



**Oleksandr
M. Dubovyj**
Дубовий
Олександр
Миколайович

УДК 621.78

MATERIALS SCIENCE ASPECTS OF THE APPLICATION PROBLEM OF DEFORMED NANOSTRUCTURED STEELS AND SPRAYED COATINGS

**МАТЕРІАЛОЗНАВЧІ АСПЕКТИ ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ
ДЕФОРМОВАНИХ НАНОСТРУКТУРОВАНИХ СТАЛЕЙ
І НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ**

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2025.2\(21\).06](https://doi.org/10.15589/smi2025.2(21).06)



**Anton
A. Karpechenko**
Карпеченко
Антон
Анатолійович

Oleksandr M. Dubovyj Дубовий Олександр Миколайович,
докт. техн. наук, проф.
oleksandr.dubovyj@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2843-1879

Anton A. Karpechenko Карпеченко Антон Анатолійович,
канд. техн. наук, доц.
anton.karpechenko@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-7543-4159



**Maksym
M. Bobrov**
Бобров Максим
Миколайович

Maksym M. Bobrov Бобров Максим Миколайович,
канд. техн. наук, доц.
maksym.bobrov@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-9098-6912

Natalia Yu. Lebedeva Лебедєва Наталія Юріївна,
канд. техн. наук, доц.
888lebedeva@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4006-7889



**Natalia
Yu. Lebedeva**
Лебедєва
Наталія
Юріївна

Vira V. Savochkina Савочкіна Віра Володимирівна,
асистент
vira.savochkina@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-7700-4921

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
м. Миколаїв



**Vira
V. Savochkina**
Савочкіна Віра
Володимирівна

Abstract. The authors analyze the challenges of enhancing the physical and mechanical properties of materials operating under extreme conditions, such as corrosion, high mechanical loads, and wear. Special attention is given to methods of severe plastic deformation (SPD), including equal-channel angular pressing (ECAP) and high-pressure torsion (HPT), which enable the production of nanostructured materials with improved strength and hardness. However, the authors note that these methods have limitations related to equipment complexity and the processing of large-scale components. An alternative approach is the use of pre-recrystallization heat treatment (PHT), which improves the mechanical properties of materials by forming a submicrocrystalline structure. Research has shown that PHT following plastic deformation significantly enhances the strength, hardness, and wear

resistance of steels such as 20, 45, U8, 40Cr, and 12Cr13. For example, in steel 20, combined deformation and PHT increase the proportion of nanostructural elements to 62 %, substantially improving its properties. The article also explores thermal spraying methods (plasma and electric arc) for coating deposition, which enhance wear and corrosion resistance. The authors demonstrate that heat treatment of coatings such as PNK-2K10 and Cr18N15 achieves maximum hardness (up to 3.45 GPa) and reduces thermal conductivity by 30 %. Electric arc coatings, particularly those made from 65G wire, show a 45 % increase in wear resistance after PHT. A key finding of the study is the development of a method to stabilize polygonized substructures through combined plastic deformation (30 % dynamic + 30 % static) followed by PHT. This approach extends the thermal stability of the substructure to 60 minutes, enabling industrial applications in large-scale component manufacturing. In conclusion, the authors emphasize that the proposed nanostructuring and heat treatment methods are promising for improving the performance of materials in shipbuilding and marine infrastructure. These techniques reduce maintenance costs, extend the lifespan of structures, and meet modern environmental standards.

Key words: nanostructuring; sprayed coatings; severe plastic deformation; pre-recrystallization heat treatment; wear resistance; thermal spraying.

Анотація. Автори аналізують проблеми підвищення фізико-механічних властивостей матеріалів, які експлуатуються в екстремальних умовах, як-от корозія, високі механічні навантаження та знос. Особливу увагу приділено методам інтенсивної пластичної деформації (ІПД), зокрема рівноканальному кутовому пресуванню (ЕСАР) та крученню під високим тиском (НРТ), які дають змогу отримувати наноструктуровані матеріали з підвищеною міцністю та твердістю. Однак автори зазначають, що ці методи мають обмеження, пов'язані зі складністю обладнання й обробкою великогабаритних деталей. Альтернативним підходом є використання передрекристилізаційної термічної обробки (ПТО), яка дає можливість покращити механічні властивості матеріалів завдяки формуванню субмікрокристалічної структури. Дослідження показали, що ПТО після пластичної деформації значно підвищує міцність, твердість та зносостійкість сталей, як-от 20, 45, У8, 40Х та 12Х13. Наприклад, для сталі 20 після комбінованої деформації та ПТО кількість наноструктурних елементів досягає 62 %, що суттєво покращує її властивості. Окремо розглядаються методи газотермічного напилення (плазмове й електродугове) для нанесення покриттів, які забезпечують підвищену зносостійкість та корозійну стійкість. Автори демонструють, що термічна обробка покриттів, наприклад ПНК-2К10 та ПХ18Н15, дає змогу досягти максимальної твердості (до 3,45 ГПа) та знизити теплопровідність на 30 %. Електродугові покриття, зокрема з дроту 65Г, після ПТО показують збільшення зносостійкості на 45 %. Важливим результатом дослідження є розробка методу стабілізації полігонізаційної субструктури за допомогою комбінованої пластичної деформації (30 % динамічної + 30 % статичної) з подальшою ПТО. Цей підхід дає змогу підвищити термічну стійкість субструктури до 60 хвилин, що відкриває можливості для промислового застосування у виробництві великогабаритних деталей. У висновках автори підкреслюють, що запропоновані методи наноструктурування та термічної обробки є перспективними для підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів у суднобудуванні та морській інфраструктурі. Вони зменшують витрати на обслуговування, підвищують довговічність конструкцій та відповідають сучасним екологічним вимогам.

Ключові слова: наноструктурування; напилені покриття; інтенсивна пластична деформація; передрекристилізаційна термічна обробка; зносостійкість; газотермічне напилення.

