

УДК 621.7
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.1\(503\).1.3](https://doi.org/10.15589/znp2026.1(503).1.3)

EVOLUTION OF THE POLIGONIZATION NANOSIZED SUBSTRUCTURE OF PLASMA COATINGS FROM CHROMIUM-NICKEL STEEL

ЕВОЛЮЦІЯ ПОЛІГОНІЗАЦІЙНОЇ НАНОМАСШТАБНОЇ СУБСТРУКТУРИ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ З ХРОМОНІКЕЛЕВОЇ СТАЛІ

Oleksandr M. Dubovyj
oleksandr.dubovyj@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2843-1879

Maksym M. Bobrov
maksym.bobrov@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-9098-6912

Bohdan A. Khomenko
boohdaaan@gmail.com

Danil O. Makarov
d.makarovw@gmail.com

О. М. Дубовий,
докт. техн. наук, професор

М. М. Бобров,
канд. техн. наук, доцент

Б. А. Хоменко,
аспірант

Д. О. Макаров,
аспірант

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. *Purpose.* To establish correlational dependencies between the parameters of deformation-heat treatment (static deformation degree, temperature, and duration of pre-recrystallization heating) and the evolution of substructural characteristics (subgrain size, misorientation angles) in plasma coatings made of chromium-nickel steel, aiming to enhance their physical and mechanical properties. *Method.* Coatings from PR-Kh18N9 powder (fraction 40–80 μm) were deposited using a "Kyiv-7" setup. Subsequent static deformation (15% and 30%) and isothermal holdings in the range of 600–880 $^{\circ}\text{C}$ were applied. Substructure characterization was performed by X-ray diffractometry (DRON-3) using the approximation method to determine coherent scattering regions (CSR) and calculation techniques to estimate subgrain misorientation angles. *Results.* The optimal treatment regime (15% static deformation + pre-recrystallization heat treatment at 880 $^{\circ}\text{C}$ for 20 min) was identified, which increases coating hardness by 93% (from 1.5 to 2.9 GPa) compared to the as-sprayed state. This correlates with maximum structure refinement (CSR $\gamma\text{-Fe}$ = 47.4 nm; CSR $\alpha\text{-Fe}$ = 35.1 nm) and a significant increase in sub-boundary misorientation angles (up to 0.33 $^{\circ}$ and 0.44 $^{\circ}$, respectively). The fraction of nanosized subgrains reaches 15.3% in austenite and 18.5% in martensite. *Scientific novelty.* For the first time, the bimodal influence of prior plastic deformation on the kinetics of polygonization processes in a two-phase ($\gamma\text{-Fe}$ + $\alpha\text{-Fe}$) coating is revealed. It is shown that 15% deformation blocks the migration of low-angle boundaries and inhibits collective polygonization, ensuring high thermal stability of the nanosized substructure during prolonged holdings. *Practical importance.* The proposed controlled deformation-heat treatment allows overcoming the thermal instability limitations of traditional plasma spraying, significantly improving the mechanical properties of coatings. This expands their application scope for critical components in mechanical engineering and power generation, offering a cost-effective alternative to more complex nanostructuring methods.

Key words: plasma sprayed coatings; deformation-heat treatment; nanosized substructure; subgrains, misorientation angles.

Анотація. *Мета.* Встановлення кореляційних залежностей між параметрами деформаційно-термічної обробки (величина статичної деформації, температура та тривалість передрекристалізаційного нагріву) та еволюцією субструктурних характеристик (розмір субзерен, кути розорієнтування) у плазмових покриттях із хромонікелевої сталі для підвищення їх фізико-механічних властивостей. *Методика.* Покриття з порошку ПР-Х18Н9 (фракція 40–80 мкм) нанесено на установці «Київ-7». Застосовано статичне деформування (15% та 30%) та ізотермічні витримки в інтервалі 600–880 $^{\circ}\text{C}$. Атестацію субструктури проведено методом рентгенівської дифрактометрії (ДРОН-3) з використанням апроксимаційного методу для визначення областей когерентного розсіювання (ОКР) та розрахункових методик для оцінки кутів розорієнтування субзерен. *Результати.* Визначено оптимальний режим обробки (статична деформація 15% + передрекристалізаційна термічна обробка при

