробоструменевої обробки покриттів проводили їх ПТО при температурах: електродугові з 12X18H10 та плазмові з ПР-Х18Н9 – 880 °С; електродугові з БрАМц 9-2 та плазмові з ПГ-19М-01 – 350 °С; електродугових з 65Г – 400°С.

Результати визначення мікротвердості на глибині 60 мкм в залежності від тривалості витримки при термічній обробці представлені на рис.19, 20, 21.

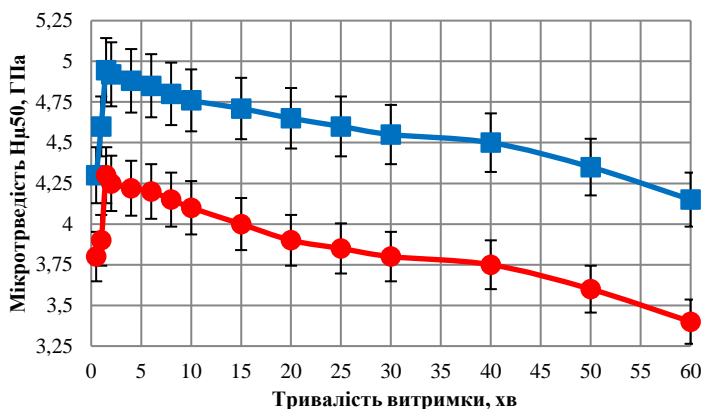
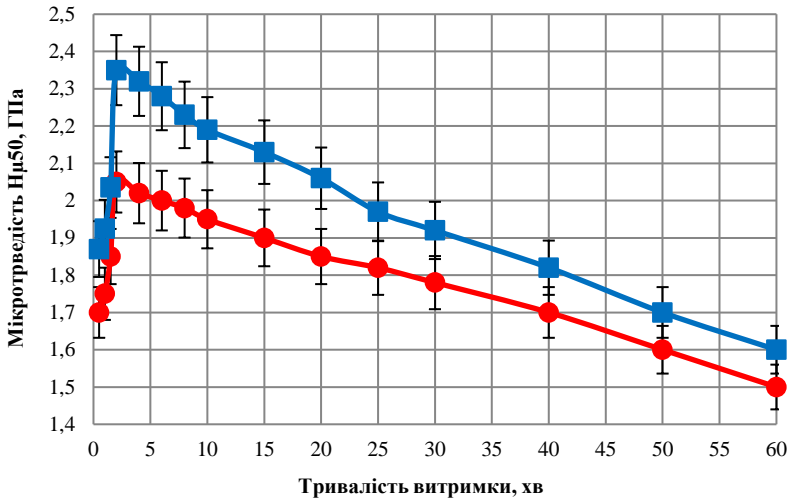
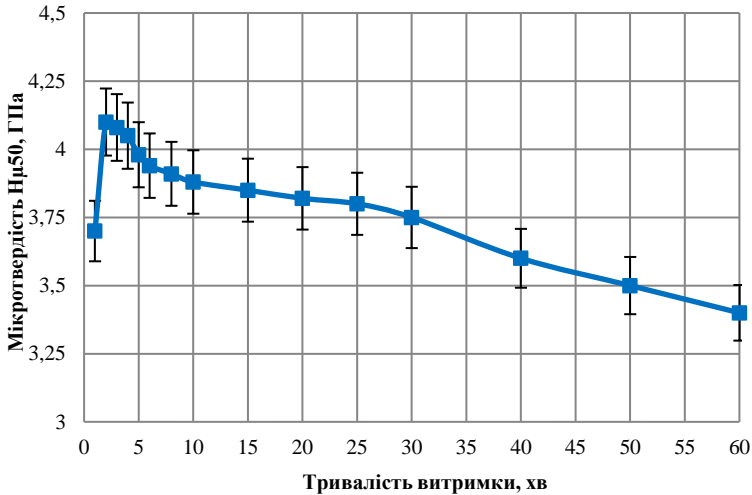


Рис. 19. Залежність мікротвердості на глибині 60 мкм від тривалості витримки при термічній обробці: ■ – електродугових покриттів з дроту 12X18H9T; ● – плазмових з порошку ПРХ18Н9

<sup>13</sup> Бородулін Г.М., Мошкевич Е.И. Нержавеющая сталь.М.: Металлургия, 1973. – 319 с.