References

- [1] 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>
- [2] Edalati, P., Fuji, M. & Edalati, K. (2023). Superfunctional high-entropy alloys and ceramics by severe plastic deformation. *Rare Metals*. 42, 3246–3268. <https://doi.org/10.1007/s12598-023-02340-x>
- [3] Naraj, M., Kumar, D., Suresh, K., & Neelakantan, S. (2023). Effect of equal channel angular pressing on the microstructure and tribocorrosion characteristics of 316L stainless steel. *Vacuum*, 210, 111908. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.111908>

- [4] 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>
- [5] Awasthi, A., Rao, U., Saxena, K., & Dwivedi, R. (2022). Impact of equal channel angular pressing on aluminum alloys: An overview. *Materialstoday: Proceeding*, 57, 908–912. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.037>
- [6] Hashemi, M., Alizadeh, R., & Langdon, T. (2023). Recent advances using equal-channel angular pressing to improve the properties of biodegradable Mg–Zn alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*, 11, 2260–2284. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.07.009>
- [7] Vafaei, R., Toroghinejad, M., & Pippan, R. (2012). Evaluation of mechanical behavior of nano-grained 2024 Al alloy during high pressure torsion (HPT) process at various temperatures. *Materials Science and Engineering: A*, 536, 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.12.064>
- [8] Wang, Yu., Jin, Yu., Guo, Yu., et al. (2024). Phase transformation and mechanical properties of nanocrystalline Ti–2Fe–0.1B alloy processed by high pressure torsion. *Journal of Materials Research and Technology*, 31, 1853–1863. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.164>
- [9] Olugbade, T., Lu, J. (2020). Literature review on the mechanical properties of materials after surface mechanical attrition treatment (SMAT). *Nano Materials Science*, 2, 3–31. <https://doi.org/10.1016/j.nano-ms.2020.04.002>
- [10] Balusamy, T., Venkateswarlu, M., Murthy, K. (2014). Effect of Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT) on the Surface and Electrochemical Characteristics of Pb–Sn Alloy. *International Journal of Electrochemical Science*, 9, 96–108. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)07700-3](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)07700-3)
- [11] Liu, R., Yuan, S., Lin, N. (2021). Application of ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) technique for surface strengthening of titanium and titanium alloys: a mini review. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 351–377. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.013>
- [12] Oh, J., Parl, H., Gwak, M., et. al. (2021). Mechanical property enhancement in gradient structured aluminum alloy by ultrasonic nanocrystalline surface modification. *Materials Science and Engineering: A*, 812, 141101. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141101>
- [13] Vasyliiev, M. O., Mordyuk, B. M., & Sydorenko, S. I. (2016). Syntez deformatsiinykh nanokompozytiv na poverkhni aluminievoho splavu D16 za dopomohoiu ultrazvukovoho udarnoho obroblennia [Synthesis of deformation nanocomposites on the surface of D16 aluminum alloy using ultrasonic impact treatment]. *Metallofizyka ta novitni tekhnolohii – Metallurgy and Advanced Technologies*, 38 (4), 545–563. <https://doi.org/10.15407/mfint.38.04.0545> [in Ukrainian].
- [14] 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>
- [15] 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>
- [16] Karpechenko, A.A., Bobrov, M.M., Makrukha, T.O., & Dubovy, O.M. (2022). Nanostrukturuvannia krystalichnykh materialiv ta napylenykh pokryttiv peredrekristalizatsiinoiu termichnoiu obrobkoiu [Nanostructuring of crystalline materials and sprayed coatings by pre-recrystallization heat treatment]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii: naukovyi zhurnal – Technical sciences and technologies: scientific journal*, 3(29), 27–36. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3\(29\)-27-36](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3(29)-27-36) [in Ukrainian].
- [17] Dubovyy, O., Karpechenko, A., Bobrov, M., Makryha, T., Labartkava, A., & Labartkava, A. (2021). Research of the possibility of nanostructuring functional materials by pre-recrystallization heat treatment, *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, 15(1), 45–51. science.org.ge/bnas/vol-15-1.html

Постановка задачі. Галузь суднобудування та морської інфраструктури працює в одних із найнесприятливіших умов – високій корозійній дії морської води, механіч-

них навантажень від хвиль, ударів, тертя, а також екстремальних коливань температури. Ці фактори призводять до передчасного руйнування конструкцій, збільшу-

ючи витрати на ремонт та обслуговування. Традиційні металеві матеріали (наприклад, звичайні конструкційні сталі) часто не забезпечують достатньої довговічності, що обумовлює потребу в розробці нових матеріалів із покращеними характеристиками. Використання легких і міцних матеріалів дає змогу знизити витрати на паливо та викиди CO₂ завдяки зменшенню маси судна або конструкції, меншого опору води, що відповідає сучасним екологічним стандартам (наприклад, вимогам ІМО 2020, СІП, ЕЕХІ). Збільшення терміну служби матеріалів зменшує частоту ремонтів та заміни деталей, що є економічно вигідним для судноплавних компаній.

