

Антон Карпеченко¹, Тетяна Макруха², Олександр Дубовий³, Максим Бобров⁴

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (Миколаїв, Україна)

E-mail: anton.karpechenko@nuos.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7543-4159>. ResearcherID: [57194341724](https://orcid.org/57194341724)

²кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки та інформаційних технологій

Економіко-технологічний інститут імені Роберта Ельворгі (Кропивницький, Україна)

E-mail: tmakruha@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8841-1688>. ResearcherID: [57222660526](https://orcid.org/57222660526)

³доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри матеріалознавства і технології металів

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (Миколаїв, Україна)

E-mail: oleksandr.dubovyi@nuos.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2843-1879>. ResearcherID: [57194338570](https://orcid.org/57194338570)

⁴кандидат технічних наук, докторант кафедри матеріалознавства і технології металів

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (Миколаїв, Україна)

E-mail: laborantmtm@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9098-6912>. ResearcherID: [57194197238](https://orcid.org/57194197238)

НАНОСТРУКТУРУВАННЯ КРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ ПЕРЕДРЕКРИСТАЛІЗАЦІЙНОЮ ТЕРМІЧНОЮ ОБРОБКОЮ

У статті висвітлено доцільність застосування передрекристилізаційної термічної обробки (ПТО) попередньо деформованих технічно чистого заліза, вуглецевих та легованих сталей для підвищення їхньої твердості за рахунок формування полігонізаційної субструктури, здебільшого нанорозмірної. Показано, що збільшення вмісту вуглецю та хрому у сталях, при короткочасній витримці при температурі рекристилізації, призводить до зниження приросту твердості. Комбіноване деформування (динамічне та статичне) надає можливість збільшити час витримки до 60 хв за рахунок формування термічно стабільної полігонізаційної субструктури. Визначено оптимальний режим ПТО теплозахисного плазмового покриття, що забезпечує підвищення твердості на 13 % та зниження теплопровідності керамічного шару на 15 % у порівнянні зі станом після напилення за рахунок субструктурних змін.

Ключові слова: передрекристилізаційна термічна обробка; субструктура; нанорозмірні елементи; теплозахисні покриття, твердість, теплопровідність.

Рис.: 9. Табл.: 3. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. Сучасне високотехнологічне виробництво потребує нових матеріалів з унікальними властивостями, а їх застосування в конструкціях визначається співвідношенням між міцністю та пластичністю, тому металеві матеріали характеризуються найпривабливішим з погляду практичної доцільності співвідношенням. Приріст міцнісних властивостей останніми роками забезпечується в основному за рахунок цілеспрямованого формування здрібненої мікро- і нанокристалічної структури.

Постановка проблеми. Подрібнення зеренної (субзеренної) структури до нанокристалічного стану здійснюють переважно найпоширенішими методами інтенсивної пластичної деформації (ІПД). До методів ІПД належать інтенсивна пластична деформація крученням під високим тиском і рівноканальне кутове пресування (РККП), яке найбільш широко застосовується та має різновиди: деформування тертям і метод всебічного кування (пресування). Всебічне ізотермічне кування подається як один з основних і ефективних методів наноструктурування масивних (до 50 кг) виробів. Об'ємне наноструктурування методами ІПД застосовується в техніці для одержання виробів невеликого розміру (авіаційні кріплення, медичні імпланти, деталі приладів тощо). Наноструктурування деталей великого розміру методами ІПД викликає значні технічні та технологічні труднощі і не є економічно доцільним. Основна частина цих методів не доведена до практичного застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Високих показників фізико-механічних властивостей металів і сплавів можна досягти наноструктуруванням [1]. Подрібнення зеренної (субзеренної) структури до нанокристалічного стану здійснюють переважно найпоширенішими методами інтенсивної пластичної деформації [2]. Однак на сьогодні промислові методи отримання наноструктури по всьому об'єму реального виробу є досить складними і, як наслідок, дорогими з економічного погляду [3].

В останні десятиріччя використовуються способи механотермічної і термомеханічної обробки, які дозволяють підвищити якість прокатних і кованих виробів шляхом формування полігонізаційної субструктури [4-6]. Для формування такої субструктури використовується і фазовий наклеп (подвійне гартування) [7], у результаті якого міцнісні характеристики можуть підвищитись до 60 %. Отримання полігонізаційної субструктури у високовуглецевих сталях за допомогою високотемпературної термомеханічної обробки при 1050 °С забезпечує підвищення міцності до 30%, ударної в'язкості – вдвічі [6].

У роботі [8] описано спосіб термомеханічного зміцнення сталей при пластичній деформації $\varepsilon = 20...40\%$ з наступним гартування при температурі 800...900 °С. У результаті після такого термомеханічного зміцнення збільшується дисперсність мікроструктури сталей, а твердість знаходиться у діапазоні 50...55 HRC.