**Рис. 20.** 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



**Рис. 21.** Залежність мікротвердості на глибині 60 мкм від тривалості витримки при термічній обробці електродугових покриттів з дроту 65Г

Згідно з представленими даними, мікротвердість електродугового покриття з дроту 12Х18Н10Т максимально підвищується при витримці 1,5 хв з 4ГПа до 5 ГПа (+20%); БрАМц 9-2 – при 2 хв з 2 ГПа до 2,35 ГПа (+17%); 65Г – 2 хв з 3,25 ГПа до 4,1 ГПа (+26%). Плазмових покриттів з ПР-Х18Н9 при витримці 1,5хв з 3,5 ГПа до 4,3 ГПа (+23%); ПГ-19М-01 – 2 хв з 1,8 ГПа до 2,05 ГПа (+11%). При підвищенні тривалості витримки покриттів, наприклад, до 30...40 хв спостерігається не значне зниження 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 субструктури визначали розмір ОКР зразків (рис. 22).

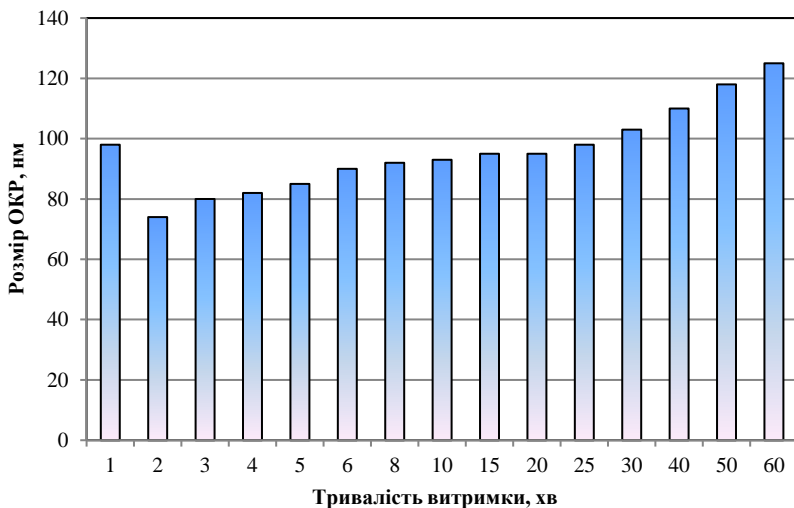
Згідно з приведеними даними, при підвищенні тривалості витримки спостерігається незначне збільшення розміру ОКР. Витримка, що відповідає максимуму твердості, характеризується найменшим значенням ОКР. Отже, чим дрібніша сформована у результаті дробоструменевої обробки субструктура, тим вище твердість покриття. При витримках від 6 до 25 хв спостерігається стабілізація розміру ОКР покриттів, що корелюється 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.

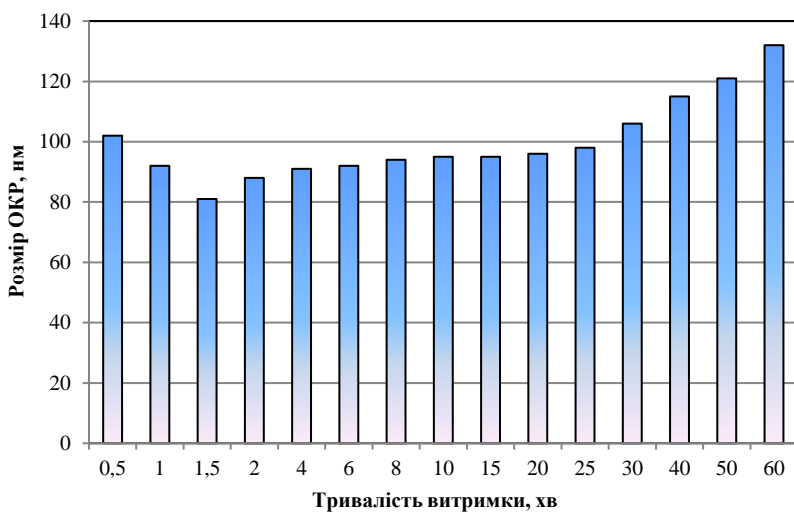
Для визначення експлуатаційних властивостей отриманих покриттів проведено випробування на міцність їх зчеплення з основою та зносостійкість.