Серед основних найважливіших структурних характеристик, які контролюють механічні властивості металевих матеріалів, є розмір зерен. За умов деформації, коли опір пластичній течії контролюється ковзанням дислокацій, зменшення розміру зерен веде до зміцнення матеріалу, яке, згідно зі співвідношенням Холла – Петча, описується залежністю, пропорційною зворотному кореню розміру зерна. На цей час підвищення властивостей сплавів легуванням практично вичерпані, тому їх приріст в останні роки забезпечується переважно цілеспрямованим формуванням здрібненої мікро- і нанокристалічної структури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш поширеним є метод інтенсивної пластичної деформації (ІПД) [1, с. 831; 2, с. 3247], що об'єднує кілька способів, основним з яких є рівноканальне кутове пресування (Equal Channel Angular Pressing ECAP), що полягає у процесі пластичної деформації металевих матеріалів, що здійснюється у спеціально розроблених формах, які мають два або більше каналів, що перетинаються під певним кутом (зазвичай 90°). Застосовується цей спосіб як для нержавіючих сталей [3, с. 3], так і для кольорових сплавів на основі титану [4, с. 2], алюмінію [5, с. 908], магнію [6, с. 2265] та інших. Кручення під високим тиском (High-pressure torsion НРТ) передбачає одночасну дію високого тиску й обертове навантаження, що призводить до значної пластичної

деформації матеріалу, що, зі свого боку, сприяє подрібненню його зерен і формуванню наноструктур [7, с. 75; 8, с. 1857]. Однак використання існуючих методів інтенсивної пластичної деформації для наноструктурування великих деталей стикається з істотними технічними та технологічними проблемами, а саме складністю обладнання та точністю контролю за параметрами процесу, не всі матеріали можуть бути успішно оброблені за допомогою цих методів. Деякі сплави можуть бути чутливими до тріщин або інших дефектів під час процесу, що обмежує вибір матеріалів.

Варто розглянути ще один підхід до вирішення означених проблем низьких властивостей конструкційних матеріалів, а саме їх поверхні. Відомо, що найбільш вразливим елементом у системі «деталь – робоче середовище», який визначає прийнятні умови експлуатації, є поверхня деталі. Одним із перспективних способів підвищення міцності та пластичних характеристик поверхневих шарів металевих матеріалів є модифікація їх структури за допомогою поверхневої механічної обробки тертям (Surface Mechanical Attrition Treatment SMAT). Значне подрібнення вихідної структури зерен і отримання субмікрокристалічних і нанокристалічних структурних станів за подібного роду впливів дає змогу сформувати високоміцні поверхневі прошарки без зміни хімічного складу заготовки. До цього часу в роботах зарубіжних авторів показана можливість підвищення механічних властивостей сталей і кольорових сплавів на основі Ti, Pb, Ni, Cu та ін. [9, с. 11; 10, с. 96] завдяки формуванню в них нано- та субмікронних кристалічних структур. Досягнуто суттєвого прогресу в розумінні фізичних процесів, що протікають за інтенсивної пластичної деформації металів і сплавів на їх основі, у тому числі сталей різних класів [9, с. 12]. Досить перспективними вважаються способи формування нанокристалічного стану в поверхневому шарі, наприклад, ультразвуковим ударним обробленням (Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification UNSM). Так, авторами роботи [11, с. 353] синтезовано нанорозмірні струк-

турні елементи в титані та титанових сплавах і сплаві на основі алюмінію [12, с. 2; 13, с. 547]. При обробці в інертному середовищі сплаву Д16 [13, с. 549] вдалося отримати високоміцні (до 9,5 ГПа) нанокомпозитні покриття деформаційного походження з високими механічними та триботехнічними властивостями. Однак указані методи зміцнення поверхні характеризуються низкою недоліків, які пов'язані з низькою глибиною пластичної деформації, що зазвичай обмежена лише кількома десятками мікрон. Також параметри процесу, як-от енергія удару, частота зіткнень і тривалість обробки, мають вирішальний вплив на кінцеву якість наноструктурованого шару. Однак контроль цих параметрів на практиці може бути складним. Хоча ці методи активно розвиваються, для багатьох нових матеріалів і застосувань потрібні додаткові дослідження для оптимізації процесу та повного розуміння впливу на довговічність і міцність оброблених виробів.

Останнім часом для формування наноструктурованих поверхневих шарів більшої товщини (декілька міліметрів) активно застосовується група методів газотермічного напилення (Thermal Spraying), що характеризуються використанням високотемпературного газового струменя та нагрітих ним і прискорених частинок напилюваного матеріалу, які в разі зіткнення з основою формують покриття. Щодо методів нанесення наноструктурованих газотермічних покриттів, то більшість з них полягає у використанні агломерованих порошків з нанорозмірними частинками [14, с. 1708]. При цьому підготовлені порошки мікронних розмірів подають до високотемпературного струменя традиційним способом за допомогою транспортувального газу. Однак слід відзначити ряд проблем із трудомісткою підготовкою таких напилюваних матеріалів. Також використовують подачу ультрадисперсних порошків до високотемпературного струменя за напилення за допомогою суспензій [15, с. 4]. При цьому виникають труднощі з їх подачею до високотемпературного струменя, що потребує суттєвої модернізації обладнання або навіть створення нових пристроїв.

Означені проблеми наноструктурування як компактних металевих деталей, так і напилених покриттів пропонується вирішувати шляхом проведення деформаційно-термічної обробки, яку названо передрекristалізаційною. Суть її полягає у короткочасній витримці за температури початку рекристалізації матеріалу виробу або покриття. Попередніми дослідженнями встановлено, що вказана обробка деформованих металів [16, с. 30], напилених покриттів [17, с. 48] дає змогу підвищити межу міцності, твердість, міцність втоми, демпфувальні властивості та знизити теплопровідність з одночасним незначним підвищенням пластичності. Запропонований спосіб має ряд переваг над переліченими існуючими способами наноструктурування: немає потреби у використанні високих величин тиску та відповідно деформації (порівняно з ПД); вирішення конструктивних проблем додаткового деформаційного обладнання; можливість застосування для великогабаритних виробів; застосування традиційних напилюваних матеріалів (дротів, порошку) та використання саме можливостей формування дислокаційної субструктури завдяки полігонізаційним процесам; не потрібно застосовувати високовартісні інертні та горючі гази під час напилення. Однак вказана обробка характеризується досить низькою тривалістю витримки за температури рекристалізації, що створює низку обмежень для її більш широкого застосування.

Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми. У цій роботі, на відміну від попередньо розглянутих, пропонується використання додаткової деформації для підвищення тривалості витримки під час термічної обробки шляхом гальмування полігонізаційних процесів.