880 °C, 20 хв), який підвищує твердість покриття на 93% (з 1,5 до 2,9 ГПа) порівняно зі станом після напilenня. Це корелює з максимальним подрібненням структури (ОКР γ -Fe = 47,4 нм; ОКР α -Fe = 35,1 нм) та зростанням кутів розорієнтування субмеж (до 0,33° та 0,44° відповідно). Частка нанорозмірних субзерен сягає 15,3% в аустеніті та 18,5% у мартенситі. *Наукова новизна.* Вперше виявлено бімодальний вплив попередньої пластичної деформації на кінетику полігонізаційних процесів у двофазному (γ -Fe + α -Fe) покритті. Показано, що деформація на 15% блокує міграцію малокутових границь та гальмує процеси збиральної полігонізації, забезпечуючи високу термічну стабільність нанорозмірної субструктури протягом тривалих витримок. *Практична значимість.* Запропонована керована деформаційно-термічна обробка дозволяє подолати обмеження традиційного плазмового напilenня, пов'язані з термічною нестабільністю структури, та суттєво підвищити механічні властивості покриттів. Це розширює сферу їх застосування у відповідальних вузлах машинобудування та енергетики, пропонуючи економічно ефективну альтернативу складнішим методам наноструктурування. **Ключові слова:** плазмові покриття; деформаційно-термічна обробка; нанорозмірна субструктура; субзерна; кути розорієнтування.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

За останні п'ять-десять років плазмова технологія напilenня покриттів із порошків набула широкого застосування у техніці. Цьому сприяли визначні досягнення в галузі виробництва високоміцних порошків, які використовуються при напilenні. Плазмові покриття застосовуються переважно як захисні, зносостійкі та теплозахисні. Недивлячись на те, що при плазмовому напilenні покриттів фактично відсутні обмеження щодо напильованих матеріалів, форми і розмірів об'єктів, які захищаються, практичне використання їх стримується окремими низькими фізико-механічними властивостями. Зокрема низькою адгезійною міцністю зчеплення покриття з підкладкою ($\leq 40 \dots 80$ МПа), низькою когезійною міцністю, а пористість може змінюватися від 2 до 15%. Більш високі показники фізико-механічних властивостей досягаються при плазмовому напильованні у контрольованій атмосфері [1, 2].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На сьогодні традиційні методи підвищення експлуатаційних характеристик металів і сплавів, зокрема легування, практично вичерпали свій резерв. Основним шляхом покращення їх властивостей у останні роки стало цілеспрямоване формування дрібнодисперсної мікро– та нанокристалічної структури [3, 4]. Провідним підходом для створення таких матеріалів є застосування методів інтенсивної пластичної деформації (ІПД), що об'єднує низку технологій, серед яких найпоширенішим є рівноканальне кутове пресування (РККП) [5, 6]. Однак використання існуючих методів ІПД для наноструктурування масивних деталей стикається зі значними технологічними труднощами, обмежене масштабуванням та є економічно невігідним. У галузі газотермічного напilenня сучасні тенденції зосереджені на покращенні властивостей покриттів шляхом різних методів наноструктурування та створення композиційних покриттів, що містять металеву матрицю та тверді частинки зміцнювальної фази (оксиди, карбіди). Більшість сучасних методів нанесення наноструктурованих покриттів ґрунтується на

використанні агломерованих порошків з нанорозмірними частинками [7]. Останнім часом перспективним також вважається застосування суспензій, що містять нанорозмірні керамічні або металеві частинки [8]. Проте цим методам притаманні суттєві недоліки, пов'язані зі складнощами підготовки таких напильованих матеріалів, їхньою високою вартістю та проблемами з подачею у високотемпературний струмінь.