Одним з основних способів визначення міцності зчеплення покриття з основним металом вважається штифтовий метод, який дозволяє оперативно проводити випробування безпосередньо після нанесення покриття на зразки, тому його й використовували у даній роботі. Зразком служить бобишка, в отвір якої встановлюється штифт таким чином, що його торцева поверхня знаходиться врівень з площиною основи – бобишки. На загальну поверхню торця штифта і бобишки після відповідної підготовки наноситься покриття. Випробування проводять шляхом витягування конусного штифта з бобишки із записом зміни зусилля, після відриву штифта від покриття визначають відношення максимального навантаження до площі торця штифта. Це відношення є кількісною характеристикою з'єднання покриття з основою. Для

розтягування зразків використовували розривну машину УММ-5. Зразки для визначення міцності зчеплення виготовляли з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45.



а



**Рис. 22. Залежність розміру ОКР від тривалості витримки при ПТО: а – електродугових покриттів з дроту 65Г; б – плазмових з порошку ПРХ18Н9**

Перед нанесенням покриттів поверхню, яка підлягала напиленню, обезжирювали технічним етанолом та піддавали струменево-абразивній обробці. Товщина нанесених покриттів складала 0,5...0,6 мм. Для отримання результатів міцності зчеплення покриттів з основою напилення на одному режимі виконували в один прохід на 5 зразків. Для кожного режиму проводили по 5 паралельних дослідів. Обробку результатів міцності зчеплення проводили методами математичної статистики<sup>14</sup>. Визначення середньої міцності зчеплення розраховували з довірчою ймовірністю 0,95. Результати визначення міцності зчеплення напилених та оброблених покриттів зі зазначених матеріалів наведено на рис. 23.

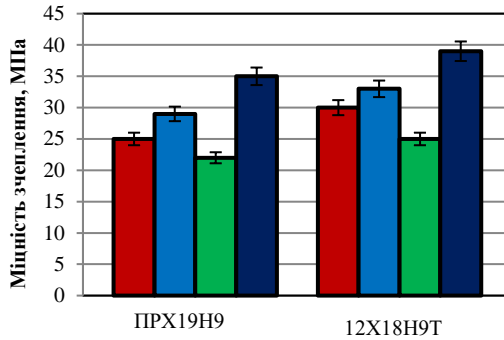
Згідно з представленими даними, проведення ПТО покриттів забезпечує підвищення міцності зчеплення на 30...40% у порівнянні з покриттями після напилення за рахунок зменшення внутрішніх напружень. Так, найбільш помітний приріст міцності зчеплення спостерігається для покриттів із неіржавіючих сталей, оскільки температура термічної обробки таких покриттів найвища. Наступна дробоструменева обробка знижує міцність зчеплення покриттів на 10%...15% у порівнянні з покриттями після напилення 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 активнішому зняттю внутрішніх навантажень, які виникли у процесі формуванні 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 з температури 840 °С і витримці протягом 50 хв. Охолодження виконували у воді. Після гартування твердість складала 54...55 HRC. Потім проводили відпуск при температурі 550 °С, витримували протягом 1 години і охолоджували на повітрі. Твердість після відпуску складала 30...32 HRC.

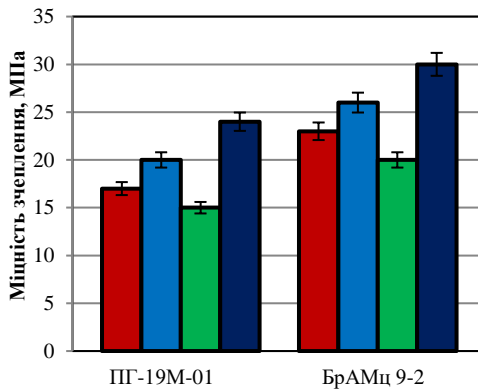
---

<sup>14</sup> Пінчук, С.Й. Організація експерименту при моделюванні та оптимізації технічних систем. Дн.: «Дніпро-VAL», 2009. 289с.

