

Тетяна Макруха¹, Олександр Дубовий²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки

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

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

²доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри матеріалознавства і технології металів

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (Миколаїв, Україна)

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

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ НАНОСТРУКТУРУВАННЯ ДЕФОРМОВАНИХ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ ТА НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ

Представлена у статті інформація має оглядовий характер щодо можливості застосування попереднього деформування та передрекристалізаційної термічної обробки для технічно чистого заліза, вуглецевих сталей 20; 45; 70; Ст3; У8, легованих сталей 40Х; 20Х13, газотермічних та електродугувих покриттів (Св-08Г2С), а також сплавів ніхрому Ni80Cr20 та бронзи БрАМц9-2.

У роботі експериментально досліджено вплив деформаційно-термічних факторів на механічні властивості, зокрема, твердість і міцність, металів, сплавів та напилених покриттів, та встановлено, що зміцнювальний ефект відбувається через здрібнення субструктурних елементів, таких як розмір областей когерентного розсіювання, кут розорієнтування субзерен та кількість субструктурних елементів до наномасштабного стану.

Показано можливість промислового застосування запропонованої технології на прикладі виготовлення пружних елементів зі сталі 70.

Ключові слова: передрекристалізаційна термічна обробка; механічні властивості сталей; динамічна деформація; розмір субзерна; кут розорієнтування субзерен.

Рис.: 6. Табл.: 5. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Сучасне виробництво потребує застосування різноманітних конструкцій та деталей, які виготовляються з матеріалів із високими фізико-механічними властивостями [1], що дозволяє підвищити ресурс експлуатації. Застосування нових матеріалів у конструкційних і окремих деталях визначається співвідношенням між міцністю і пластичністю металів і сплавів, а також зносостійкістю, яка забезпечується переважно покриттями або шарами з відповідною структурою. Приріст міцності, що формує підвищену зносостійкість, при достатній пластичності забезпечується переважно формуванням здрібненої мікро-, ультра- і наномасштабних структур.

На сьогодні відомо декілька технологій, що дають змогу отримати наноструктурні матеріали: електроосадження, шарове розмелення, інтенсивна пластична деформація (ПД), компонування тощо [1].

Постановка проблеми. Подрібнення структури до наномасштабного розміру здійснюють здебільшого методами ПД [2], наприклад, множинна прокатка, множинне волочіння, кручення під тиском, рівноканальне кутове пресування. При цьому під час дослідження впливу ПД на структуру і властивості сплавів встановлено, що при використанні великих пластичних деформацій навіть за кімнатної температури протікають процеси динамічної рекристалізації, що сприяє створенню дрібнозернистої кристалічної структури сплавів [3]. Завдяки великому ступеню деформації утворюється високо дезорієнтована фрагментована субструктура.

Однак об'ємне наноструктурування методами ПД застосовується в техніці для одержання виробів порівняно невеликого розміру [2]. Задача створення ефективного пристрою ПД, який надасть можливість одержання з малою трудомісткістю масивних наноструктурованих заготовок і виробів із високими властивостями, є актуальною для розвитку багатьох галузей виробництва, зокрема машинобудування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні десятиріччя розроблені і використовуються способи механотермічного і термомеханічного оброблення, які суттєво підвищують якість прокатуваних і кованих сталевих виробів шляхом формування здрібненої полігонізаційної субструктури.

У роботі [4] описано спосіб здрібнення зерна аустеніту за допомогою гарячого обстикування сталі з вмістом вуглецю 0,61 %. У результаті дослідження встановлено, що при витримці 1,5 хв після завершення гарячої деформації розвиток процесів динамічної і статичної рекристалізації викликає незначне зростання зерна аустеніту. Така тривалість витримки дозволяє зберегти частково гарячий наклеп аустеніту перед прискореним охолодженням для термічного зміцнення.

Автор роботи [5] досліджував вплив гарячої пластичної деформації на структуру і механічні властивості литої нержавіючої сталі X13 та встановив, що гаряча деформація ковкою при температурі 1160 °С зі ступенем деформації ~500 % дозволяє підвищити пластичність у 3...5 разів та міцність у ~1,5 раза.

У статті [6] описано експериментальне дослідження впливу температури деформації на структуру сталі 20 та встановлено, що нагрівання зразків сталі 20 до температури 1000 °С протягом 1 год з подальшим охолодженням до температури 650...690 °С з одночасним деформуванням ($\epsilon = 0,11 \dots 2,60$) з наступною витримкою при температурі 610 °С дозволяє отримати здрібнену структуру з розміром аустеніту від 20 до 100 мкм.

Автори роботи [7] показали можливість підвищення механічних властивостей (твердості, мікротвердості та коефіцієнту зміцнення) сталей 15X13МФ та 25X1М1Ф за допомогою пластичної деформації (від 0,05 до 0,50 та від 0,05 до 1,25 відповідно) з температурами випробування 20, 375 та 600 °С, у результаті чого утворюється повністю фрагментована дислокаційна структура.

Виявлено [8], що попереднє пластичне деформування аустенітної сталі 12X18Н12Т спричиняє наклеп, який залежить від швидкості деформування. Зі збільшенням швидкості деформування зразків від $8 \cdot 10^{-4}$ до $417 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ характеристики як міцності (границя міцності), так і пластичності (відносне видовження) сталі 12X18Н12Т знижуються. Після витримання попередньо наклепаної сталі за температури 650 °С збільшується її міцність, а пластичність знижується.

Але можливості формування здрібненої і наномасштабної субструктури під час ПД та термомеханічної обробки використовуються не повністю через процеси динамічної та збиральної полігонізації, які відбуваються при порівняно тривалому часі витримки за високої температури.

Розроблено способи деформаційно-термічного оброблення металів і сплавів [9], які забезпечують підвищення твердості деформованих обтискуванням металів і сплавів та напилених покриттів і зниження теплопровідності. Досягається це шляхом нагрівання виробів із металів, сплавів та напилених покриттів до початку первинної рекристалізації з короткочасною (до 10 хв) витримкою та подальшим охолодженням до температури навколишнього середовища зі швидкістю $< 5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, яка унеможливує ріст субзерен (передрекристалізаційна термообробка).

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Однак у всіх вищевказаних способів є недолік – короткочасна витримка термічної обробки, яка позбавляє можливості обробляти масивні деталі великого розміру.

Мета роботи – встановлення закономірностей формування термічно стабільних полігонізаційних наномасштабних субзерен у металах, сплавах і напилених покриттях із підвищеними фізико-механічними властивостями.