Мета дослідження полягає в аналізі проблемних питань підвищення термічної стійкості полігонізаційної наномасштабної субструктури металів і сплавів та напилених покриттів, визначенні шляхів їх вирішення щодо практичного застосування.

Методи, об'єкт і предмет дослідження. Зразки компактного матеріалу сталей марок 20; 45; У8; 40Х; 12Х13 у відпаленому

стані у вигляді циліндрів ($\varnothing$ 8 мм, висотою 10 мм) деформували на пресі Р50. Ступінь деформації зразка визначали як відношення різниці висоти до та після деформації. Різний ступінь деформації отримували завдяки використанню обмежувальної за висотою пластини: коли верхня плита преса торкалася пластини, навантаження на зразок припиняли. Змінюючи товщину обмежувальної пластини, змінювали висоту деформування зразка та, як наслідок, ступінь деформації. Термічну обробку зразків здійснювали в лабораторній електричній печі СНОЛ-1.6.2.0.08/9-М1 за температури, яка відповідала температурі первинної рекристалізації матеріалу зразка.

Плазмові покриття отримували за допомогою установки «Київ-7» та УПУ-3Д. У першому випадку як плазмоутворювальний і транспортувальний газ застосовували стиснене повітря. Для другого – аргон. Режим напилення на установці «Київ-7» такий: напруга на дузі – 180 В, сила струму – 150 А, дистанція напилення – 180 мм, витрата плазмоутворювального газу – 6,5 м³/год. Для УПУ-3Д: напруга – 60 В, сила струму – 450 А, витрати плазмоутворювального газу – 2 м³/год. Як напилюваний матеріал використовували порошки нержавіючої сталі ПХ18Н15 та нікелю ПНК-2К10. Порошки перед напиленням прожарювали в сушильній шафі ШСВ 3,5.3,5.6/3,5 за температури 150 °С протягом 3 годин. Підготовку поверхні зразків безпосередньо перед напилюванням здійснювали за допомогою установки струминно-абразивної обробки марки 026-7 «Ремдеталь». Як абразив використовували електрокорунд марки 7Б, шліфзерно номер 125.

Для поверхневої пластичної деформації (ППД) застосовували дробоструменеву обробку, яка вирізняється простотою виконання, технологічністю та високою ефективністю. Обробку проводили на установці моделі 026-7 «Ремдеталь», використовуючи литий чавунний дріб (ДЧЛ) № 08 згідно з ГОСТ 11964-81 як абразивний матеріал. Тривалість обробки зразків із покриттям становила 1 хвилину, оскільки триваліша деформація знижує твердість поверхні через утворення

великої кількості дефектів, які можуть призвести до передчасного руйнування. Електродугові покриття наносили за допомогою установки КДМ-2, у комплект якої входить металізатор ЕМ-14М, на режимі: сила струму – 120 А, напруга – 30 В, тиск стисненого повітря – 0,6 МПа, дистанція напилення – 100 мм. Як напилюваний матеріал використовували дроти марок 65Г та Св-08Г2С діаметром 1,2 мм. Термічну обробку зразків проводили за аналогією з компактними сталевими зразками. Вимірювання твердості за Віккерсом проводили з використанням твердоміру типу ТП. Зносостійкість визначали за допомогою машини тертя СМЦ-2 за схемою «диск – колодка» з обмеженою подачею мастила на рівні 30 крапель на хвилину. Для мастила використовували моторне масло марки М10Г2К згідно з ГОСТ 8581-75. Швидкість обертання ролика становила 0,8 м/с, а тиск – 4 МПа. Вимірювання втрат маси проводили після приробітку на терезах ТВЕ-0.21 через кожні 10 км шляху. Загалом було здійснено 10 вимірів. Колодку та ролик виготовляли зі сталі 45. Після знежирення та струменево-абразивної обробки на ролик наносили електродугове покриття. Колодку піддавали термічному поліпшенню: для цього проводили гартування за температури 840 °С з витримкою 50 хвилин і охолодженням у воді, що дало твердість HRC 54–55. Потім здійснювали відпуск за температури 550 °С з витримкою 1 годину й охолодженням на повітрі. Твердість після відпуску становила HRC 30–32.

Основний матеріал. Після передрекристалізаційної термічної обробки (ПТО) механічні властивості сталей значно поліпшуються. Це чітко видно на прикладі сталі 20 (табл. 1), де підвищення властивостей обумовлене наявністю наномасштабних елементів у структурі. Кількість і розмір наномасштабних субструктурних елементів було визначено в роботах [16, 17].

ПТО сталі 20 (табл. 1) привела до формування субзеренної структури на основі α -фази (рис. 1).

Кожний кристал у середньому розбивається повздовжніми границями, які, зі свого боку, поперечними границями діляться

Таблиця 1. Механічні властивості сталі 20 залежно від виду обробки

Вид обробки	σ_s , ГПа	δ , %	Ψ , %	Кількість наномасштабних структурних елементів, %
Відпал 800 °С, 60 хв	0,36	16	57	–
Деформація 60 %	0,62	3	9	11,2
Деформація 60 % з наступною ПТО 500 °С, 1,5 хв	0,78	4	15	15,6

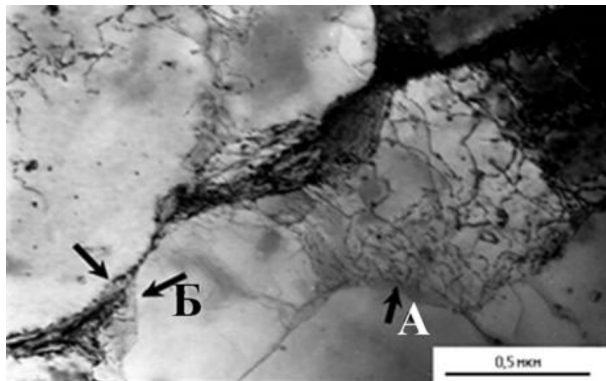


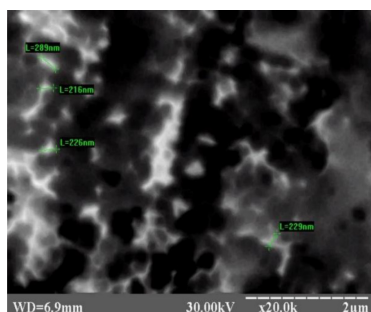
Рис. 1. Мікроструктура сталі 20 після передрекристалізаційної термічної обробки за температури 500 °С, 1,5 хв. (А – формування дислокаційних комірок; Б – утворення малокутових границь)