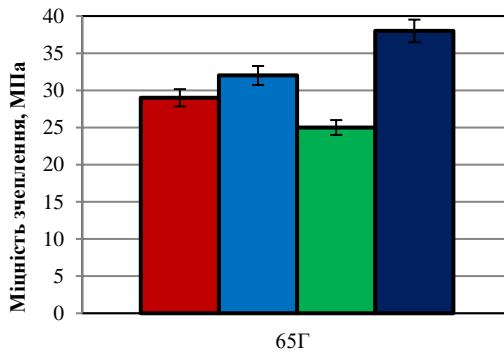




а



б



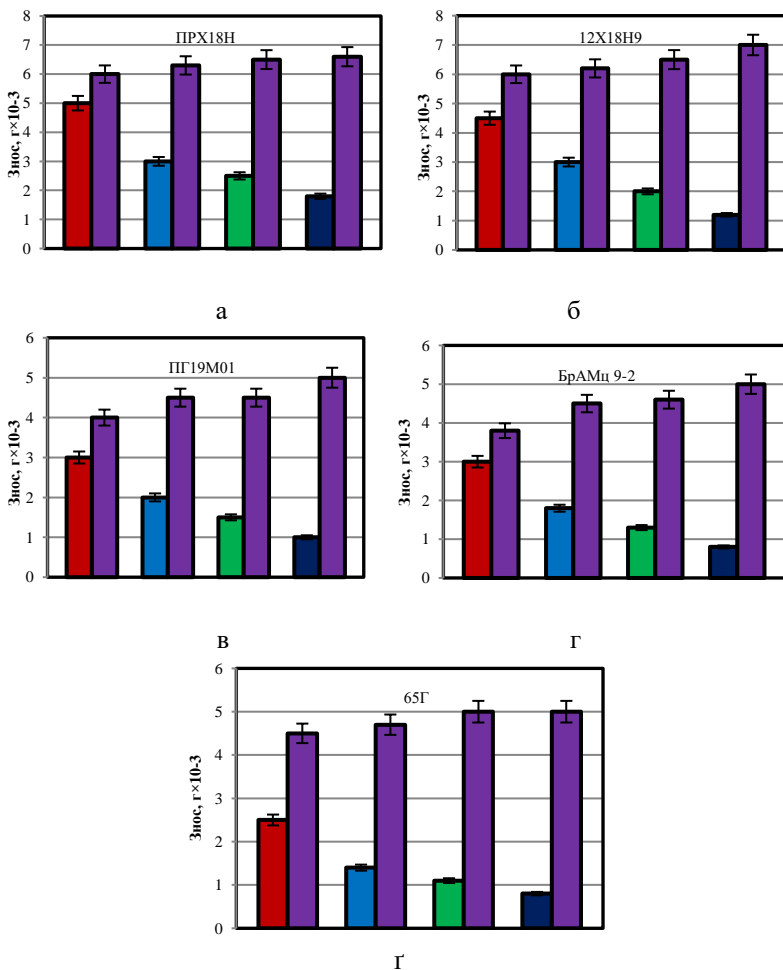
в

**Рис. 23. Результати визначення міцності зчеплення плазмових покриттів з порошків ПРХ18Н9, ПГ-19М-01 та електродугових з дротів 12Х18Н9Т, БрАМЦ 9-2 та 65Г: ■ – після наплення; ■ – наплення+термічна обробка; ■ – наплення+ППД; ■ – наплення+ППД+термічна обробка**

Отримані зразки встановлювалися на вали машини тертя СМЦ-2 таким чином, щоб радіальне биття їх при повертанні валів вручну не перевищувало 0,1 мм. Далі проводили притирання 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. 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 зразку через кожні 10 км пройденого шляху. Регулювання пройденого шляху виконували за часом роботи установки. Частота обертання валу складала 300 об/хв. При діаметрі ролика 50 мм даний шлях відповідає 210 хвилинам роботи установки. Перед зважуванням зразки ретельно промивалися у 96% етиловому спирті і висушувалися. Зважування зразків проводили на лабораторних вагах моделі ТВЕ-0.21 на кожному зразку по п'ять разів. Обробку результатів зносостійкості проводили методами математичної статистики. Визначення середнього зносу розраховували з довірчою ймовірністю 0,95. Результати визначення зносостійкості напиленних та оброблених покриттів зі зазначених матеріалів наведено на рис. 24.