Виклад основного матеріалу дослідження. Залізо є основним компонентом будь-якої сталі, тому попередні дослідження закономірностей впливу деформаційно-термічних факторів на фізико-механічні властивості досліджували на прикладі технічно чистого заліза. Зразки розміром $5 \times 5 \times 8$ мм піддавали статичному деформуванню на гідравлічному пресі Losen Housen WERK (Dusseldorf) з навантаженням до 35 т. Передрекристалізаційну термічну обробку (ПТО) виконували в лабораторній електричній печі СНОЛ-1.6.2.0.08/9-М1. Твердість визначали відповідно ДСТУ ISO 6507-4:2008

на приладі типу Віккерс при навантаженні 5 кг. В результаті численних дослідів накопичилась інформація для побудови графічної залежності твердості (HV_5) від ступеня деформації і температури та залежності твердості від ступеня деформації і часу витримки при температурі 500 °С. Відомо, наприклад, [10], що зменшення розміру зерна (субзерна) веде до збільшення твердості. Цей ефект спостерігається практично для всіх типів матеріалів. Міцність у більшості випадків зростає аналогічно твердості, тому твердість, у нашому випадку може бути наближеним критерієм міцності, а також характеризувати розмір субзерна. Крім того, нашими дослідженнями [11] впливу передрекристалізаційної термічної обробки на розмір субзерна металів і сплавів не зафіксовано середній розмір субзерна менше 50 нм. Вплив деформаційно-термічних факторів на твердість (HV_5) технічно чистого заліза наведено на рис. 1.

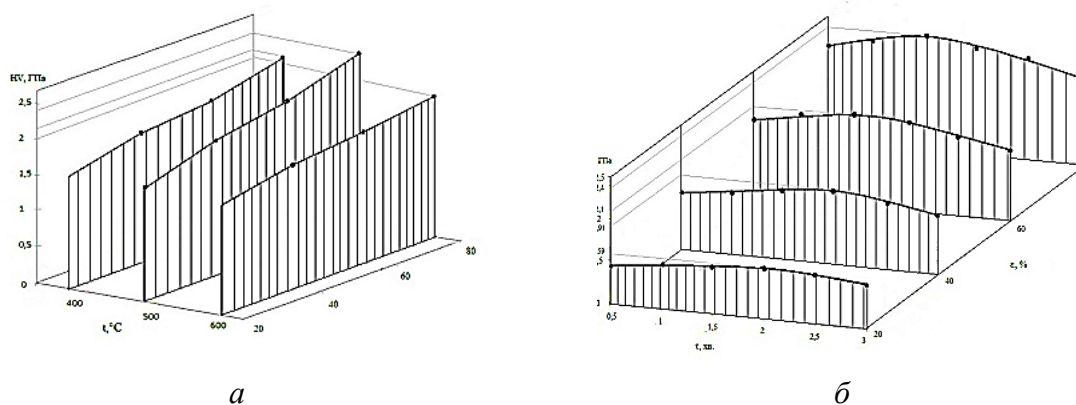


Рис. 1. Вплив деформаційно-термічних факторів на твердість технічно чистого заліза:

а – залежність твердості від ступеня деформації (ϵ ,%) і температури 400, 500 та 600 °С; *б* – залежність твердості від ступеня деформації (ϵ ,%) і часу витримки при температурі 500 °С

Джерело: розроблено авторами.

Дані рис. 1, *а* свідчать про те, що оптимальна температура ПТО становить 500 °С, при цьому залежність має екстремальний характер, а максимальна твердість досягається при витримці протягом 1.5...2 хв (рис. 1, *б*). Зі збільшенням величини статичної деформації підвищується твердість, яка досягає максимального значення при деформації 80 %. Вплив більш високої статичної деформації не досліджувався через те, що при деформуванні близько 90 % деінде спостерігалися тріщини, і на практиці статичне деформування вище 80 % майже не застосовування.

Максимальне значення твердості після 80 % деформування і ПТО при температурі 500 °С становило 2,4 ГПа (після деформування – 1,52 ГПа). Таким чином, приріст твердості становить 58 %. Цей ефект з'являється за рахунок здрібнення субзерен [12].

Для порівняння, зразки технічно чистого заліза піддавали тривісному деформуванню методом «*abc*», як різновиду рівноканального кутового пресування [13; 14]. Твердість (HV_5) і розмір областей когерентного розсіювання (ОКР) рентгенівських променів зразків технічно чистого заліза, деформовано «*abc*»-методом і одновісним пресуванням на 82 % після ПТО, наведено в табл. 1. ОКР визначали за формулою Шеррера за відображенням [110], зйомку дифрактограм виконували на приладі ДРОН-3,0. Сумарна величина дійсної деформації для методу «*abc*» склала $e = 3,4$.

Як впливає із даних табл. 1, після «*abc*»-деформування твердість вища порівняно з одновісною деформацією, але після ПТО обробки більша твердість спостерігається в одновісно деформованих зразках. Розмір ОКР, який можна ототожнювати з розміром субзерна, має суттєво нижчі значення як після одновісної деформації, так і після деформації

«abc» методом і ПТО. При деформації рух дислокацій здійснюється шляхом ковзання й дифузійного переповзання, при цьому формуються об'ємні дислокаційні сплетіння – комірчаста структура. Під дією пружних напружень при нагріванні дислокаційні сплетіння перетворюються на плоскі малокутові субграниці, а комірки – в субзерна, але субзерна різко відрізняються за розмірами, кривизною границь і кутами в потрійних стиках субграниць. Комірчаста структура, яка утворилася після «abc» деформації, перетворюється в субзерну.

Таблиця 1 – Твердість HV_5 і розмір ОКР технічно чистого заліза, деформованого методом «abc» й одновісним пресуванням після ПТО

Метод деформації	Результати досліджень	Твердість, ГПа після		Розмір ОКР, нм після	
		деформування	деформування і термообробки	деформування	деформування і термообробки
«abc»		2,96	3,29	149	72
одновісна деформація на 82 %		2,35	3,60	83	66

Джерело: розроблено авторами.

Субзерна розорієнтовані одне проти одного хаотично на відміну від закономірно розорієнтованих зерен при одновісній деформації. У результаті алгебраїчна сума розорієнтації субзерен практично дорівнює нулю, що призводить до росту крупних субзерен за рахунок дрібних і викликає зниження твердості. Крім того, «abc» деформація тривісна й цим зумовлює появу більшої кількості дислокацій і різних знаків, що стає причиною їх анігіляції. Це сприяє збільшенню швидкості росту субзерен. Тому розмір ОКР після статичної деформації й термічної обробки менший, ніж після деформації «abc» методом і термічної обробки.