Практичний інтерес являє собою застосування передрекристилізаційної термічної обробки (ПТО) [9]. В цій роботі досліджено вплив ПТО на фізико-механічні властивості плазмових покриттів. Показана можливість підвищення твердості напильованих плазмових покриттів у порівнянні зі станом після напильовання на 30...70% та зниження коефіцієнта теплопровідності, наприклад для покриття із ZrO_2 -7% Y_2O_3 , на 15% за рахунок здрібнення субструктури. Відмічено, як недолік ПТО, низьку термічну стійкість (декілька хвилин) отриманої субструктури через протікання процесів збиральної полігонізації. Це негативно впливає на можливість застосування цієї термічної обробки для виробів великої маси. Автори роботи [10] запропонували додаткову обробку плазмових покриттів: статичну (пресування) та динамічну (дробоструменеву), які дозволяють суттєво підвищити термічну стійкість субструктури при незначному зниженні фізико-механічних властивостей після ПТО.

Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Однак відсутні дослідження щодо впливу деформаційно-термічних факторів на формування нанорозмірної субструктури, яка головним чином визначає фізико-механічні властивості напильованих покриттів, зокрема плазмових.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи – виявити та оптимізувати вплив пластичної деформації та наступної передрекристилізаційної термічної обробки на субструктуру плазмового покриття із хромонікелевої сталі.

Методи, об'єкт та предмет дослідження. Напilenня покриттів здійснювали на установці «Київ-7», плазмотроном ПУН-1, порошком із сталі ПР-Х18Н9, фракцією 40...80 мкм на підкладку зі сталі 25,

розміром $60 \times 40 \times 4$ мм товщиною 0,6...0,8 мм. Передкристалізаційну термічну обробку здійснювали в електричній печі СНОЛ-1.6.0.8/9-М1. Твердість заміряли на приладі типу Віккерс.

Максимальне значення твердості плазмового покриття без додаткової пластичної деформації після ПТО при 880°C протягом 1,5 хв (рис. 1) складає 2,09 ГПа, що на 39% вище, ніж після напilenня. Зі збільшенням часу витримки показники твердості різко зменшуються через перебіг процесу збиральної полігонізації.

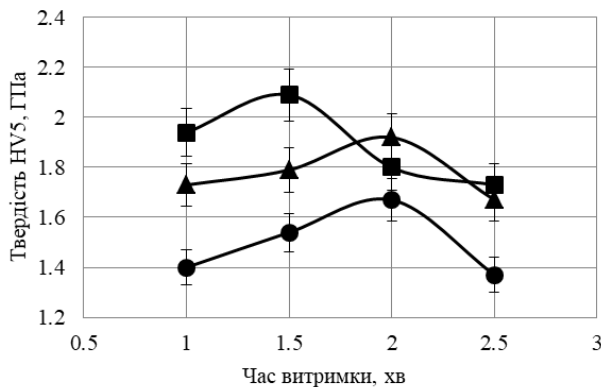


Рис. 1. Залежність твердості плазмового покриття з ПР-Х18Н9 від температури та часу витримки при ПТО:
● – напilenня+ПТО 660°C ; ▲ – напilenня+ПТО 750°C ;
■ – напilenня+ПТО 880°C

Досліджували вплив додаткової статичної деформації 15 та 30%, температури ПТО 600; 750 і 880°C та часу витримки на твердість покриття. Встановлено, що оптимальним режимом деформаційно-термічної обробки (деформація+ПТО) є статична деформація (пресуванням) на 15% і ПТО при 880°C з витримкою 20 хв (рис. 2). При цьому твердість складала 2,9 ГПа, що на 93% вище ніж після напilenня (1,5 ГПа).

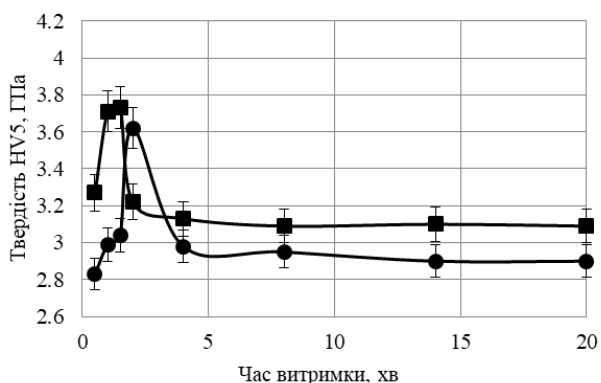


Рис. 2. Залежність твердості плазмового покриття з ПР-Х18Н9 від часу витримки після додаткового статичного деформування та ПТО при 880°C :
● – деформація 15%+ПТО 880°C ; ■ – деформація 30%+ПТО 880°C