Автори роботи [9] пишуть про можливість підвищення міцнісних властивостей сталей 12X18H12T та 12X1МФ при різних ступенях деформації ($\varepsilon = 6,25; 12,5; 18,75; 25,0$ та 37,5 %) за температури (650±10) °С впродовж 1...10 год, після чого показники міцності підвищуються на 12...14 %, проте пластичність знижується на 25 %.

При дослідженні впливу гарячої деформації сталі 60 [10] було встановлено, що при гарячій пластичній деформації на 10...50 % при температурі 800...1000 °С можна зменшити розмір зерна аустеніту, однак даний показник залишається в діапазоні 45...160 мкм, що не відповідає наноструктурному масштабу.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У зв'язку з цим розробка нових методів наноструктурування, спрямованих на поліпшення фізико-механічних властивостей та підвищення показників експлуатаційних характеристик металів і сплавів, а також напилених покриттів є актуальним завданням сучасного матеріалознавства.

Мета роботи полягає у встановленні закономірностей зміни структури та властивостей кристалічних матеріалів після деформаційної та передрекристалізаційної термічної обробки.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для досліджень було обрано зразки технічно чистого заліза (ГОСТ 3836-83), вуглецевих сталей 20, 45 (ГОСТ 1050-88) та У8 (ГОСТ 1435-88), легованих сталей 40Х (ГОСТ 2591-2006), 12Х13 та 12Х18Н9Т (ГОСТ 2590-2006) і теплозахисне плазмове покриття.

Для дослідження структури та субструктури використані методи фізичного матеріалознавства – оптична мікроскопія, скануюча електронна мікроскопія, рентгенівський структурно-фазовий аналіз.

Динамічну деформацію зразків проводили ударною циклічною дією. Статичну деформацію проводили на гідравлічному пресі Losen Housen WLRK (Dusseldorf) з навантаженням до 35 т. Термічну обробку здійснювали в лабораторній електричній печі СНОЛ-1.6.2.0.08/9-М1. Контроль температури здійснювався термопарою хромель-алюмель ТХА (ГОСТ 6616-74).

Аналіз мікроструктури проводили на металографічному мікроскопі MMP-2P та скануючому електронному мікроскопі ZEISS Gemini SEM 500.

Твердість HV_5 визначали на приладі типу «Віккерс» (на повздовжніх шліфах) при навантаженні на індентор 5 кг (ДСТУ ISO 6507-4:2008).

Дослідження теплопровідності покриттів проводили за допомогою вимірювача ИТ-λ-400, що призначений для дослідження залежності коефіцієнта теплопровідності матеріалів від температури в діапазоні 0,1...5,0 Вт/(м·К). Для вимірювання теплопровідності використовується метод динамічного калориметра.

Зйомку дифрактограм проводили за допомогою рентгенівського дифрактометра загального призначення ДРОН-3.0. Розмір областей когерентного розсіювання рентгенівських випромінювань (ОКР) визначали за формулою Шеррера.

Дослідження залежності твердості деформованих технічно чистого заліза, вуглецевої і низьколегованої сталі від часу витримки при температурах, які відповідають температурному порогу їх рекристалізації, показали, що вона носить екстремальний характер з чітким максимумом і надає можливість її підвищення від 15 до 45 % у порівнянні з деформованим станом (рис. 1 та табл. 1).

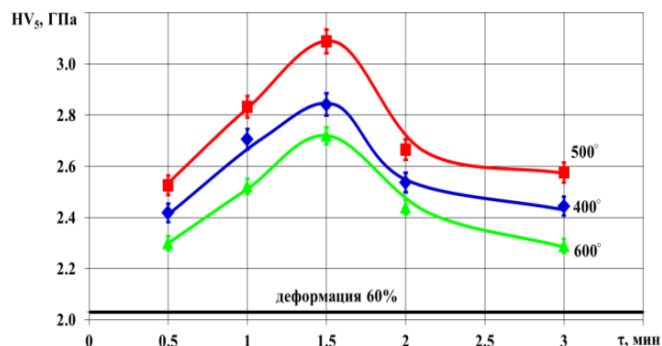


Рис. 1. Залежність твердості від тривалості витримки і температури ПТО технічно чистого заліза

Таблиця 1 – Значення твердості сталі 20 залежно від виду обробки

Вид обробки	Твердість	
	HV ₅ , ГПа	HRC
Відпал 850 °С, 60 хв	1,27	12
Деформація 60 %	1,62 (+28)	16 (+33)
Деформація 60%, ПТО 500 °С, витримка 1,5 хв	2,4 (+89/48)	22 (+83/38)

* у дужках вказано приріст твердості у % відносно відпаленого/деформованого стану.

Наступні дослідження щодо впливу вуглецю на максимальну твердість при недовготривалій витримці при температурі рекристалізації показали, що збільшення його вмісту у сталі приводить до зниження приросту твердості (рис. 2).