Нижчі значення твердості технічно чистого заліза після «abc» деформації і ПТО порівняно з одновісною деформацією можна пояснити ще й додатковим впливом зернограничного проковзування. Автори роботи [15] вказують, що в шарах з розміром субзерен від 50 до 200 нм деформація здійснюється за участю змішаного механізму. До звичайного дислокаційного механізму приєднується механізм зернограничного проковзування. При цьому деформація може реалізовуватися поворотом субзерен, який викликається рівнем напружень у потрійних стиках, що характерно для «abc» деформації.

З практичного погляду доцільно дослідити фізико-механічні властивості технічно чистого заліза і сталей. Результати таких досліджень наведені в роботі [12], з чого випливає, що межа міцності технічно чистого заліза і сталей після ПТО за режимом, який забезпечує максимальну твердість, суттєво вище, ніж, навіть, після деформування. При цьому й порівняно підвищена пластичність. Це пояснюється здрібненням субструктури, що підтверджено розміром ОКР, який лежить у наномасштабі.

ПТО надає можливість підвищення твердості (HV_5) холоднодеформованого ніхрому $Ni80Cr20$ на 25 %, бронзи БрАМц9-2 – на 19 %, електротехнічної міді М1 – на 13 %, то напиленого електродуговим методом ніхрому – на 29 % [12].

При напилюванні газотермічних покриттів відбувається інтенсивна пластична деформація частинок унаслідок високої швидкості співудару з підкладкою (в реальних процесах напилювання до 300 м/с). При цьому величина деформації може складати 90...95 %, а швидкість охолодження деформованих частинок досягає 10^8 °C/с, що запобігає протіканню динамічної рекристалізації в матеріалі покриття. Короткочасна витримка зразків з напиленими покриттями при температурі рекристалізації і подальше прискорене охолодження на повітрі забезпечує підвищення твердості покриттів завдяки фіксуванню передрекристалізаційного стану матеріалу покриття [16].

Досліджували електродугові покриття з дроту Св-08Г2С, оскільки вони характеризуються найменшим значенням ОКР та найвищим ефектом підвищення твердості після ПТО [9].

З практичного погляду основним недоліком ПТО є невелика тривалість витримки у декілька хвилин; тому актуальним являється дослідження можливості стабілізації здрібненої полігонізаційної субструктури напиленого покриття при більш тривалій витримці у процесі термічного оброблення за рахунок наступної деформації.

З метою гальмування руху дислокаційних субграниць у процесі збиральної полігонізації, який проявляється при нагріванні (тривалій витримці), здійснювали додаткове деформування покриття двома способами: пресуванням на гідравлічному пресі при навантаженні 10 т (ступінь деформації 30 %) та шляхом поверхневої пластичної деформації (ППД) сталевими кульками діаметром 0,1...0,3 мм протягом 2 хв. Температуру нагрівання деформованих зразків знизили до 400 °С з огляду на те, що при збільшенні величини деформації температурний поріг рекристалізації знижується. Результати наведено на рис. 2.

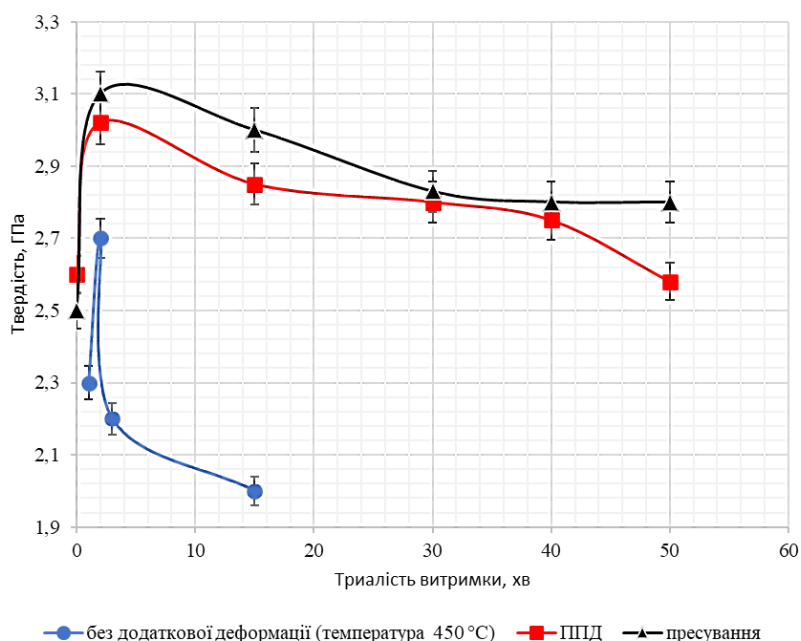


Рис. 2. Залежність твердості електродугових покриттів з дроту Св-08Г2С від тривалості витримки та виду наступної деформації

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз наведених даних показує, що використання наступної деформації забезпечує менше зниження твердості при підвищенні тривалості витримки при ПТО з тривалістю витримки до 15 хв. Така тенденція спостерігається для обох видів деформації покриття. Так, наприклад, твердість покриття без наступної деформації при підвищенні тривалості витримки з 2 до 15 хв зменшується з 2,7 до 2 ГПа (-35 %), а при проведенні наступної деформації – з 3,0 до 2,8 ГПа (-7 %) та з 3,1 до 3,0 ГПа (-3 %) для ППД та пресування відповідно. Однак, достатньо високі значення твердості забезпечується при витримці до 40 хв для ППД, а для пресування до 50 хв. Пояснюється це тим, що при здійсненні повторної деформації дислокаційна взаємодія закінчується виникненням від 50 до 75 % дислокаційних бар'єрів (Хірша, Ломер–Коттрелла) решта бере участь у формуванні дислокаційних сплетінь. Дані дислокаційні бар'єри, які виникають вздовж напрямку, перпендикулярного осі деформації, стримують рух дислокацій та, як наслідок, зменшують рухливість полігонізаційних субграниць, чим знижується швидкість полігонізаційних процесів і забезпечується стабілізаційний ефект.

Аналіз мікроструктур [9] показав, що змін у структурі покриттів до і після ПТО не виявлено, що свідчить про зміцнювальний ефект, який забезпечують субструктурні елементи.

Для кількісної оцінки впливу ПТО на субструктуру електродугових покриттів провели визначення розмірів ОКР (табл. 2).

Дані наведені в табл. 2 свідчать про суттєвий вплив ПТО на розмір субзерен, особливо при використанні електроімпульсної дії при напиленні покриттів. Після ПТО розмір субзерен стає наномасштабним.

Таблиця 2 – Розмір ОКР електродугових покриттів

Покриття	Технологія напилення та величина деформації частинок	Термообробка	Розмір ОКР, нм
Електродугові покриття з дроту марки Св-08Г2С	За традиційною технологією. Деформація 83%.	Без термічної обробки	>200
		450 °С, 2 хв	106
	З використанням електроімпульсної дії. Деформація 87%.	Без термічної обробки	~200
		400 °С, 1 хв	87

Джерело: розроблено авторами.