на нанорозмірні кристаліти. Здійснюється формування малокутових границь із кутом розорієнтування $\sim 10^\circ$. Середній розмір субзерен, що виявлено під час аналізу зображень структури сталі 20, становить 184 нм. У межах зерен і субзерен спостерігаються формування дислокаційних сіток; щільність дислокацій складає $\rho \sim 2,1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. ПТО сталі 20 не приводить до повного зниження дальнодіючих напружень, які формуються в структурі за пластичної деформації. Про це свідчать вигнуті контури, які спостерігаються у великій кількості. Джерелами дальнодіючих напружень є границі і стики субзерен.

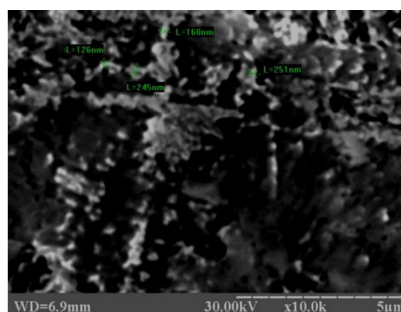
Таким чином, холодна пластична деформація сталі 20 дає змогу сформувати в ній орієнтовану структуру з високою щільніс-

тю дислокацій, хаотично розташованих по всьому об'єму зразка. Подальша ПТО за температури 500 °С з витримкою 1,5 хвилини дає змогу трансформувати отриману субструктуру в субмікрокристалічну шляхом впорядкування дефектів формування дислокаційних сіток і появи ділянок із малокутовими границями. Дослідження мікроструктури сталі 12Х2Н4МА показало, що ПТО призводить до здрібнення субструктури (рис. 2), про це свідчить зменшення розмірів субструктурних складових, а також збільшення їх кількості з 10,8 % після дробоструменевої обробки до 18,8 % після ПТО.

Збільшення твердості поверхні щоки муфти зі сталі 18Х2Н4МА газотурбінного двигуна після термічної обробки (500 °С, 3 хв) становило 40 %, втомна міцність зросла у 2,7 раза, а межа міцності – на 11 %, при цьому збереглися показники пластичності. Дослідження термічної стійкості подрібненої полігонізаційної субструктури сталі 12Х18Н10Т показали, що повторна пластична деформація на 52 % та термічна обробка після 60 % деформації дають змогу збільшити тривалість витримки до 20 хвилин. Це обумовлено утворенням нерухомих дислокаційних сплетінь, які блокують ріст субзерен під час повторного нагрівання. Проте цей метод характеризується технологічною складністю.



а



б

Рис. 2. Мікроструктура сталі 18Х2Н4МА: а після дробоструменевої обробки 120 хв, тиск 0,2 МПа; б після дробоструменевої обробки з подальшою передрекристалізаційною термічною обробкою 500 °С, 3 хв

Запропоновано метод стабілізації полігонізаційної субструктури сталей, який полягає в комбінованому динамічному пластичному деформуванні на 30 % і статичному деформуванні на 30 %, що забезпечує аналогічний стабілізуючий ефект. Така обробка дає змогу підвищити термічну стійкість полігонізаційної субструктури технічно чистого заліза та сталей марок 20, 45, У8, 40Х, 12Х13 до 60 хвилин, що відкриває широкі можливості для промислового використання. Ефективність цього методу обробки сталей можна проілюструвати на прикладі механічних властивостей сталі марки 20 (табл. 2).

Результати, наведені в таблиці 2, показують збільшення механічних властивостей сталі 20 після комбінованого деформування та подальшої термічної обробки (ПТО) порівняно зі станом після деформації завдяки зростанню кількості нанорозмірних структурних елементів. Порівняльні дослідження технологій термічної обробки пружин зі сталі 70 та комбінованого деформування з наступною 60-хвилинною ПТО виявили, що твердість за шкалою Віккерса після ПТО на 30 % нижча, ніж після запропонованого комбінованого підходу, що свідчить про потенціал його застосування як альтернативи традиційній термообробці.

ПТО сприяє покращенню фізико-механічних властивостей напилених покриттів. Під час формування покриття напиленням процеси удару та деформації частинок супроводжуються їх кристалізацією, при цьому фронт кристалізації інтенсивно просувається від поверхні основи вглиб частинки. Це викликає тиск на затверділий матеріал з боку рідкого розплаву, що спричиняє пластичну деформацію. Також у реальному процесі напилення ймовірність потрапляння частинок у підкладку під час кристалізації мінімальна, навіть у центрі струменя за максимального значення коефіцієнта зосе-

редженості. Гаряча деформація з високими швидкостями та ступенями з подальшим швидким охолодженням нижче за температуру рекристалізації дає змогу зберегти наклеп, а в разі плазмового й електродугового напилення швидкість охолодження частинок може досягати 10^8 К/с. Така висока швидкість унеможливорює протікання процесів динамічної рекристалізації, що дає змогу зберегти деформований стан матеріалу покриття, тим самим покращуючи його властивості.

Дослідження впливу часу витримки зразків із плазовими покриттями з ПНК-2К10 за температур початку первинної рекристалізації 480 і 420 °С (рис. 3) показало, що твердість HV₅ спочатку збільшується, досягає максимуму, а потім знижується. Після напилення покриттів на установці «Київ-7» твердість зразків становила 2,05 ГПа (експеримент 1), а на установці УПУ-3Д (аргон) – 1,4 ГПа (експеримент 2). Умови напилення в експерименті 1 забезпечували вищу швидкість частинок порошку порівняно з експериментом 2, що приводило до більшої деформації під час формування покриття.