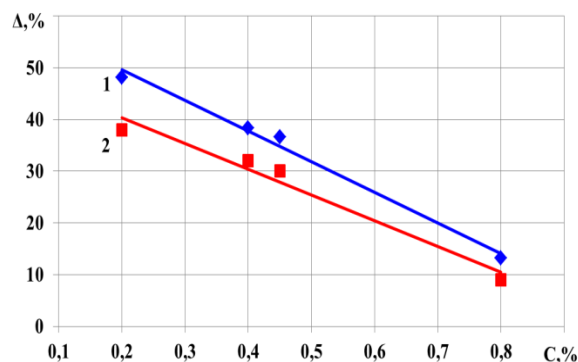


Рис. 2. Залежність приросту твердості після передрекристалізаційної термічної обробки від вмісту вуглецю у сталі:
1 – HV₅, ГПа; 2 – HRC

Така залежність пояснюється тим, що зі збільшенням кількості вуглецю у сталі збільшується кількість цементиту, який, маючи високу твердість, гальмує утворення дислокаційних сплетінь в процесі пластичної деформації [6].

Подібний ефект зменшення приросту твердості після передрекристалізаційної термічної обробки (ПТО) спостерігається і при легуванні сталі хромом. Збільшення концентрації хрому в сталі сприяє утворенню карбідів, які накопичуються на границях субзерен, блокують дислокації при пластичній деформації на початковій стадії полігонізації (табл. 2).

Таблиця 2 – Значення твердості для легованих сталей залежно від виду обробки

Марка сталі	Вид обробки	Твердість	
		HV ₅ , ГПа	HRC
40X	Відпал 760 °С, 60 хв	1,72	20,5
	Деформація 60 %	2,0 (+16)	24 (+17)
	Деформація 60%, ПТО 500 °С, витримка 1 хв	2,35 (+37/18)	28 (+36/16)
12X13	Відпал 740 °С, 60 хв	2,12	32
	Деформація 60 %	2,52 (+21)	39,5 (+23)
	Деформація 60%, ПТО 500 °С, витримка 1,5 хв	2,9 (+40/15)	44,5 (+39/13)
20X13	Відпал 720 °С, 60 хв	2,26	32
	Деформація 60%	2,61 (+17)	40 (+24)
	Деформація 60%, ПТО 500 °С, витримка 2 хв	2,89 (+29/11)	44 (+39/12)
40X13	Відпал 800 °С, 60 хв	2,29	34,5
	Деформація 60 %	2,7 (+16)	41 (+19)
	Деформація 60%, ПТО 500 °С, витримка 2 хв	2,93 (+28/9)	43,5 (+26/6)
12X18H10T	Відпал 860 °С, 60 хв	1,78	19
	Деформація 60 %	2,46 (+38)	24,5 (+29)
	Деформація 60%, ПТО 500 °С, витримка 2 хв	2,7 (+52/10)	27 (+42/10)

* у дужках вказано приріст твердості у % відносно відпаленого/деформованого стану.

У результаті ПТО відбувається поліпшення фізико-механічних властивостей пластично деформованих сталей. Механізм такого поліпшення пов'язаний із здрібненням субструктури, що підтверджується зменшенням розмірів областей когерентного розсіювання рентгенівських випромінювань (табл. 3).

Таблиця 3 – Розмір ОКР сталей до та після ПТО

Марка сталі	Вид обробки	Розмір ОКР, нм
20	Відпал 850 °С, 60 хв	> 200
	Деформація 60 %	149
	Деформація 60%, ПТО 500 °С, витримка 1,5 хв	87
40	Відпал 820 °С, 60 хв	> 200
	Деформація 60 %	198
	Деформація 60%, ПТО 500 °С, витримка 1,5 хв	137
У8	Відпал 750 °С, 60 хв	> 200
	Деформація 60 %	159
	Деформація 60%, ПТО 500 °С, витримка 2 хв	79
20X13	Відпал 720 °С, 60 хв	197
	Деформація 60 %	63
	Деформація 60%, ПТО 500 °С, витримка 2 хв	44
12X18H10T	Відпал 860 °С, 60 хв	> 200
	Деформація 60 %	144
	Деформація 60 %, ПТО 500 °С, витримка 2 хв	76

Відомо, що наноструктурування допомагає поліпшити фізико-механічні властивості не тільки компактних матеріалів, але й покриттів [11-13]. Тому на прикладі теплозахисного плазмового покриття з $ZrO_2 + 7\% Y_2O_3$ було виконано дослідження впливу передрекристалізаційної термічної обробки на зміну їхніх властивостей. Покриття наносили за допомогою установки плазмового напилення УПУ-ЗД, яка укомплектована плазмотроном ПН-14М, на нікелевий жароміцний сплав, який перед напиленням піддавали струменево-абразивній обробці, після чого досліджували зміну твердості та теплопровідності отриманого покриття.

У результаті досліджень визначено оптимальний режим передрекристалізаційної термічної обробки теплозахисного плазмового покриття з $ZrO_2 + 7\% Y_2O_3$, що забезпечує підвищення твердості на 13 % (рис. 3) та зниження теплопровідності керамічного шару на 15 % (рис. 4) у порівнянні зі станом після напилення за рахунок субструктурних змін.