Ефект підвищення механічних властивостей сталей та покриттів вдалось впровадити тільки для виробів невеликого розміру (ножів для порізки слюдострічки та ножів жниварок, товщиною 3...5 мм), через малий час витримки 1,5...2 хв.

ПТО забезпечує підвищення фізико-механічних властивостей за рахунок фіксації здрібненої полігонізаційної субструктури шляхом короточасної витримки статично деформованих металів і сплавів при температурі первинної рекристалізації. Подовження часу витримки або підвищення температури ведуть до нівелювання отриманих результатів через розвиток процесів збиральної полігонізації. Границі субзерен, які утворюються на початку полігонізації, дислокаційні. Ці дислокації рухомі і при підвищенні температури або збільшенні часу витримки, не зустрічаючи перешкод, легко рухаються (переповзають), при цьому збільшується розмір субзерен і, як наслідок, зменшується твердість, міцність. Усе це унеможлиблює застосування цього процесу обробки для деталей великого (більше 10 мм) перерізу. Таким чином, для розширення можливості застосування ПТО для металевих виробів потрібно створити перешкоди руху дислокацій у вигляді подвійних і потрійних перехрещень, дисперсних виділень тощо.

Оскільки сталь Ст3 є одним із найпоширеніших конструкційних матеріалів, який використовують для виготовлення несучих зварних конструкцій, тому науковий і практичний інтерес представляє дослідження зміни субструктури та властивостей комбіновано деформованих зразків зі сталі Ст3.

Зразки розміром 3×5×5 мм піддавали комбінованому деформуванню, яке полягає у поєднанні динамічної деформації на 30 % та статичної деформації на 30 % (схему деформації наведено на рис. 3) з наступною ПТО ($t = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$). Швидкість динамічної деформації складала 100 мм/с, а статичної – 0,5 мм/с. Твердість після деформування становила 1,92 ГПа. Отриманні результати залежності твердості від тривалості витримки при ПТО наведено на рис. 4.

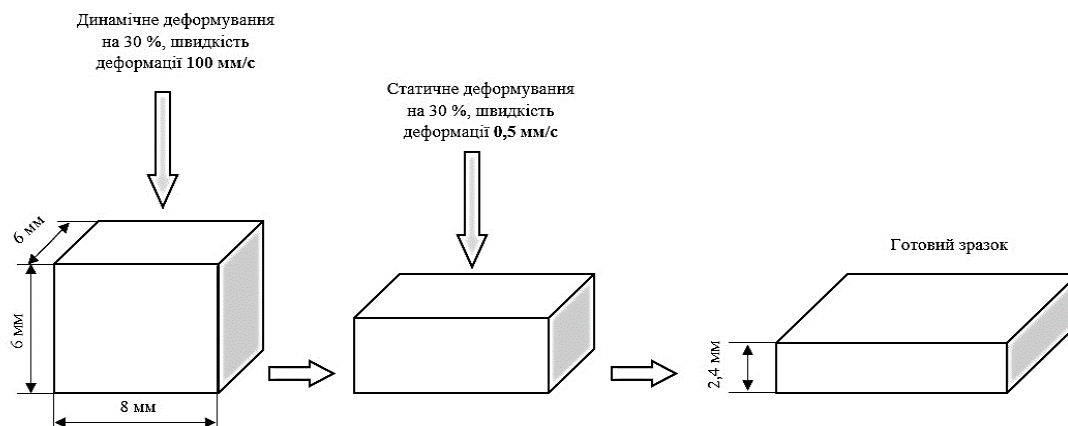


Рис. 3. Схема комбінованої деформації

Джерело: розроблено авторами.

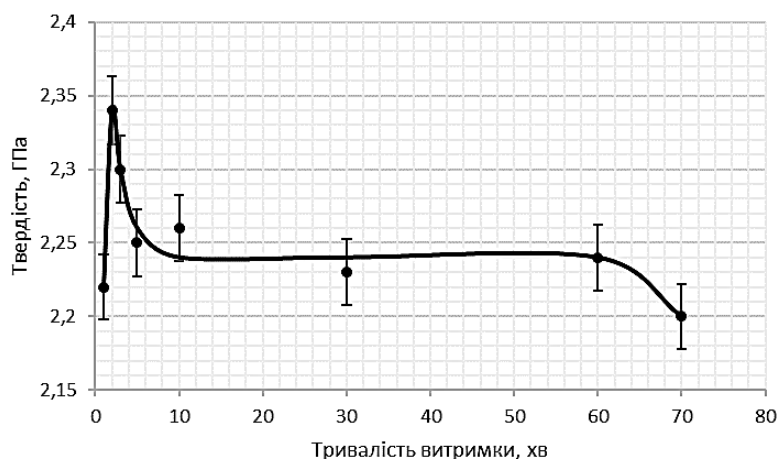


Рис. 4. Залежність твердості сталі Ст3 від часу витримки ПТО

Джерело: розроблено авторами.

З рис. 4 видно, що залежність твердості від тривалості витримки ПТО має екстремальний характер, при цьому приріст твердості після ПТО, яка забезпечує максимум твердості, відносно деформованого стану складає 22 %, а після ПТО при витримці 60 хв – 17 %.

Для дослідження зміни тимчасового опору руйнування, відносного звуження та відносного подовження проводили випробування на розтяг (ГОСТ 1497-84), результати обчислювання наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Значення тимчасового опору руйнування, показників пластичності, середнього розміру субзерна та кількості нанорозмірних елементів сталі Ст3 залежно від виду деформації та термообробки

Вид обробки	σ_b , МПа	δ , %	Ψ , %	Середній розмір субзерна, нм	Кількість нанорозмірних субзерен, %
Комбінована деформація	310	1,05	74	94	55
Комбінована деформація з наступною ПТО (500 °С, 2 хв)	586	5,26	75	89	66
Комбінована деформація з наступною ПТО (500 °С, 60 хв)	402	7,5	59	92	62

Джерело: розроблено авторами.

За допомогою аналітичного автоемісійного растрового електронного мікроскопа SUPRA55VP отримані фотографії субструктури зразків сталі Ст3, які наведено на рис. 5.