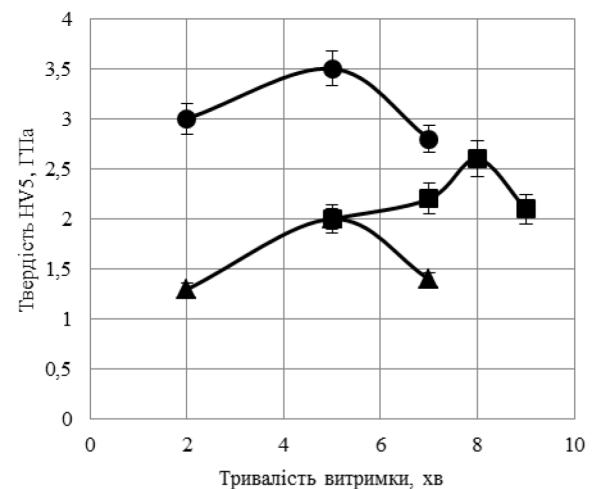


Рис. 3. Залежність твердості покриття ПНК-2К10 від температури та часу витримки за термічної обробки:
● – дослід № 1 (480 °C); ■ – дослід № 1 (420 °C);
▲ – дослід № 2 (480 °C)

Таблиця 2. Вплив комбінованого деформування та подальшої ПТО на механічні властивості сталі 20

Вид обробки	σ_s , ГПа	δ , %	Ψ , %	Твердість HV ₅ , ГПа	Кількість наномасштабних структурних елементів, %
Комбінована деформація	0,3	7,0	74	1,8	55
Комбінована деформація та ПТО протягом 2 хв	0,6	5,3	75	2,3	66
Комбінована деформація та ПТО протягом 60 хв	0,4	7,5	59	2,0	62

Максимальний рівень твердості досягається після термічної обробки за температури 480 °С з витримкою 5 хвилин (охладження на повітрі) і становить 3,45 ГПа (експеримент 1) та 2,05 ГПа (експеримент 2). За температури 420 °С максимальне значення твердості – 2,75 ГПа (експеримент 1) – досягається також після витримки 5 хвилин. Отримані значення на 30...70 % перевищують твердість покриттів у стані після напилення. Термічна обробка покриття з ПНК-2К10 (експеримент 1) за температури 640 °С, що перевищує температуру первинної рекристалізації, не дала суттєвого збільшення твердості – 2,24 ГПа.

Схожа залежність твердості від часу витримки за температури початку первинної рекристалізації спостерігається і в разі термообробки зразків із плазовими покриттями ПХ18Н15 (рис. 4), напиленими на установці «Київ-7» із застосуванням режимів, що забезпечують різний ступінь деформації частинок порошку під час формування покриття.

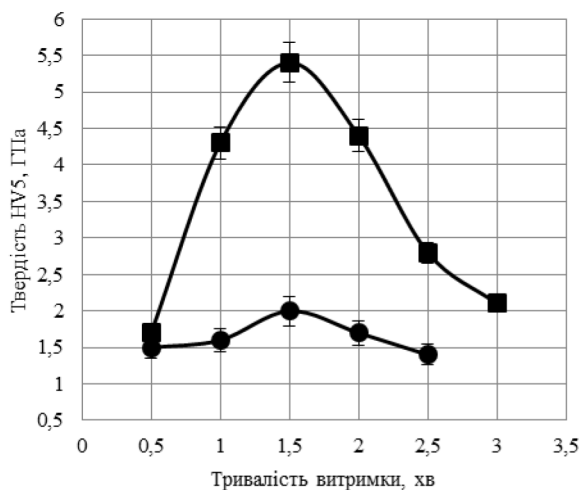


Рис. 4. Залежність твердості покриття ПХ18Н15 від температури та часу витримки за термічної обробки:
● – дослід № 3; ■ – дослід № 4

Режим нанесення плазового покриття в експерименті 3 забезпечував меншу деформацію порошкових частинок порівняно з експериментом 4. Максимальна твердість для обох експериментів досягається після витримки 1,5 хв за температури 880 °С і становить відповідно 1,58 та 3,63 ГПа. Аналіз мікроструктури плазових покриттів із ПНК-2К10, проведений за допомогою

оптичного металографічного мікроскопа ММУ-3 із збільшенням $\times 500$ і електронного мікроскопа РЕММА-102-02 із збільшенням $\times 3000$, показав, що зміни у структурі покриттів до і після термообробки відсутні. Це вказує на те, що підвищення твердості обумовлено структурними елементами розміром менше за 0,5 мкм. Дослідження впливу термообробки, яка забезпечує максимальну твердість плазового покриття з ПНК-2К10, на теплопровідність показали, що коефіцієнт теплопровідності зменшується в середньому на 30 %.

Електродуговий метод нанесення покриттів є економічно ефективним завдяки своїй простоті та мобільності. Електродугові покриття виявляють найбільшу результативність щодо підвищення фізико-механічних властивостей після ПТО порівняно з іншими газотермічними методами. Наприклад, твердість (HV5) електродугових покриттів зі сплаву Св-08Г2С становила 1,64 ГПа після нанесення. Після ПТО (500 °С, 1,5 хв) твердість підвищилася до 2,32 ГПа, що на 40 % більше, ніж у початковому стані після нанесення, при цьому розмір областей когерентного розсіювання рентгенівських променів (ОКР) становив 61,9 нм. Зі збільшенням витримки до 20 хв розмір ОКР зріс до 118 нм.