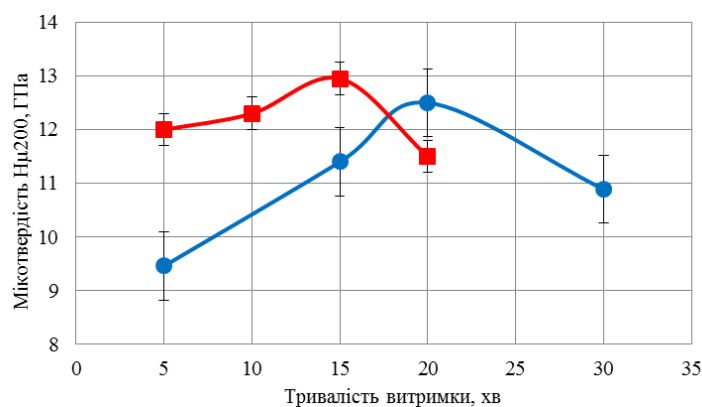


Рис. 3. Залежність мікротвердості плазмових теплозахисних покриттів з $ZrO_2 + 7\% Y_2O_3$ від тривалості витримки при передрекристалізаційній термічній обробці:

● – температура 1200 °C; ■ – температура 1300 °C

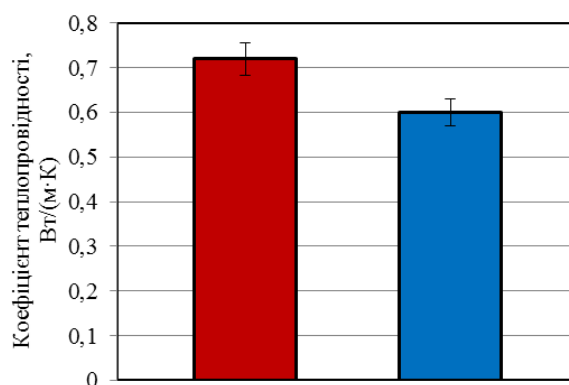


Рис. 4. Результати визначення коефіцієнта теплопровідності плазмових теплозахисних покриттів з $ZrO_2 + 7\% Y_2O_3$:

■ – після напилення, ■ – після оптимальної передрекристалізаційної термічної обробки (1300 °C)

Режим полягає у нагріванні до температури 1300 °C, витримці протягом 15 хв та охолодженні на повітрі.

Представлені мікроструктури теплозахисного плазмового градієнтного покриття (рис. 5) складаються з трьох послідовно напилених шарів: перший підшар – Co-Cr-Al-Y-Si товщина якого становить 110 мкм; другий (проміжний) шар - механічна суміш Co-Cr-Al-Y-Si + 10% (мас.) $ZrO_2 + 7\% Y_2O_3$ товщиною 90 мкм; третій шар - $ZrO_2 + 7\% Y_2O_3$ товщиною 280 мкм. Підшар і проміжний шари слабо диференціюються, мають лускату будову, що пов'язано з достатнім проплавленням металевої складової покриття. У проміжному шарі проглядається сіра фаза $ZrO_2 + 7\% Y_2O_3$. Пористість визначали за допомогою металографії планіметричним методом. Для керамічного шару вона складає близько 10%. Величина деформації керамічних частинок – 76 %.

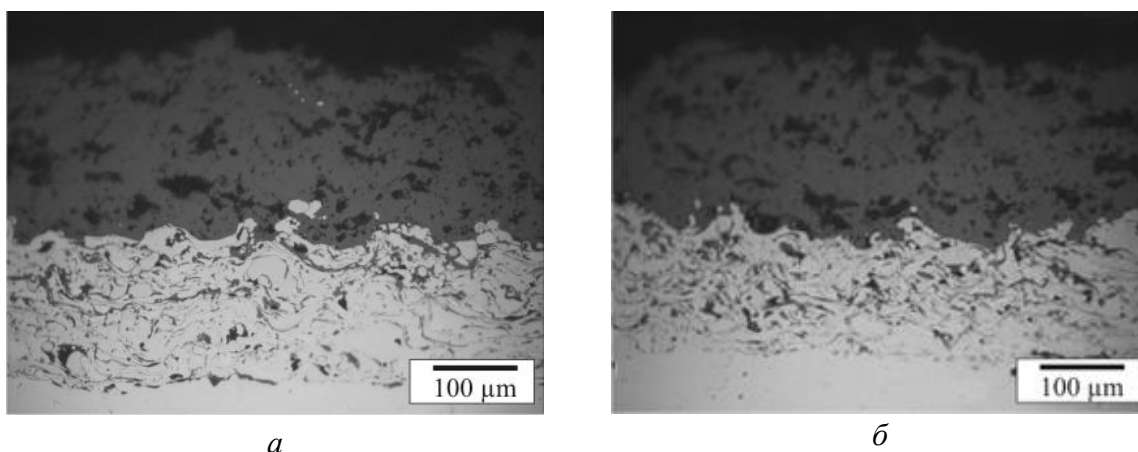


Рис. 5. Мікроструктури теплозахисного градієнтного покриття:
а – після напилення; б – після оптимальної передрекристалізаційної
термічної обробки

Порівняльний аналіз мікроструктур показав, що змін у структурі покриттів до і після термообробки не спостерігається. Це свідчить про те, що зміцнювальний ефект забезпечують структурні елементи, розмір яких менший за 0,5 мкм, що пояснюється роздільною здатністю людського ока та оптичного мікроскопу.