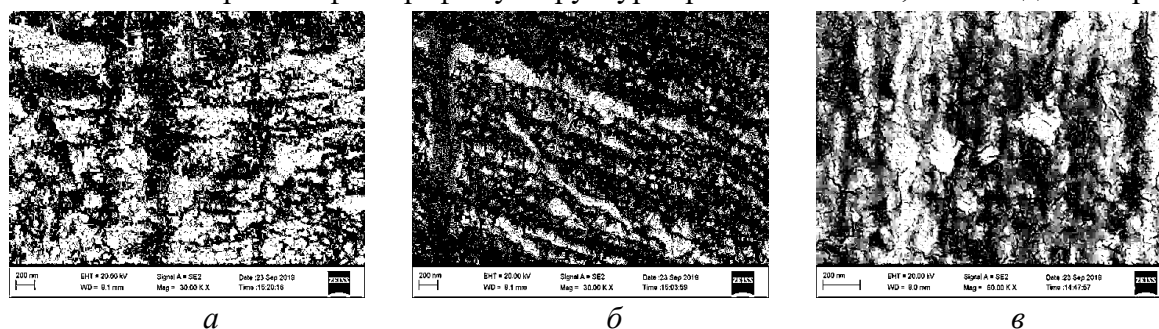


Рис. 5. Мікроструктури сталі Ст3:

а – після комбінованої деформації; б – після комбінованої деформації та термічної обробки, яка забезпечує максимальні значення твердості; в – після комбінованої деформації та термічної обробки, яка забезпечує термічну стабілізацію полігонізаційної субструктури

Джерело: розроблено авторами.

З рис. 5 видно, що відбувається здрібнення субструктурних елементів після ПТО відносно деформованого стану, що підтверджують дані визначення середнього розміру ОКР з фактором форми $\sim 0,42$ (див. табл. 3).

Далі вивчали вплив комбінованого деформування на середній розмір субзерен (ОКР) технічно чистого заліза та окремих сталей, які найбільш широко застосовуються в промисловості (табл. 4).

Таблиця 4 – Результати визначення розміру ОКР сталей після деформації та передрекристалізаційної термічної обробки

Вид обробки	Розмір ОКР, нм					
	Залізо	Сталь 20	Сталь 45	У8	40Х	20Х13
Комбінована деформація	149	143	110	130	131	117
Комбінована деформація з наступною ПТО з короткотривалою витримкою	100	119	80	115	117	101
Комбінована деформація з наступною ПТО впродовж 60 хв	140	187	179	130	118	110

Джерело: розроблено авторами.

Наведені в табл. 4 дані свідчать про те, що комбінована деформація та ПТО, забезпечує поліпшення показників фізико-механічних властивостей, завдяки здрібненню субструктурних елементів.

Деформовані комбінованим методом сталі характеризуються певними особливостями структури, яка значно відрізняється від структури цих самих матеріалів, які були статично деформовані, що обумовлюється дуже не рівноважними умовами їх формування (висока швидкість деформації). Однак, властивості таких сталей обумовлені не лише здрібненням субзерен, а і значною мірою залежать від відносної кількості наноструктурних елементів (субзерен) та кута їх розорієнтування, тому визначенню цих показників приділяється особлива увага, що певною мірою дозволяє прогнозувати властивості сталей, а кут розорієнтування субзерен визначає їх термічну стабільність, чим більший кут, тим вище термічна стабільність.

У табл. 5 наведено розраховану відносну кількість наномасштабних субзерен (%) та кута їх розорієнтування (°) для деформованих технічно чистого заліза та сталей до та після передрекристалізаційної термічної обробки.

Таблиця 5 – Відносна кількість наномасштабних субзерен (%) та кут їх розорієнтування (°) у комбіновано деформованих технічно чистому залізі та сталях до та після передрекристалізаційної термічної обробки

Обробка	Залізо	Сталь 20	Сталь 45	У8	40Х	20Х13
Деформування	54/1,4	17/0,04	15/0,4	28/0,14	37/0,05	18/0,08
Деформування та ПТО впродовж короткотривалої витримки	75/2,16	20/0,1	22/0,88	42/0,21	65/0,08	34/0,16
Деформування та ПТО впродовж 60 хв	58/1,8	16/0,08	18/0,24	19/0,19	16/0,06	12/0,14

Примітка: через «/» вказано значення кількості наномасштабних субзерен та кута їх розорієнтування.

Джерело: розроблено авторами.

Наведені дані табл. 5 свідчать про те, що комбінована деформація та наступна ПТО, яка забезпечує максимальні значення твердості, забезпечують збільшення кількості наномасштабних субзерен щонайменше на 18 % (сталь 20), а максимум на ~ 90 % (сталь 12Х13), при цьому кут розорієнтування субзерен після ПТО впродовж 60 хв дещо зменшується відносно максимального значення, але залишається більшим відносно деформованого стану, чим і пояснюється термічна стабілізація субструктури.

Можливий напрям впровадження запропонованої технології комбінованого деформування з наступною ПТО та її порівняння з традиційними технологіями обробки сталевих виробів, розглянуто на прикладі пружних елементів.

Пружини та ресори зазвичай працюють в умовах багаторазових повторних навантажень. Такі деталі повинні мати, крім високої твердості та міцності в умовах статичного, динамічного та циклічного навантажень, високі пружні властивості та витримувати під час експлуатації великі повторні навантаження без поломок та без осадження. Це значить, що при знятті навантажень пружина чи ресора повинна повністю відновлювати свої початкові розміри та форму.

Для ефективного та правильного виконання своєї роботи такі елементи конструкції повинні мати високу твердість, міцність, пружність, витривалість та релаксаційну стійкість.

Якісні пружини повинні відповідати вимогам ГОСТ 16118-70; ГОСТ 14959-69; ГОСТ 50753-95; ГОСТ 18242-72.

Для порівняльного аналізу впливу комбінованого деформування та традиційної технології виготовлення пружин та ресор обрано вуглецеву сталь 70. Відпалену сталь 70 комбіновано здеформовано сумарно на 60 % (30 % динамічної та 30 % статичної деформації), що задовольняє вимоги до дроту для виготовлення пружин та ресор. Твердість після деформації становила $HV_5 = 2,67$ ГПа (56 HRC).

Далі проводили термічну обробку за традиційною технологією: гартування при температурі 920 °С з охолодженням у мастило та високий відпуск при температурі 470 °С з охолодженням у мастило (згідно з ГОСТ 14959-69). Твердість після гартування становила $HV_5 = 3,31$ ГПа (62 HRC), після відпуску – $HV_5 = 3,01$ ГПа (46 HRC), що задовольняє вимоги до твердості пружин.

Для відпаленої сталі 70 проводили комбіноване деформування сумарно на 60 % (30 % динамічної та 30 % статичної), твердість після деформації становила $HV_5 = 2,67$ ГПа (56 HRC). ПТО проводили при температурах 450, 500 та 550 °С. Залежність твердості від тривалості витримки ПТО наведено на рис. 6.