Далі досліджували взаємозв'язок деформаційно-термічних факторів з розміром субзерен і кутом їх розорієнтування. Розміри субзерен головним чином визначають фізико-механічні властивості полікристалічних матеріалів, зокрема напilenних плазмових покриттів, а кути розорієнтування – термічну стабільність субструктури. Розміри областей когерентного розсіювання рентгенівських променів (ОКР), які ототожнюють з розміром субзерен визначали за допомогою дифрактометра рентгенівського загального призначення «ДРОН-3» методом апроксимації, який дозволяє виключити вплив внутрішніх напружень при визначенні розміру субзерен. Кути розорієнтування субзерен визначали також за допомогою вказаного обладнання розрахунковим методом для зразку плазмового покриття із порошку ПР-Х18Н9 після напilenня та деформаційно-термічної обробки.

Оскільки в об'ємі покриття утворюються дві фази – $\gamma\text{-Fe}$ та $\alpha\text{-Fe}$, то для розрахунку кутів розорієнтування необхідно обрати відповідні еталони для кожної з них. В якості еталону для γ -фази обрано дифрактограму компактного зразка зі сталі 12Х18Н10Т після відпалу при температурі 1200°C протягом 60 хв, яка має аустенітну структуру з ГЦК кристалічною ґраткою, а для α -фази – дифрактограму зразка технічно чистого заліза після відпалу при температурі 1000°C протягом 60 хв, яке має структуру фериту з ОЦК кристалічною ґраткою.

Досліджено вплив додаткової статичної деформації на наступній ПТО на різних температурних режимах щодо середнього розміру та відносної кількості нанорозмірних субзерен в плазмовому покритті. Результати розрахунку середнього розміру та відносної кількості нанорозмірних субзерен приведені на рисунках 3-6 для кожного режиму деформаційно-термічної обробки (табл. 1).

Обговорення отриманих результатів. Як видно з рисунків 3,4 додаткова статична деформація плазмового покриття із порошку ПР-Х18Н9 загалом сприяє подрібненню субструктури. Вплив додаткової деформації на кожну фазу в плазмовому покритті різний. Наприклад, величини напружень при додатковій статичній деформації на 15% недостатньо для подрібнення субструктури в α -фазі, тоді як статична деформація на 30% вже приводить до значного подрібнення субструктури. Найменший розмір субзерен забезпечує режим деформаційно-термічної обробки №7, який відповідає додатковій статичній деформації на 30% та ПТО при 880°C протягом 1,5 хвилин. Розмір ОКР при цьому складає: для $\gamma\text{-Fe}$ 36,8 нм (після напilenня – 189,2 нм, після деформації – 42,8 нм), для $\alpha\text{-Fe}$ – 32,36 нм (після напilenня – 134,7 нм, після деформації – 41,7 нм).

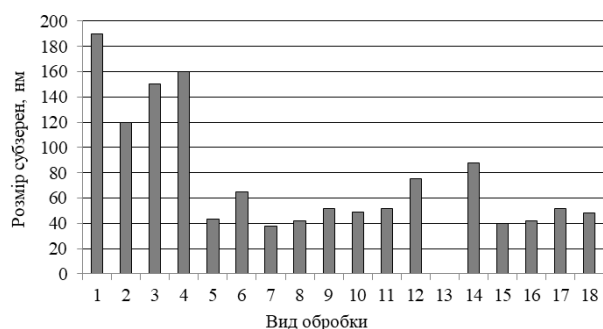


Рис. 3. Гістограма розподілу середніх розмірів субзерен в γ -Fe в залежності від виду обробки