Наноструктурування сталей і напилених покриттів із застосуванням ПТО забезпечує суттєве підвищення фізико-механічних властивостей. Але запропонована обробка має недолік – невелика тривалість витримки (до 5 хв) при температурі рекристалізації, що обмежує застосування запропонованого способу – тільки для деталей малого розміру. Тому далі досліджували можливість отримання термічно стабільної полігонізаційної субструктури після ПТО шляхом комбінування холодної динамічної деформації на 30 % та холодної статичної деформації на 30 % (рис. 6-8).

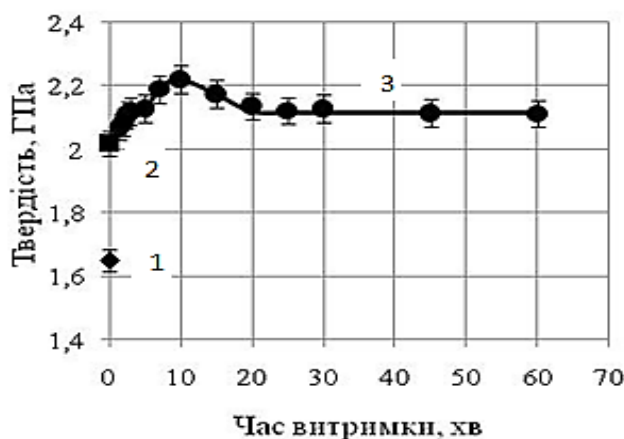
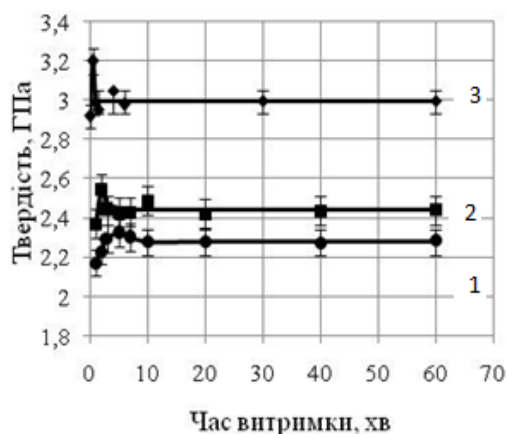
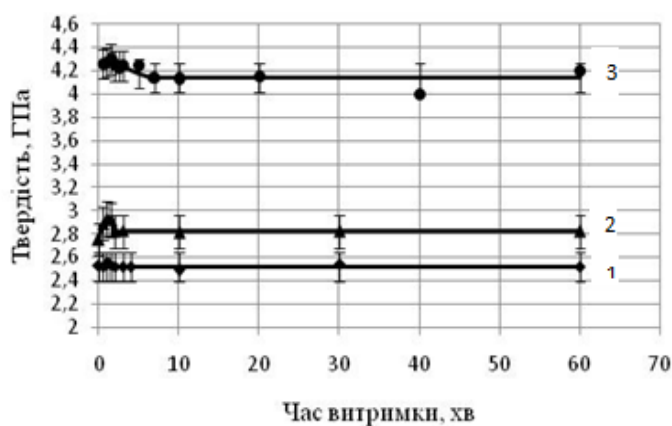


Рис. 6. Вплив часу витримки передрекристалізаційної термічної обробки на твердість комбіновано деформованого технічно чистого заліза
1 – твердість після динамічної деформації на 30 %; 2 – твердість після динамічного та наступного статичного деформування сумарно на 60 %; 3 – твердість після комбінованого деформування та наступної термообробки



1 – сталь 20; 2 – сталь 45; 3 – сталь У8.

Рис. 7. Вплив часу витримки передрекристалізаційної термічної обробки на твердість комбіновано деформованих сталей 20, 45 та У8



1 – сталь 40X; 2 – сталь 12X13; 3 – сталь 12X18Н9Т

Рис. 8. Вплив часу витримки передрекристалізаційної термічної обробки на твердість комбіновано деформованих сталей 40X, 12X13 та 12X18Н9Т

З рис. 6-8 видно, що спосіб дозволяє отримати термічно стабільну полігонізаційну субструктуру, оскільки твердість при зростанні тривалості витримки майже не змінюється, що, ймовірно, відбувається через гальмування дислокацій за рахунок утворення дислокаційних перехрещень (потрійних вузлів).