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

Ефект збільшення зносостійкості покриттів корелюється з ефектом підвищення їх твердості. Після дробоструменевої обробки зносостійкість покриттів також зростає від 40% для бронзових покриттів до 50% для неіржавіючих внаслідок значного зміцнення поверхневого шару. Для останніх покриттів характерне деформаційне зміцнення за рахунок формування  $\alpha'$ -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 здрібної полігонізаційної субструктури. 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, знос контртіла збільшився лише на 10%.



**Рис. 24.** Результати визначення зносостійкості плазових (а, в) та електродугових покриттів (б, г, д) із зазначених матеріалів:  
■ – після наповнення; ■ – наповнення+термічна обробка;  
■ – наповнення+ППД; ■ – наповнення+ППД+термічна обробка;  
■ – контролі

## ВИСНОВКИ

1. Обрані оптимальні режими передрекристалізаційної термічної обробки покриттів, що забезпечують максимальну твердість плазмових з порошку ПРХ18Н9 (витримка 1,5 хв при 880°C), ПГ-19М-01 (2 хв, 350°C); електродугових покриттів з дроту 65Г (3 хв 400°C); 12Х18Н10Т (3 хв, 600 °С) БрАМц 9-2 (2хв, 350°C); газополуменевих з порошку ПРХ18Н9 (2 хв, 880°C). Передрекристалізаційна термічна обробка забезпечує формування наномасштабних елементів у напилених плазмових – з ПР-Х18Н9 та електродугових – з Св-08Г2С, 65Г, 12Х18Н10Т покриттях.

3. Встановлено, що проведення наступної 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%) за рахунок зниження рухливості малокутових субмеж цим забезпечує підвищення термічної стабільності полігонізаційної субструктури.

4. Досліджено вплив ППД дробоструменевою обробкою на можливість формування стабільної полігонізаційної субструктури у напилених покриттях ПТО. Мікротвердість електродугового покриття з дроту 12Х18Н10Т максимально підвищується при витримці 1,5 хв з 4 ГПа до 5 ГПа (+20%); БрАМц 9-2 – при 2 хв з 2 ГПа до 2,35 ГПа (+17%); 65Г – 2 хв з 3,25 ГПа до 4,1 ГПа (+26%). Плазмові покриття з ПРХ18Н9 при витримці 1,5хв з 3,5 ГПа до 4,3 ГПа (+23%); ПГ-19М-01 – 2 хв з 1,8 ГПа до 2,05 ГПа (+11%).

5. Дробоструменева обробка електродугових та плазмових покриттів 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.

6. Встановлено, що проведення ПТО покриттів забезпечує підвищення міцності зчеплення на 30...40% у порівнянні з покриттями після напилення за рахунок зменшення внутрішніх напружень. Наступна дробоструменева обробка знижує міцність зчеплення покриттів на 10%...15% у порівнянні з покриттями після напилення за рахунок виникнення додаткових значних внутрішніх напружень у поверхневому шарі покриття. Термічна обробка додатково деформованих покриттів забезпечує більше підвищення міцності зчеплення у порівнянні з термообробленими покриттями

без деформації на 20% за рахунок більшої тривалості витримки та активнішому зняттю внутрішніх напружень, які виникли у процесі формуванні покриттів та їх ППД.