Твердість покриття, нанесеного з дроту 65Г, була 2,7 ГПа після напилення. Після ПТО за температури 400 °С та витримки впродовж 3 хвилин твердість зросла до 3,4 ГПа. Таке підвищення пояснюється зменшенням розмірів субструктури, що підтверджується зростанням частки наноструктурних елементів з 21 до 33 % після ПТО. Термообробка напилених покриттів підвищує міцність зчеплення з основою та зменшує теплопровідність. Дослідження показали, що отримана після ПТО субструктура напилених покриттів має низьку термічну стабільність, аналогічну компактним матеріалам, через протікання процесів полігонізації під час тривалої витримки за підвищених температур. Це обмежує використання такої обробки для великих виробів.

Виявлено, що додаткова пластична деформація пресуванням на 40 % електро-

дугового покриття з дроту Св-08Г2С забезпечує стабільність субструктури (до 90 хв) і високу твердість (близько 3,0 ГПа). Оскільки пластична деформація пресуванням на готових виробах може бути технічно складною, актуальними є дослідження стабілізації субструктури методом попередньої поверхневої пластичної деформації (ППД), наприклад дробоструменевою обробкою. Результати досліджень свідчать, що дробоструменева обробка забезпечує стабільність полігонізаційної субструктури після ПТО в разі витримки 30–40 хв. Економічна доцільність використання ППД та подальшої ПТО покриттів визначається суттєвим підвищенням зносостійкості. Графік результатів зносостійкості покриттів наведено на рис. 5.

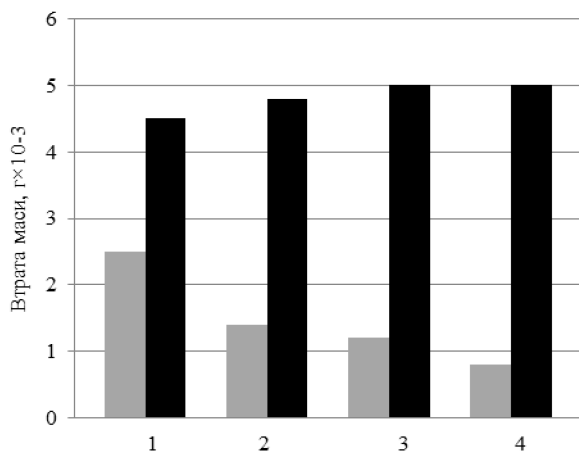


Рис. 5. Результати визначення зносостійкості електродугових покриттів з дроту 65Г: 1 – після напильника; 2 – напильника + ПТО; 3 – напильника + ППД; 4 – напильника + ППД + ПТО; ■ – покриття, ■ – контроль

Згідно з наведеними даними ППД та ПТО електродугового покриття із дроту 65Г забезпечує підвищення зносостійкості на 45 %.

Обговорення отриманих результатів.

Отримані результати демонструють значний потенціал застосування наноструктурованих деформованих сталей і напильних покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів у суднобудуванні та морській інфраструктурі. Дослідження показали, що комбінована пластична деформація (30 % динамічна + 30 % статична) з подальшою ПТО призводить до формування стабільної полігонізаційної субструктури з високою щільністю нанорозмірних еле-

ментів. Наприклад, у сталі 20 вдалося досягти збільшення межі міцності до 0,78 ГПа (порівняно з 0,36 ГПа у відпаленому стані) та підвищення кількості наноструктурних елементів до 62 %. Це свідчить про ефективність запропонованого методу для підвищення міцності без суттєвого зниження пластичності. Важливим результатом є те, що термічна стабільність субструктури зросла до 60 хвилин, що відкриває можливість промислового застосування для великогабаритних виробів. Однак, як показали дослідження сталі 12Х18Н10Т, триваліша витримка за високої температури може призводити до часткового відновлення зеренної структури, що обмежує максимальний час термообробки. Дослідження показали, що короткочасна термообробка значно покращує експлуатаційні характеристики напильних покриттів. Для покриттів (ПНК-2К10) оптимальний режим (480 °С, 5 хв) дає змогу досягти твердості 3,45 ГПа – на 68 % вище за початкове значення. Аналогічний ефект спостерігається для нержавіючих сталей (ПХ18Н15), де твердість зростає до 3,63 ГПа. Особливо ефективна комбінація термообробки з попередньою поверхневою пластичною деформацією, що забезпечує синергетичний ефект. Для електродугових покриттів з дроту 65Г такий підхід дає змогу досягти ресурсу роботи, що перевищує показники традиційних аналогів в 1,8–2,2 рази під час експлуатації в морських умовах. Запропоновані методи мають низку переваг порівняно з традиційними підходами, як-от ППД або поверхневе модифікування (SMAT, UNSM): відсутність потреби у високих тисках, що спрощує технологічний процес; можливість обробки великогабаритних деталей, які важко піддаються ППД.

Таким чином, наукова новизна статті полягає в такому: 1) у розробці методу комбінованої пластичної деформації (30 % динамічної + 30 % статичної) з подальшою передрекristалізаційною термічною обробкою (ПТО), що дає змогу значно підвищити термічну стабільність полігонізаційної субструктури до 60 хвилин, що є ключовим для промислового застосування, особливо для великогабаритних виробів у

суднобудуванні та морській інфраструктурі; 2) для сталі 20 вдалося досягти збільшення межі міцності до 0,78 ГПа (порівняно з 0,36 ГПа у відпаленому стані) та підвищення кількості наноструктурних елементів до 62 %. Це свідчить про ефективність запропонованого методу для підвищення міцності без суттєвого зниження пластичності; 3) дослідження показали, що термічна обробка покриттів (наприклад, ПНК-2К10 та ПХ18Н15) дає змогу досягти максимальної твердості (до 3,45 та 3,63 ГПа відповідно) та знизити теплопровідність на 30 %, що відкриває нові можливості для застосування таких покриттів в екстремальних умовах; 4) запропоновані методи позбавляються недоліків традиційних методів інтенсивної пластичної деформації (ІПД), як-от необхідність у високих тисках або обмеження в обробці великогабаритних деталей, що робить їх більш доступними для промислового використання.