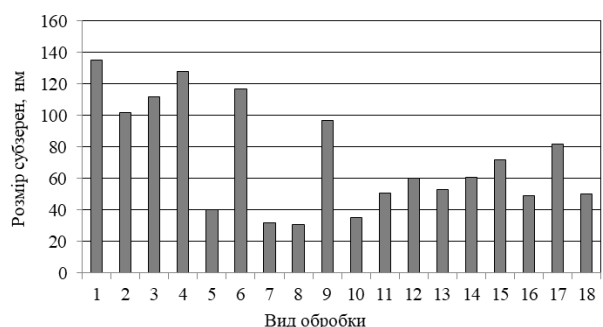


Рис. 4. Гістограма розподілу середніх розмірів субзерен в α -Fe в залежності від виду обробки

Також додаткова статична деформація сприяє стабілізації полігонізаційної субструктури. Це спостерігається при збільшенні часу витримки. При цьому середній розмір субзерен зростає несуттєво, та майже на всіх режимах деформаційно-термічної обробки залишається меншим, ніж після напilenня. При витримці протягом 20 хвилин найкращі показники забезпечує режим №10, який відповідає статичній деформації на 15% та ПТО при 880 °C протягом 20 хвилин. Розмір субзерен при цьому складає: для γ -Fe – 47,4 нм (після деформації – 65 нм), для α -Fe – 35,1 нм (після деформації – 116,8 нм).

З рисунків 5,6 видно, що додаткова статична деформація з наступною ПТО також приводить до збільшення відносної кількості нанорозмірних

субзерен на майже всіх режимах деформаційно-термічної обробки у порівнянні зі станом після напilenня. Так, найбільший показник відносної кількості нанорозмірних субзерен спостерігається на режимі №10, який відповідає статичній деформації на 15% та ПТО при 880 °C протягом 20 хвилин. При цьому відносна кількість нанорозмірних субзерен в γ -Fe складає 15,3% при загальному вмісті аустеніту в матеріалі 56,8%, а відносна кількість нанорозмірних субзерен в α -Fe складає 18,5% при загальному вмісті мартенситу в матеріалі 43,2 %.

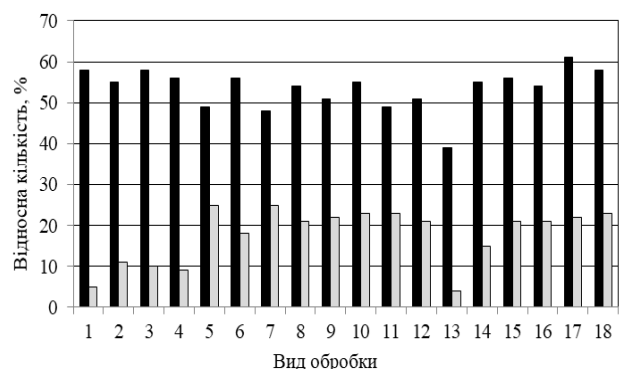


Рис. 5. Гістограма вмісту γ -Fe на відносної кількості нанорозмірних субзерен у γ -Fe в залежності від виду обробки: ■ – відносна кількість γ -Fe; □ – відносна кількість нанорозмірних субзерен

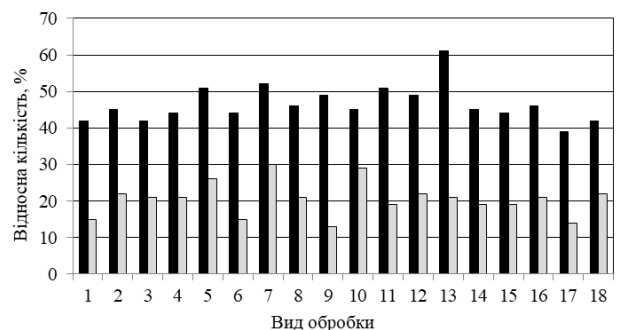


Рис. 6. Гістограма вмісту α -Fe на відносної кількості нанорозмірних субзерен у γ -Fe в залежності від виду обробки: ■ – відносна кількість α -Fe; □ – відносна кількість нанорозмірних субзерен