Дослідження залежності приросту твердості від кількості хрому після термообробки, яка забезпечує максимальне значення твердості, та після термообробки протягом 60 хвилин, яка забезпечує стабілізацію субструктури. Результати дослідження наведено на рис. 9.

Наведені на рис. 9 дані свідчать про те, що приріст твердості легованих сталей хромом збільшується зі збільшенням кількості хрому, оскільки при нагріванні зразків хромистих сталей відбувається міжкристалічна внутрішня адсорбція вуглецю по границям зерен, що призводить до виділення карбідів хрому в областях з найбільшими температурами («по поверхні зразку»), тим самим зменшуючи концентрацію хрому на границях зерен, що в свою чергу збільшує щільність дислокацій, яка призводить до збільшення кількості центрів зародження нових полігонізаційних субзерен.

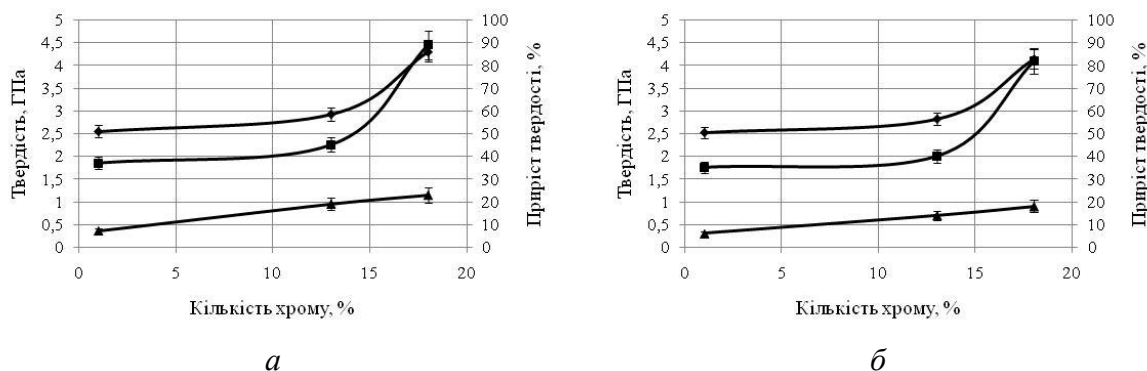


Рис. 9. Залежність приросту твердості після ПТО, яка забезпечує максимальні значення твердості, від кількості хрому: ▲ – твердість, ГПа; ■ – приріст твердості відносно відпаленого стану, %; ◆ – приріст твердості відносно деформованого стану, %; а – зразки з максимальною твердістю; б – зразки зі стабілізованою субструктурою

Висновки. Експериментально встановлено закономірності зміни субструктури та властивостей технічного чистого заліза, вуглецевої та легованої сталі, а також напилених покриттів після передрекристалізаційної термічної обробки. Сутність розробленого методу полягає у фіксуванні при нагріванні деформованого металу здрібненої полігонізаційної субструктури, здебільшого нанорозмірної. Встановлено, що передрекристалізаційна термічна обробка надає можливість формувати наноструктурні елементи і цим підвищувати фізико-механічні властивості оброблюваних матеріалів, зокрема, твердість зростає не менш ніж на 15%. Показано, що комбіноване деформування (30 % динамічного + 30 % статичного) вуглецевих та легованих сталей підвищує термічну стабільність полігонізаційної субструктури більше ніж на порядок. Встановлено, що приріст твердості технічно чистого заліза, сталі 20 та 45 зменшується зі збільшенням кількості вуглецю, а приріст твердості легованих сталей хромом збільшується зі збільшенням кількості хрому.

Список використаних джерел

1. Юркова О. І. Структурний стан і механічні властивості пластично деформованого заліза [Електронний ресурс] / О. І. Юркова, А. В. Косячук, М. Г. Гриценко // *Металознавство та обробка металів*. – 2011. – № 1. – С. 3-9. – Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/63657>.
2. Валиев Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М. : Академкнига, 2007. – 372 с.
3. Алымов М. И. Методы получения и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов / М. И. Алымов, В. А. Зеленский. – М. : МИФИ, 2005. – 52 с.
4. Проблемы совмещения горячей деформации и термической обработки стали / А. А. Баранов, А. А. Минаев, А. Л. Геллер, В. П. Горбатенко. – М. : Металлургия, 1985. – 128 с.
5. Термомеханическая обработка стали / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский, Л. М. Капуткина. – М. : Металлургия, 1983. – 480 с.
6. Рекристаллизация металлов и сплавов / С. С. Горелик, С. В. Добаткина, Л. М. Капуткина. – [3-е изд.]. – М. : МИССИС, 2005. – 432 с.
7. Исследование закономерностей проявления эффекта динамической рекристаллизации в металлах [Електронний ресурс] / Д. Н. Боголюбова, А. Е. Гвоздев, О. В. Пантюхин // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2011. – Вып. 4. – С. 276-286. – Режим доступу: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-zakonomernostey-proyavleniya-effekta-dinamicheskoy-rekristallizatsii-v-metallah/viewer>.
8. Опальчук А. С. Термомеханічне зміцнення сталей з низькою стійкістю аустеніту [Електронний ресурс] / А. С. Опальчук, А. В. Поліщук // *Металознавство та обробка металів*. – 2016. – № 2. – С. 36-40. – Режим доступу: https://momjournal.com.ua/sites/default/files/5_13.pdf.
9. Балицький О. І. Вплив попереднього пластичного деформування сталі 12Х18Н12Т на її механічні властивості [Електронний ресурс] / О. І. Балицький, Я. Еліаш, І. В. Ріпей // *Фізико-хімічна механіка матеріалів* – 2011. – № 4. – С. 20-27. – Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/138270>.