Висновки. 1. Проведено аналіз проблем застосування наноструктурованих деформованих сталей і напилених покриттів. Виявлено, що через низьку термічну стабільність полігонізаційної субструктури (1–3 хв) перекристалізаційна термообробка не може бути використана для великих виробів.

2. Доведено, що комбінована пластична деформація (30 % динамічна + 30 % статична) з наступною термообробкою підвищує термічну стійкість полігонізаційної субструктури технічно чистого заліза та сталей до 60 хв. Наприклад, у сталі 20 кількість наноструктурних елементів при цьому досягає 62 %, що дає змогу підвищити фізико-механічні характеристики масивних сталевих виробів за допомогою термообробки.

3. Встановлено, що пластична деформація напилених покриттів забезпечує стабільність полігонізаційної субструктури протягом 30–40 хв, підвищуючи зносостійкість електродового покриття з дроту 65Г на 45 %.

Список літератури

- [1] Borisov A. S., Naumov A. A., Borisova A. Y., et al. Effect of Severe Plastic Deformation on the Formation of the Nonferrous Metal Alloy Microstructure. *Steel in Transation*. 2023. Vol. 53. P. 830–836 <https://doi.org/10.3103/S0967091223100054>
- [2] Edalati P., Fuji M., & Edalati K. Superfunctional high-entropy alloys and ceramics by severe plastic deformation. *Rare Metals*. 2023. Vol. 42. P. 3246–3268. <https://doi.org/10.1007/s12598-023-02340-x>
- [3] Naraj M., Kumar D., Suresh K., & Neelakantan S. Effect of equal channel angular pressing on the microstructure and tribocorrosion characteristics of 316L stainless steel. *Vacuum*. 2023. Vol. 210. P. 111908. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.111908>
- [4] Sahoo P. S., Meher A., Mahapatra M. M., et al. Analysis of mechanical and microstructural characteristics of plunger-assisted ECAP strengthened Ti-6Al-4V alloy sheets. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2023. Vol. 23. P. 194. <https://doi.org/10.1007/s43452-023-00742-3>
- [5] Awasthi A., Rao U., Saxena K., & Dwivedi R. Impact of equal channel angular pressing on aluminum alloys: An overview. *Materialstoday: Proceeding*. 2022. Vol. 57. P. 908–912. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.037>
- [6] Hashemi M., Alizadeh R., & Langdon T. Recent advances using equal-channel angular pressing to improve the properties of biodegradable Mg–Zn alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023. Vol. 11. P. 2260–2284. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.07.009>
- [7] Vafaei R., Toroghinejad M., & Pippin R. Evaluation of mechanical behavior of nano-grained 2024 Al alloy during high pressure torsion (HPT) process at various temperatures. *Materials Science and Engineering: A*. 2012. Vol. 536. P. 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.12.064>
- [8] Wang Yu., Jin Yu., Guo Yu., et al. Phase transformation and mechanical properties of nanocrystalline Ti–2Fe–0.1B alloy processed by high pressure torsion. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 31. P. 1853–1863. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.164>
- [9] Olugbade T., Lu J. Literature review on the mechanical properties of materials after surface mechanical attrition treatment (SMAT). *Nano Materials Science*. 2020. Vol. 2. P. 3–31. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2020.04.002>

- [10] Balusamy T., Venkateswarlu M., Murthy K. Effect of Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT) on the Surface and Electrochemical Characteristics of Pb-Sn Alloy. *International Journal of Electrochemical Science*. 2014. Vol. 9. P. 96–108. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)07700-3](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)07700-3)
- [11] Liu R., Yuan S., Lin N. Application of ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) technique for surface strengthening of titanium and titanium alloys: a mini review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 11. P. 351–377. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.013>
- [12] Oh J., Parl H., Gwak M., et al. Mechanical property enhancement in gradient structured aluminum alloy by ultrasonic nanocrystalline surface modification. *Materials Science and Engineering: A*. 2021. Vol. 812. P. 141101. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141101>
- [13] Васильєв М. О., Мордюк Б. М., Сидоренко С. І. Синтез деформаційних нанокompозитів на поверхні алюмінійового сплаву Д16 за допомогою ультразвукового ударного оброблення. *Металофізика та новітні технології*. 2016. №4. С. 545–563. <https://doi.org/10.15407/mfint.38.04.0545>
- [14] Chen J., An Y., Liu G., et al. Tribological Performance and Thermal Stability of a Novel Cold Sprayed Nanostructured Ni-based Lubrication Coating. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2022. Vol. 31. P. 1702–1711. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01368-2>
- [15] Guo L., Zhang B., He Q., Liu M., & Liang L. Fabrication and characterization of thermal barrier coatings for internal combustion engines via suspension plasma spray with high solid loading. *Surface and Coatings Technology*. 2024. Vol. 479. P. 130523. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130523>
- [16] Карпеченко А. А., Бобров М. М., Макруха Т. О., Дубовий О. М. (2022). Наноструктурування кристалічних матеріалів та напилених покриттів передрекristалізаційною термічною обробкою. *Технічні науки та технології: науковий журнал*. 2022. № 3(29). С. 27–36. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3\(29\)-27-36](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3(29)-27-36)
- [17] Dubovy O., Karpechenko A., Bobrov M. Makryha T., Labartkava A., & Labartkava A. Research of the possibility of nanostructuring functional materials by pre-recrystallization heat treatment, *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*. 2021. Vol. 15(1). P. 45–51. science.org.ge/bnas/vol-15-1.html

© Дубовий О. М., Карпеченко А. А., Бобров М. М., Лебедева Н. Ю., Савочкіна В. В.

Дата надходження статті до редакції: 06.05.2025

Дата затвердження статті до друку: 12.06.2025

Дата публікації статті: 04.11.2025