Таблиця 1. Види деформаційно-термічної обробки

№ режиму	Вид обробки	№ режиму	Вид обробки
1	Плазмове напilenня	10	Напilenня+деформація 15%+ПТО 880°C 20 хв
2	Напilenня+ПТО 880°C 1,5 хв	11	Напilenня+деформація 30%+ПТО 750°C 1,5 хв
3	Напilenня+ПТО 750°C 2 хв	12	Напilenня+деформація 15%+ПТО 750°C 3 хв
4	Напilenня+ПТО 600°C 2 хв	13	Напilenня+деформація 30%+ПТО 750°C 20 хв
5	Напilenня+статична деформація 30%	14	Напilenня+деформація 15%+ПТО 750°C 20 хв
6	Напilenня+статична деформація 15%	15	Напilenня+деформація 30%+ПТО 600°C 1,5 хв
7	Напilenня+деформація 30%+ПТО 880°C 1,5 хв	16	Напilenня+деформація 15%+ПТО 600°C 3 хв
8	Напilenня+деформація 15%+ПТО 880°C 2 хв	17	Напilenня+деформація 30%+ПТО 600°C 20 хв
9	Напilenня+деформація 30%+ПТО 880°C 20 хв	18	Напilenня+деформація 15%+ПТО 600°C 20 хв

Таким чином, найбільше подрібнення полігонізаційної субструктури після деформаційно-термічної обробки плазмового покриття із порошку ПР-Х18Н9 спостерігається на режимі №7, а найбільша кількість стабілізованих нанорозмірних субзерен на обох фазах матеріалу зафіксована після деформаційно-термічної обробки на режимі №10.

Результати дослідження впливу додаткової пластичної деформації та наступної ПТО плазмового покриття із порошку ПР-Х18Н9 на кути розорієнтування субзерен представлені на рис. 7, 8.

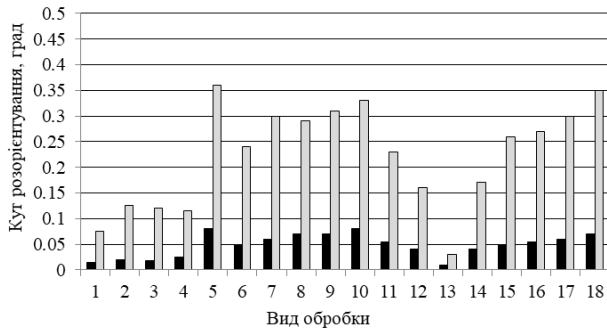


Рис. 7. Гістограма розподілу кутів розорієнтування субзерен у γ -Fe в залежності від виду обробки:

■ – середній кут розорієнтування субзерен;
□ – максимальний кут розорієнтування субзерен

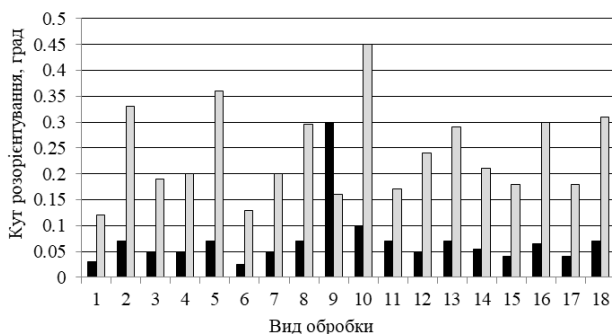


Рис. 8. Гістограма розподілу кутів розорієнтування субзерен у α -Fe в залежності від виду обробки:

■ – середній кут розорієнтування субзерен;
□ – максимальний кут розорієнтування субзерен

Аналіз наведених результатів показує, що вплив деформаційно-термічної обробки на кути розорієнтування субзерен в γ - та α -фазі дещо відмінний. Так, в γ -фазі спостерігається залежність збільшення кутів розорієнтування після ПТО. Наприклад, після напilenня плазмового покриття середній кут

розорієнтування складає 0,016 град, а максимальний – 0,07 град, додаткова пластична деформація покриття на 15% приводить до збільшення середнього кута розорієнтування до 0,054 град, максимального до 0,241 град, наступна ПТО при 600 °С протягом 3 хвилин збільшує середній кут до 0,061 град, а максимальний до 0,268 град; протягом 20 хвилин середній кут – 0,074 град, максимальний – 0,33 град. Подібна закономірність простежується і після пластичної деформації на 15% з наступною ПТО при 880 °С. Вплив додаткової пластичної деформації на 30% загалом схожий, за тим винятком, що все ж таки найбільші кути розорієнтування спостерігаються одразу після деформації.