7. Показано, що ПТО плазмових та електродугових покриттів забезпечує підвищення зносостійкості від 30%(бронзові покриття) до 45% (покриття з нержавіючої сталі та 65Г) у порівнянні зі станом після напилення. Після дробоструменевої обробки та ПТО зносостійкість покриттів також зростає на 70% у порівнянні зі станом після напилення внаслідок значного зміцнення поверхневого шару. Термічна обробка оброблених покриттів забезпечує подальше зменшення зносу внаслідок підвищення твердості шару за рахунок формування здрібненої полігонізаційної субструктури.

### **АНОТАЦІЯ**

Наноструктурування деталей великого розміру методами інтенсивної пластичної деформації викликає значні технічні й технологічні труднощі та не є економічно доцільним. Основну частину цих метод не доведено до практичного застосування. У роботі наведено результати попередніх досліджень, які відкривають перспективу щодо подальшого застосування способу формування здрібненої полігонізаційної субструктури шляхом передрекристалізаційної термічної обробки напилених покриттів з металів та сплавів. Дослідження проводили на прикладі електродугових покриттів із дротів марок Св-08Г2С, 65Г, 12Х18Н10Т, БрАМц 9-2; плазмових та газополумєневих 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 передрекристалізаційна термічна обробка напилених 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) напилених покриттів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Siegmann S, Brandt O., Drovak M. Thermally sprayed wear resistant coatings with nanostructured hard phases. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2004. Vol.13(1).P.37– 43.
2. Tingau O. Denoirjean A., Coudert J-F., Fauchais P. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> finely structured multilayer architectures from suspension plasma spraying *Journal of Thermal Spray Technology*. 2010, Vol. 19 (1-2). P. 207–218.
3. Кудинов В. В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория технология и оборудование . М.: Металлургия, 1992. 250 с.
4. Калита В. И., Яркин В. В, Касимцев А. В., Лубман Г. У. Формирование наноразмерных упрочняющих фаз в плазменных покрытиях из сталей, чугунов и сплавов на основе железа. *Физика и химия обработки материалов*. 2006. № 5. С. 29 – 40.
5. Васильев М.О., Мордюк Б.М., Сидоренко С.І. Синтез деформаційних нанокompозитів на поверхні алюмінієвого сплаву Д16 за допомогою ультразвукового ударного оброблення. *Металофізика та новітні технології*. 2016. № 4. С. 545-563.
6. Ivannikov, A.Y., Kalita V.I., Komlev D.I. The Effect of Electromechanical Treatment on Structure and Properties of Plasma-Sprayed Fe-30Cr Coating. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2019. № 28. P. 883-892.
7. Петров С.В., Карп И.Н. Плазменное газозвдушно напыление. К: Наукова думка, 1993. 493 с.
8. Кудинов В.В., Иванов В.М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий М.: Машиностроение, 1981. – 192 с.
9. Анциферов В. Н., Шмаков М.Н., Агеев С. С. Газотермические Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. 320 с.
10. Горелик, С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический анализ и электронно-оптический анализ. Москва:МИСИС, 1994. 328 с.
11. Задоян Д.М., Азизбеян Л. А, Валюженич М. К. Определение плотности избыточных дислокаций по рентгенографическим оценкам размеров кристаллических блоков и разориентировки малоугольных границ. *Вестник Самарского государственного технического университета*. 2003. № 19. С. 177.
12. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник . М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.

13. Бородулин Г.М, Мошкевич. Е.И. Нержавеющая сталь. М.: Металлургия, 1973. – 319 с.

14. Пінчук, С.Й. Організація експерименту при моделюванні та оптимізації технічних систем .Дн.: «Дніпро-VAL», 2009. 289 с.

**Information about the authors:**

**Dubovyi Oleksandr Mykolaiovych,**

Doctor of Technical Sciences,

Head of the Department of Material Science and Technology of Metals

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

9, Heroiv Ukrainy ave., Mykolaiv, 54007, Ukraine

**Karpechenko Anton Anatoliiiovych,**

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor at the Department of Higher Mathematics

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

9, Heroiv Ukrainy ave., Mykolaiv, 54007, Ukraine

**Bobrov Maksym Mykolaiovych,**

Candidate of Technical Sciences,

Assistant at the Department of Material Science

and Technology of Metals

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

9, Heroiv Ukrainy ave., Mykolaiv, 54007, Ukraine