Наведені дані на рис. 6 свідчать про те, що залежність твердості сталі 70 від тривалості витримки ПТО має екстремальний характер. При цьому максимальне значення твердості $HV_5 = 3,39$ ГПа (64 HRC) досягається при витримці 3 хв, що більше від здеформованого, загартованого та відпущеного стану (за традиційною технологією) на 13 % за шкалою Віккерса та на 39 % вище за шкалою Роквелла. Пружність твердих тіл характеризується лінійним співвідношенням між напруженням і деформацією, що своєю чергою прямо пропорційне твердості, тобто пружність зростає зі зростанням твердості.

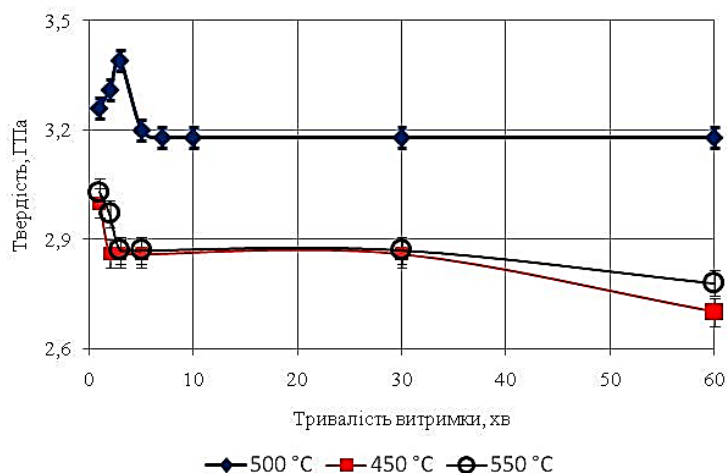


Рис. 6. Залежність твердості сталі 70 від тривалості часу витримки перед рекристалізаційною термічною обробкою

Джерело: розроблено авторами.

При цьому твердість зі збільшенням тривалості витримки ПТО до 60 хв падає на ~6 % ($HV_5 = 3,19$ ГПа, або 60 HRC), але залишається вищою на 19 %, ніж після комбінованого деформування. При цьому твердість після ПТО протягом 60 хв залишається вищою, ніж твердість після традиційної обробки на 30 %, що дозволяє використовувати запропоновану обробку як альтернативу традиційній технології виготовлення пружин та ресор.

Результати роботи впроваджені на підприємствах ТОВ «АМІКО ДІДЖИТАЛ», ТОВ «Едвайс Ю Уорлд Україна» / Advice You World GmbH (Ukraine), ТОВ «САКЕНА» при виготовленні регулюючих пружин мембранних клапанів трубопроводів.

Висновки. Діаграми залежності твердості технічно чистого заліза від величини статичної деформації, температури й часу витримки, які побудовані на основі експериментальних даних, свідчать про зміцнювальний ефект передрекристалізаційної термічної обробки (ПТО). Виявлено, що статичне деформування забезпечує більшу ефективність ПТО, ніж рівноканальне кутове пресування. ПТО надає можливість суттєво зміцнювати метали, сталі і напилени покриття при короткочасній витримці, при температурі початку первинної рекристалізації (1...2 хв).

Встановлено, що термічна стабілізація полігонізаційної субструктури до 60 хв забезпечується комбінуванням одновісних деформацій на стискування, а саме динамічної на 30 % та статичної на 30 %, з наступною передрекристалізаційною термічною обробкою при температурі початку первинної рекристалізації, при цьому розмір субзерен становить 80...187 нм, міцнісні характеристики підвищуються на 10...30 % при достатній пластичності.

Показано, що ПТО забезпечує формування наномасштабних елементів у електродугових покриттях із Св-08Г2С, а додаткове деформування покриття дозволяє підвищити термічну стійкість полігонізаційної субструктури до 40...50 хв.

Встановлено, що комбінована деформація та наступна передрекристалізаційна термічна обробка сталей забезпечує збільшення розрахункової кількості наномасштабних субзерен від 15 до 65 %. Кут розорієнтування субзерен при цьому залишається більшим відносно деформованого стану.

Апробація запропонованого способу комбінованого деформування з наступною передрекристалізаційною термічною обробкою впродовж 60 хв на сталі 70, яка використовується для виготовлення регулюючих пружин мембранних клапанів трубопроводів в промислових умовах, показала, що твердість (HRC) після запропонованої деформації та термічної обробки на 19 % більша, ніж після застосування традиційної технології (гартування та відпуску). Цим розкривається можливість практичного застосування запропонованого способу наноструктурування шляхом формування здрібної полігонізаційної субструктури передрекристалізаційною термічною обробкою.

Список використаних джерел

1. Хоменко О. В. Інтенсивна пластична деформація: методи та математичні моделі формування наноматеріалів [Електронний ресурс] / О. В. Хоменко // Журнал фізичних досліджень. – 2020. – № 24 (2). – С. 2000-1–2000-20. – DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.24.2001>.
2. Research of the possibility of nanostructuring functional materials by pre-recrystallization heat treatment [Electronic resource] / Oleksandr Dubovyy, Anton Karpechenko, Tatyana Makryha, Maksym Bobrov, Alexander Labartkava, Andrey Labartkava // Bulletin of the Georgian National academy of sciences. – 2021. – Vol. 15, no. 1. – Pp. 45-51. – Accessed mode: http://science.org.ge/bnas/t15-n1/07_Dubovyy_Materials%20Science.pdf.
3. Влияние типа и степени интенсивной пластической деформации на структуру и свойства литых Al—Sc-сплавов [Электронный ресурс] / А. Л. Березина, Т. А. Монастырская, А. А. Давиденко, О. А. Молебный, С. С. Полищук // Металлофиз. новейшие технол., 2016. – Т. 38, № 8. – С. 1057-1076. – DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.38.08.1057>.
4. Залежність розміру зерна аустеніту від умов гарячого обтискування вуглецевої сталі [Електронний ресурс] / І. О. Вакуленко, О. О. Чайковський, Л. І. Вакуленко, Д. М. Болотова, А. О. Чайковська // Металознавство і термічна обробка металів. – 2018. – № 1. – С. 18-24. – DOI: <https://doi.org/10.30838/J.PMNTM.2413.240418.18.100>.

5. Проїдак С. В. Исследование влияния горячей пластической деформации на структуру и механические свойства литой нержавеющей стали типа X13 [Электронный ресурс] / *New Technologies and Achievements in Metallurgy and Materials Engineering : XIII International Scientific Conference*. – Czestochowa, 2012. – Chapter 1. – Pp. 460–463. – Режим доступа: <http://eadnurt.diit.edu.ua:82/jspui/handle/123456789/1572>.

6. Исследование влияния деформации на структуру и свойства катанки из стали 20 / Н. Н. Бережной, В. А. Чубенко, С. О. Мацышин, А. О. Шепель // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – № 4/5 (58). – С. 4-6.