Вплив деформаційно-термічної обробки на кути розорієнтування в α -фазі дещо відмінний. Так, додаткова пластична деформація на 15% викликає схожий ефект як і в γ -фазі, однак деформація покриття на 30% значно гальмує ефект збільшення кутів розорієнтування під час ПТО на всіх температурних режимах та загалом сприяє зменшенню величини кутів розорієнтування після ПТО в порівнянні з деформованим станом. Причини такого впливу важко пояснити тільки процесами перерозподілу дислокацій. Імовірно, такий ефект частково зумовлений іншими процесами, які відбуваються у деформованому мартенситі при нагріванні до відповідних температур, зокрема утворення та коагуляція спеціальних карбідів.

Таким чином, оптимальні значення кутів розорієнтування забезпечують два режими деформаційно-термічної обробки №10 та №18, які відповідають додатковій деформації на 15% та ПТО при 880 °С протягом 20 хв та додатковій деформації на 15% та ПТО при 600 °С протягом 20 хв відповідно.

ВИСНОВКИ

Встановлено закономірність впливу деформаційно-термічних факторів на відносну кількість нанорозмірних субзерен і на кут їх розорієнтування у плазмових покриттях із сталі ПР-Х18Н9. Виявлено, що наступне пластичне статичне деформування плазмового покриття із сталі ПР-Х18Н9 на 15% з послідовною ПТО при 880°С запорука термічної стабільності нанорозмірної субструктури в γ -Fe – 15,3%; в α -Fe – 18,5% протягом 20 хвилин. Показано, що термічна стабільність нанорозмірної субструктури забезпечується підвищеними середніми кутами розорієнтування субзерен в γ -Fe – 0,08 град (максимальний – 0,33 град); в α -Fe – 0,1 град (максимальний – 0,44 град).

REFERENCES

- [1] Wang D., Zhang L., Zhang S-L., Luo X., Li C. (2021). Microstructure and Ablation Behavior of Low-Pressure Plasma Sprayed ZrB₂ Coatings Down to 100 Pa, *Journal of Thermal Spray Technology*, 31, 282-296. <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01290-z>
- [2] Fan X., Song C., Feng X., et al. (2022). A New Method of Preparing In situ Synthesized Titanium Oxide Coatings by Very Low-pressure Reactive Plasma Spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, 31, 1860-1868. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01399-9>