10. Вакуленко Л. І. Залежність розміру зерна аустеніту в сталі залізничного колеса від параметрів гарячої деформації [Електронний ресурс] / Л. І. Вакуленко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2015. – № 2(56). – С. 157-167. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15802/stp2015/42175>.

11. Jing W. Microstructure and thermal properties of plasma sprayed thermal barrier coatings from nanostructured YSZ [Electronic resource] / W. Jing, G. Hong, Z. Le, L. Wang, G. Sheng // Journal of Thermal Spray Technology. – 2010. – № 19 (6). – P. 1186 – 1194. – Accessed mode: <https://doi.org/10.1007/s11666-010-9535-7>.

12. Карпеченко А. А. Вплив передрекristалізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості функціональних електродугових композиційних покриттів [Електронний ресурс] / А. А. Карпеченко, М. М. Бобров // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2022. – № 2. – С. 94-100. – DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-161-2-94-100>.

13. Карпеченко А. А. Формування функціональних плазмових покриттів з комплексом підвищених фізико-механічних та експлуатаційних властивостей [Електронний ресурс] / А. А. Карпеченко, М. М. Бобров // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2021. – № 1. – С. 74-80. – DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2021.242179>.

References

1. Yurkova, O.I., Kosianchuk, A.V., & Hrytsenko, M.H. (2011). Strukturnyi stan i mekhanichni vlastyvoosti plastychno deformovanoho zaliza [Structure and mechanical properties of iron after severe plastic deformation]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv – Metallurgy and metal processing*, 1, 3-9. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/63657>.

2. Valiev, R.Z., & Aleksandrov, I.V. (2007). *Obemnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie, struktura i svoistva [Bulk nanostructured metallic materials: preparation, structure and properties]*. Academbook.

3. Alymov, M.I., & Zelenskii, V.A. (2005). *Metody polucheniiia i fiziko-mekhanicheskie svoistva obemnykh nanokristallicheskiikh materialov [Methods for obtaining and physical and mechanical properties of bulk nanocrystalline materials]*. MIFI.

4. Baranov, A.A., Minaev, A.A., Geller, A.L., & Gorbatenko, V.P. (1985). *Problemy sovmeshcheniia goriachei deformatsii i termicheskoi obrabotki stali [Problems of combining hot deformation and heat treatment of steel]*. Metallurgy.

5. Bernshtein, M.L., Zaimovskii, V.A., & Kaputkina, L.M. (1983). *Termomekhanicheskaia obrabotka stali [Thermomechanical processing of steel]*. Metallurgy.

6. Gorelik, S.S., Dobatkina, S.V., & Kaputkina, L.M. (2005). *Rekristallizatsiia metallov i splavov [Recrystallization of metals and alloys]*. MISSIS.

7. Bogoliubova, D.N., Gvozdev, A.E., & Pantiukhin O.V. (2011). Issledovanie zakonornosti proiavlennia efekta dinamicheskoi rekristallizatsii v metallakh [Investigation of regularities of manifestation of the effect of dynamic recrystallization in metals]. *Izvestiia TulHU. Tekhnicheskie nauky – News of TulGU. Technical science*, 4, 276-286. <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-zakonornostey-proiavlenniya-effekta-dinamicheskoy-rekristallizatsii-v-metallah/viewer>.

8. Opalchuk, A.S., & Polishchuk A.V. (2016). Termomekhanichne zmitsnennia stalei z nyzkoii stiikistiu austenitu [Thermomechanical strengthening of steels with low austenite resistance]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv – Metallurgy and metal processing*, 2, 36-40. https://momjournal.com.ua/sites/default/files/5_13.pdf.

9. Balytskyi, O.I., Eliash, Ya., & Ripei I.V. (2011). Vplyv poperednoho plastychnoho deformuvannia stali 12Kh18N12T na yii mekhanichni vlastyvoosti [The influence of preliminary plastic deformation of 12X18H12T steel on its mechanical characteristics]. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv – Physicochemical Mechanics of Materials*, 4, 20-27. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/138270>.

10. Vakulenko, L.I. (2015). Zalezhnist rozmiru zerna austenitu v stali zaliznychnoho kola vid parametriv hariachoi deformatsii [Dependence of grain size of austenite steel of railway wheel from parameters of hot deformation]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport – Science and progress of transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2 (56), 157-167. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/42175>.