7. Вплив температури на мікроефекти статичного деформування та руйнування теплостійких сталей [Електронний ресурс] / П. Ясній, В. Гладько, П. Марущак, Д. Баран // *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. – 2007. – Т. 12, № 3. – С. 7-16. – Режим доступу: <https://core.ac.uk/download/pdf/237216578.pdf>.

8. Балицький О. І. Вплив попереднього пластичного деформування сталі 12X18H12T 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/bitstream/handle/123456789/138270/02-Balitskii.pdf?sequence=1>.

9. Формування нанорозмірної полігонізаційної субструктури та її вплив на фізико-механічні властивості металів, стопів і напорошених покриттів [Електронний ресурс] / О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, О. О. Жданов, М. М. Бобров, Т. О. Макруха, Ю. Є. Неделько // *Металлофіз. новітні техн.* – 2017, – Т. 39, № 2. – С. 209–243. – DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.39.02.0209>.

10. Покропивний В. В. Перспективи наноматеріалознавства [Електронний ресурс] / В. В. Покропивний, В. В. Скороход // *Вісник Українського матеріалознавчого товариства*. – 2008. – № 1(1). – С. 55-70. – Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/15847>.

11. State and prospects of application of plastically deformed nanostructured metals, alloys, and sprayed coatings [Electronic resource] / Syzonenko Olha, Dubovyi Oleksandr, Makrukha Tetiana, Karpechenko Anton, Bobrov Maksym, Torpakov Andrii // *Machines. Technologies. Materials*. – 2021. – Vol. 15, Issue 7. – Pp. 279-282. – Accessed mode: <https://stumejournals.com/journals/mtm/2021/7/279>.

12. Жданов О. О. Закономірності впливу передрекристалізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості деформованих сталей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.01 «Матеріалознавство» / Жданов Олександр Олександрович. – Херсон, 2015. – 24 с.

13. Тихонова М. С. Рекристаллизационные процессы в аустенитной коррозионностойкой стали после больших пластических деформаций : дис. ... канд. физ.-мат. наук : спец. 01.04.07 «Физика конденсированного состояния» / Тихонова Марина Сергеевна. – Белгород, 2015. – 138 с.

14. Дубовий О. М. Вплив тривісної деформації на субструктуру і твердість технічно чистого заліза після передрекристалізаційної термічної обробки [Електронний ресурс] / О. М. Дубовий, С. І. Шкурат, Т. О. Макруха // *Зб. наук. пр. НУК*. – Миколаїв : НУК, 2016. – № 1 (463). – С. 36–40. – Режим доступу: <http://eir.nuos.edu.ua/xmlui/handle/123456789/4097>.

15. Механические свойства наноструктурного железа, полученного интенсивной пластической деформацией трением [Электронный ресурс] / А. И. Юркова, А. В. Белоцкий, А. В. Бякова, Ю. В. Мильман // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*. – 2009. – Т. 7, № 2. – С. 619–632. – Режим доступа: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/16356>.

16. Развитие технологии газотермического напыления покрытий формированием измельченной наноразмерной полигонизационной субструктуры [Электронный ресурс] / А. Н. Дубовой, А. А. Карпеченко, М. Н. Бобров, А. В. Лабарткава // *Металлофіз. новітні техн.* – 2020. – Т. 42, № 4. – С. 631-653. – DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.42.05.0631>.

References

1. Khomenko, O.V. (2020). Intensity of plastic deformation: methods and mathematical models of nanomaterials formation [Severe plastic deformation: methods and mathematical models of nanomaterials formation]. *Zhurnal fizychnykh doslidzhen – Journal of Physical Studies*, (24(2)), 2000-1–2000-20. <https://doi.org/10.30970/jps.24.2001>.

2. Oleksandr Dubovyy, Anton Karpechenko, Tatyana Makryha, Maksym Bobrov, Alexander Labartkava & Andrey Labartkava (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. http://science.org.ge/bnas/t15-n1/07_Dubovyy_Materials%20Science.pdf.

3. Berezina, A.L., Monastyrskaya, T.A., Davidenko, A.A., Molebnyi, O.A., & Polishchuk, S.S. (2016). Vliianie tipa i stepeni intensivnoi plasticheskoi deformatsii na strukturu i svoistva litykh Al-Sc-splavov [Influence of Type and Degree of a Severe Plastic Deformation on Structure and Properties of Cast Al—Sc Alloys]. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii – Metallophysics and Advanced Technologies*, (38 (8)), 1057-1076. <https://doi.org/10.15407/mfint.38.08.1057>.

4. Vakulenko, I.O., Chaikovskiy, O.O., Vakulenko, L.I., Bolotova, D.M., & Chaikovska, A.O. (2018). Zalezhnist rozmiru zerna austenitu vid umov hariachoho obtyskuvannia vuhletsevoi stali [The dependence of grain size austenite from the condition of hot deformation carbon steel]. *Metaloznavstvo i termichna obrobka metaliv – Metal Science and Heat Treatment of Metals*, (1), 18-24. <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.240418.18.100>.

5. Proidak, S.V. (2012) Issledovanie vliianiia goriachei plasticheskoi deformatsii na strukturu i mekhanicheskie svoistva litoi nerzhavieushchei stali tipa Kh13 [The analysis of influence of hot plastic deformation on the structure and mechanical properties of cast stainless steel type H13]. *New Technologies and Achievements in Metallurgy and Materials Engineering : XIII International Scientific Conference*, (1), 460–463. <http://eadnurt.diit.edu.ua:82/jspui/handle/123456789/1572>.

6. Bereznoi, N. N., Chubenko, V. A., Matcyshin, S. O. & Shepel, A. O. (2012). Issledovanie vliianiia deformatsii na strukturu i svoistva katanki iz stali 20 [Investigation of the influence of deformation on the structure and properties of wire rod from steel 20]. *Vostochno-Evropskii zhurnal peredovykh tekhnologii – Eastern European Journal of Advanced Technologies*, (4/5(58)). 4-6.

7. Yasniy, P., Hlado, V., Maruschak, P. & Baran, D. (2007). Vplyv temperatury na mikromekhanizmy statychnoho deformuvannia ta ruinuvannia teplostiikykh stalei [The influence of temperature on micromechanisms of static strain and fracture of heat-resistance steels]. *Visnyk Ternopil'skoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu – Bulletin of Ternopil State Technical University*, (12 (3)), 7-16. <https://core.ac.uk/download/pdf/237216578.pdf>.

8. Balytskyi, O.I., Eliash, Ya. & Ripei, I.V. (2011). Vplyv poperednoho plastychnoho deformuvannia stali 12Kh18N12T na yii mekhanichni vlastyvoli [Injection of the front plastic deformation of steel 12X18H12T on the its mechanical power]. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv – Physical and chemical mechanics of materials*, (4), 20-27. <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/138270/02-Balitskii.pdf?sequence=1>.