- [3] Borisov, A.S., Naumov, A.A., Borisova, A.Y. et al. (2023). Effect of Severe Plastic Deformation on the Formation of the Nonferrous Metal Alloy Microstructure. *Steel in Transation*. 53, 830–836. <https://doi.org/10.3103/S0967091223100054>
- [4] Edalati, P., Fuji, M. & Edalati, K. (2023). Superfunctional high-entropy alloys and ceramics by severe plastic deformation. *Rare Metals*, 42, 3246–326. <https://doi.org/10.1007/s12598-023-02340-x>
- [5] Tolcha, M.A., Gebrehiwot, T.M. & Lemu, H.G. (2024). Enhancing Mechanical Properties of Cast Ingot Al6061 Alloy Using ECAP Process. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33, 13553–13566. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09978-3>
- [6] Sahoo, P.S., Meher, A., Mahapatra, M.M. et al. (2023). Analysis of mechanical and microstructural characteristics of plunger assisted ECAP strengthened Ti-6Al-4V alloy sheets. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 23, 194. <https://doi.org/10.1007/s43452-023-00742-3>
- [7] Chen, J., An, Y., Liu, G. et al. (2022). Tribological Performance and Thermal Stability of a Novel Cold Sprayed Nanostructured Ni-based Lubrication Coating. *Journal of Thermal Spray Technology*. 31, 1702–1711. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01368-2>
- [8] Guo L., Zhang B., He Q., Liu M., Liang L. (2024). Fabrication and characterization of thermal barrier coatings for internal combustion engines via suspension plasma spray with high solid loading. *Surface and Coatings Technology*, 479, 130523. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130523>
- [9] Dubovyi O.M., Karpechenko A.A., Bobrov M.M., Makrukha T. O. (2023). Pidvyshchennia fizyko-mekhanichnykh vlastyvostei metaliv i splaviv ta napylenykh pokryttiv formuvanniam polihonizatsiinoi nanomasshtabnoi substrukturny [Improving the physical and mechanical properties of metals and alloys and deposited coatings by forming a polygonal nanoscale substructure]. Mykolaiv : NUK. [in Ukrainian].
- [10] Karpechenko, A. A., Bobrov M.M. (2021). Formuvannia funktsionalnykh plazmovykh pokryttiv z kompleksom pidvyshchenykh fizyko-mekhanichnykh ta ekspluatatsiinykh vlastyvostei [Formation of functional plasma coatings with a complex of enhanced physical, mechanical and operational properties]. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia: naukovyi zhurnal*, no. 1, pp. 74-80. [in Ukrainian]. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/54443>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Wang D., Zhang L., Zhang S-L., Luo X., Li C. (2021). Microstructure and Ablation Behavior of Low-Pressure Plasma Sprayed ZrB₂ Coatings Down to 100 Pa, *Journal of Thermal Spray Technology*, 31, 282-296. <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01290-z>
- [2] Fan X., Song C., Feng X., et al. (2022). A New Method of Preparing In situ Synthesized Titanium Oxide Coatings by Very Low-pressure Reactive Plasma Spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, 31, 1860-1868. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01399-9>
- [3] Borisov, A.S., Naumov, A.A., Borisova, A.Y. et al. (2023). Effect of Severe Plastic Deformation on the Formation of the Nonferrous Metal Alloy Microstructure. *Steel in Transation*. 53, 830–836. <https://doi.org/10.3103/S0967091223100054>
- [4] Edalati, P., Fuji, M. & Edalati, K. (2023). Superfunctional high-entropy alloys and ceramics by severe plastic deformation. *Rare Metals*, 42, 3246–326. <https://doi.org/10.1007/s12598-023-02340-x>
- [5] Tolcha, M.A., Gebrehiwot, T.M. & Lemu, H.G. (2024). Enhancing Mechanical Properties of Cast Ingot Al6061 Alloy Using ECAP Process. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33, 13553–13566. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09978-3>
- [6] Sahoo, P.S., Meher, A., Mahapatra, M.M. et al. (2023). Analysis of mechanical and microstructural characteristics of plunger assisted ECAP strengthened Ti-6Al-4V alloy sheets. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 23, 194. <https://doi.org/10.1007/s43452-023-00742-3>
- [7] Chen, J., An, Y., Liu, G. et al. (2022). Tribological Performance and Thermal Stability of a Novel Cold Sprayed Nanostructured Ni-based Lubrication Coating. *Journal of Thermal Spray Technology*. 31, 1702–1711. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01368-2>
- [8] Guo L., Zhang B., He Q., Liu M., Liang L. (2024). Fabrication and characterization of thermal barrier coatings for internal combustion engines via suspension plasma spray with high solid loading. *Surface and Coatings Technology*, 479, 130523. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130523>
- [9] Дубовий О. М., Карпеченко А. А., Бобров М. М., Макруха Т. О. (2023). Підвищення фізико-механічних властивостей металів і сплавів та напилених покриттів формуванням полігонізаційної наномасштабної субструктури. Миколаїв : НУК.
- [10] Карпеченко, А. А., Бобров М.М. (2021). Формування функціональних плазмових покриттів з комплексом підвищених фізико-механічних та експлуатаційних властивостей. *Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал*. № 1. С. 74-80. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/54443>

© Дубовий О. М., Бобров М. М., Хоменко Б. А., Макаров Д. О.

Дата першого надходження статті до видання: 12.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)