11. Jing, W., Hong, G., Le, Z., Wang, L., & Sheng, G. (2010). Microstructure and thermal properties of plasma sprayed thermal barrier coatings from nanostructured YSZ. *Journal of Thermal Spray Technology*, (19(6)), 1186-1194. <https://doi.org/10.1007/s11666-010-9535-7>.

12. Karpechenko, A.A., & Bobrov, M.M. (2022). Vplyv peredrekrystalizatsiinoi termichnoi obrobky na fizyko-mekhanichni vlastyvoli funktsionalnykh elektroduhovykh kompozytsiinykh pokryttiv [Pre-Recrystallization Heat Treatment Effect on Physical and Mechanical Properties of Functional Electric Arc Composite Coatings]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, 2, 94-100. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-161-2-94-100>.

13. Karpechenko, A.A., & Bobrov, M.M. (2021). Formuvannya funktsionalnykh plazmovykh pokryttiv z kompleksom pidvyshchenykh fizyko-mekhanichnykh ta ekspluatatsiinykh vlastyvolei [Formation of functional plasma coatings with a complex of increased physical, mechanical and operational properties]. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnologii, ekolohiia – Energy: economy, technologies, ecology*, 1, 74-80. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2021.242179>.

Отримано 28.08.2022

UDC 67.017

Anton Karpechenko¹, Tatiana Makrukha², Oleksandr Dubovyj³, Maksym Bobrov⁴

¹PhD, associate professor, associate professor Department of Advanced Mathematics
Admiral Makarov National University of Shipbuilding (Mykolaiv, Ukraine)

E-mail: anton.karpechenko@nuos.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7543-4159>. Researcher ID: [57194341724](https://orcid.org/57194341724)

²PhD, associate professor Department of Applied Mechanics and Information Technologies
Robert Elvorti Economics and Technology Institute (Kropyvnytskyi, Ukraine)

E-mail: tmakruha@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8841-1688>. Researcher ID: [57222660526](https://orcid.org/57222660526)

³Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Materials Science and Technology of Metals
Admiral Makarov National University of Shipbuilding (Mykolaiv, Ukraine)

E-mail: oleksandr.dubovyj@nuos.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2843-1879>. Researcher ID: [57194338570](https://orcid.org/57194338570)

⁴PhD, Doctoral Student of Department of Materials Science and Technology of Metals
Admiral Makarov National University of Shipbuilding (Mykolaiv, Ukraine)

E-mail: laborantmtm@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9098-6912>. Researcher ID: [57194197238](https://orcid.org/57194197238)

NANOSTRUCTURING OF CRYSTALLINE MATERIALS AND SPRAYED COATINGS BY PRE-RECRYSTALLIZATION HEAT TREATMENT

Modern production requires the improvement and creation of materials with unique properties, and their use in structures is determined by the ratio between strength and plasticity, therefore metal materials are characterized by the most attractive ratio from the point of view of practical expediency. The increase in strength properties is ensured mainly due to the purposeful formation of a crushed structure.

Analysis of the latest research and publications showed that methods of thermomechanical processing of materials remain promising for the formation of ultra- and nanostructures in metallic materials.

The purpose of the work is to establish the patterns of changes in the structure and properties of crystalline materials after deformation and pre-recrystallization heat treatment.

The work presents methods for determining the strength properties of metal materials and determining the size of their structural elements.

The article highlights the feasibility of using pre-recrystallization heat treatment of previously deformed technically pure iron (GOST 3836-83), carbon steels 20, 45 (GOST 1050-88) and U8 (GOST 1435-88), alloy steels 40X (GOST 2591-2006), 12X13 and 12X18N9T (GOST 2590-2006) to increase their hardness due to the formation of a thermally stable polygonization substructure, mostly on of a nanoscale. It is shown that an increase in the content of carbon and chromium in steels during short-term exposure at a temperature that corresponds to the temperature threshold of recrystallization of the mentioned steels leads to a decrease in the increase in their hardness. Combined deformation, which consists of dynamic deformation by 30% followed by static deformation by 30%, provides an opportunity to increase the exposure time for technically pure iron, carbon and alloy steels up to 60 minutes due to the formation of a thermally stable polygonization substructure in the process of their pre-recrystallization heat treatment. It was established that the increase in hardness of technically pure iron, steel 20 and 45 decreases with an increase in the amount of carbon, and the increase in hardness of chromium-alloyed steels increases with an increase in the amount of chromium. The optimal mode of pre-recrystallization heat treatment of a heat-protective plasma coating with ZrO₂ + 7% Y₂O₃ was determined, which provides an increase in hardness by 13% and a decrease in the thermal conductivity of the ceramic layer by 15% compared to the state after sputtering due to substructural changes.

Keywords: pre-recrystallization heat treatment; substructure; nano-sized elements; heat protective coatings, hardness, thermal conductivity.

Fig.: 9. Table: 3. References: 13.