9. Dubovyy, O. M., Karpechenko, A. A., Bobrov, M. M., Zhdanov, O. O., Makrukha, T. O., & Nedelko, Yu. E. (2017). Formuvannia nanorozmirnoi polihonizatsiinoi substruktury ta yii vplyv na fizyko-mekhanichni vlastyvoli metaliv, stopiv i naporoshenykh pokryttiv [Formation of polygonization nanoscale substructure and its impact on the physical and mechanical properties of metals, alloys, and sprayed coatings]. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii – Metallophysics and Advanced Technologies*, (39 (2)), 209-243. <https://doi.org/10.15407/mfint.39.02.0209>.

10. Pokropivnyi, V.V. & Skorokhod, V.V. (2008). Pekspektivy nanomaterialovedeniia [Nanomaterials Science Perspectives]. *Visnyk Ukrain'skoho materialoznavchoho tovarystva – Bulletin of the Ukrainian Material Science Association*, (1(1)). 55-70, <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/15847>.

11. Syzonenko, Olha, Dubovyi, Oleksandr, Makrukha, Tetiana, Karpechenko, Anton, Bobrov, Maksym, & Torpakov Andrii (2021). State and prospects of application of plastically deformed nanostructured metals, alloys, and sprayed coatings. *Machines. Technologies. Materials*, (15 (7)), 279-282. <https://stumejournals.com/journals/mtm/2021/7/279>.

12. Zhdanov, O.O. (2015). *Zakonomirnosti vplyvu peredrekrystalizatsiinoi termichnoi obrobky na fizyko-mekhanichni vlastyvoli deformovanykh stalei [Regularities in the injection of pre-recrystallization heat treatment on the physical and mechanical power of deforming steels]. [Abstract of PhD dissertation, Kherson]*.

13. Tikhonova, M.S. (2015). *Rekristalizatsionnye protsessy v austenitnoi korroziionnostoikoii stali posle bolshikh plasticheskikh deformatsii [Recrystallization processes in austenitic corrosion-resistant steel after large plastic deformations]. [PhD dissertation, Belgorod]*.

14. Dubovyi, O.M., Shkurat, S.I., & Makrukha T.O. (2016). Vplyv tryvisnoi deformatsii na substrukturu i tverdist tekhnichno chystoho zaliza pislia peredrekrystalizatsiinoi termichnoi obrobky [The influence of triaxial deformation on the substructure and the hardness of technically pure iron after pre-recrystallization heat treatment]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK – Collection of scientific works NUoS*, (1(463)), 36-40. <http://eir.nuos.edu.ua/xmlui/handle/123456789/4097>.

15. Iurkova, A.I., Belotckii, A.V., Biakova, A.V., & Milman, Iu.V. (2009). Mekhanicheskie svoistva nanostrukturного zheleza, poluchennogo intensivnoi plasticheskoi deformatsiei treniem [Mechanical properties of nanostructured iron obtained by severe plastic deformation by friction]. *Nanosistemi, nanomateriali, nanotekhnologii – Nanosystems, nanomaterials, nanotechnologies*, (7(2)), 619-632. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/16356>.

16. Dubovoi, A.N., Karpechenko, A.A., Bobrov, M.N., & Labartkava, A.V. (2020). Razvitie tekhnologii gazotermicheskogo napyleniia pokrytii formirovaniem izmelchennoi nanorazmernoii poligonizatsionnoi substrukturny [Development of the technology of thermal spraying of coatings by the formation of a crushed nanosized polygonization substructure]. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii – Metallophysics and Advanced Technologies*, (42 (4)). 631-653. <https://doi.org/10.15407/mfint.42.05.0631>.

Отримано 17.11.2022

UDC 621.78: 66.065.32:67.017

Tetiana Makrukha¹, Oleksandr Dubovyy²

¹PhD, associate professor Department of Applied Mechanics

Robert Elvorti Economics and Technology Institute (Kropyvnytskyi, Ukraine)

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

²Doctor 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.dubovyy@nuos.edu.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2843-1879>, **ResearcherID:** [57194338570](https://orcid.org/57194338570)

CURRENT STATUS AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF NANOSTRUCTURING OF DEFORMED METALS AND ALLOYS AND SPRAYED COATINGS

The information presented in the article is an overview of the possibility of improving the mechanical properties of metals, alloys and sprayed coatings in order to obtain a dispersed, in particular, nanoscale substructure, which allows obtaining a set of unique operational characteristics, which, in turn, will increase the resource of parts of machines and mechanisms that are used in mechanical engineering.

Today, the most common method of nanostructuring is intensive plastic deformation (by friction, by equal-channel angular pressing, etc.), however, these methods can only be used for the manufacture of parts with a small cross-section, so the creation of new methods of deformation-thermal treatment is an urgent task of modern materials science.

The paper shows the possibility of applying pre-deformation and pre-recrystallization heat treatment for technically pure iron, carbon steels of 1020 (сталь 20), 1045 (сталь 45), 1070 (сталь 70), A284Gr.D (Cm3) and C80W (V8) brands, alloyed steels of 5140H (40X) and AISI 420 (20X13) brands, Sv-08G2S (Св-08Г2С) gas-thermal and electric arc coatings, as well as Ni80Cr20 nichrome alloy and CuAl9Mn2 (2.0960) bronze (БрАМц9-2).

The work compares methods of static deformation with methods of intensive plastic deformation and shows that pre-recrystallization heat treatment allows to significantly strengthen metals (more than 30%) in combination with sufficient plasticity (for A284Gr.D (Cm3) steel, the relative elongation is up to 7.5%, and the relative narrowing is up to 75 %).

The work presents the results of the experimental investigation of the influence of deformation and thermal factors on the mechanical properties, in particular, hardness and strength, of metals, alloys and sprayed coatings. It is established that the strengthening effect occurs due to the refinement of substructural elements, such as the size of coherent scattering regions, the disorientation angle of subgrains, and the number of substructural elements to a nanoscale state. Thus, with the help of additional deformation followed by pre-recrystallization and heat treatment of carbon and alloyed steels, it is possible to obtain subgrains with a size of less than 200 nm with a disorientation angle of up to 2 ° with a relative amount of nanoscale subgrains of up to 65 %.

The possibility of industrial application of the proposed technology is shown on the example of production of regulating springs of membrane valves of pipelines made of 1070 (сталь 70) steel, which allows to increase the hardness by 19 %.

Keywords: pre-recrystallization heat treatment; mechanical properties of steels; dynamic deformation; subgrain size; angle of disorientation of subgrains.

Fig.: 6. Tables: 5. References: 16.