

УДК 67.017:620.18:621.785

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2020.91.0.136

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМБІНОВАНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ТА ПЕРЕДРЕКРИСТАЛІЗАЦІЙНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТАЛЕЙ

Дубовий О. М., Макруха Т. О.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Анотація. Досліджено вплив комбінованої деформації та передрекристиалізаційної термічної обробки (ПТО) на зміну структури, твердості, тимчасового опору руйнування та відносного подовження сталей Ст3 та Х12. Показано, що застосування комбінованого деформування та ПТО протягом 2 хв для сталі Ст3 дозволяє досягнути підвищення твердості на 29 % щодо деформованого стану. Установлено, що комбіноване деформування та передрекристиалізаційна термічна обробка сталі Х12 приводить до підвищення твердості на 11 % після комбінованої деформації з наступною ПТО протягом 2 хв.

Ключові слова: передрекристиалізаційна термічна обробка, комбінована деформація, субструктура сталі, механічні властивості,

Вступ

Рівень сучасного машинобудування, зокрема кораблебудування, характеризується застосуванням та створенням нових матеріалів з підвищеними показниками надійності та довговічності, які характеризуються фізико-механічними властивостями. На сьогодні ~ 90 % з усіх матеріалів складають конструктивні матеріали, основними з яких є сталі.

Одним з основних способів підвищення фізико-механічних властивостей є наноструктурування. Подрібнення зеренної та субзеренної структур можливо здійснити завдяки методам ПД (інтенсивної пластичної деформації), РККП (рівноканального кутового пресування) тощо, але в цих методів є основний недолік – складність отримання нанорозмірної субструктури за всім об'ємом металевих деталей машин.

Для вирішення цього завдання кафедрою «Матеріалознавства та технології металів» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова розроблено спосіб деформаційної термічної обробки металів та сплавів, що містить попередню деформацію металу або сплаву з наступною термічною обробкою, яку назвали передрекристиалізаційною [1] Зміст способу полягає в деформуванні металів або сплавів зі ступенем обтискування більше ніж 20 % за температури навколишнього середовища, нагріванні до температури початку рекристиалізації, витримці протягом 0,5...10 хв з подальшим охолодженням до температури доквілля зі швидкістю, яка не викликає зростання субзерен (не менше ніж 5 °C/c) [1–4]. Однак у

цього способу є недолік, пов'язаний з малим часом витримки, за умови якого забезпечуються максимальні показники фізико-механічних властивостей матеріалу, що ускладнює, а в деяких випадках і унеможливає його застосування в умовах промислового виробництва, особливо для масивних деталей. У зв'язку з цим удосконалення традиційних і розробка нових способів наноструктурування, спрямованих на поліпшення фізико-механічних властивостей та підвищення показників експлуатаційних характеристик металів і сплавів є актуальним завданням сучасного технічного виробництва.

Аналіз публікацій

В останні роки досягнуто значних успіхів у створенні наноструктурних матеріалів. Особливу увагу приділяють методам ПД. Ця група методів отримання матеріалів основана на проведенні великоступеневої пластичної деформації в умовах високих прикладених тисків у разі відносно низьких температур [5–8]. В таких умовах деформування відбувається подрібнення мікроструктурних елементів у металах і сплавах до нанорозмірних розмірів. Методи ПД дозволяють отримувати безпористі металеві наноструктуровані вироби (авіаційні кріплення, медичні імпланти тощо). Однак, діапазон розмірів мікроструктурних елементів у таких виробках найчастіше перевищує 200 нм [5, 8]. Структура, отримана в процесі ПД, відрізняється нерівноважністю через малу щільність вільних дислокацій і переважно висококутовий характер границь субзерен [9].

Оскільки методи ППД характеризуються високою вартістю, трудомісткістю та складністю обладнання, і придатні тільки для деталей малого перерізу (до 10 мм), то одним із напрямів вирішення цієї проблеми може стати застосування передрекристалізаційної термічної обробки (ППО) сталей, доступної для промислових умов, суть якої полягає у фіксації полігонізованої субструктури охолодженням матеріалу на етапі формування нанорозмірних субзерен [1–4].

Як встановлено в роботах [10, 11], ППО статично деформованих зразків на 75 % зі сталі У8 та технічно чистого заліза за температури, яка відповідає температурному порозу рекристалізації, приводить до підвищення твердості на 20–30 %, відповідно, за рахунок формування здрібненої полігонізаційної субструктури, максимальне значення якої спостерігається в разі тривалості витримки 2 хв. Твердість зменшується за умови збільшення часу витримки або підвищення температури через збільшення розміру субзерен, що свідчить про нестабільність субструктури у випадку підвищеної температури. У роботі [10] встановлено можливість термічної стабілізації полігонізаційної субструктури в процесі передрекристалізаційної термічної обробки технічно чистих заліза і нікелю впродовж 20...70 хв і 10...60 хв відповідно, яка полягає у проведенні холодної динамічної деформації на 30 % та подальшої статичної деформації на 30 % і передрекристалізаційної термічної обробки. Також з'ясовано, що підвищення термічної стабільності полігонізаційної субструктури сталей 20 і 45 можливе комбінуванням динамічної та статичної деформації сумарно на 60 % і наступною передрекристалізаційною термічною обробкою відповідно до 60 хв, водночас твердість дещо зменшується, але залишається вищою порівняно зі станом після деформації на 14 і 27 % відповідно.

Мета і постановка завдання

Метою роботи є дослідження впливу передрекристалізаційної термічної обробки на механічні властивості комбіновано деформованих сталей Ст3 та Х12.

Дослідження впливу комбінованої деформації та передрекристалізаційної термічної обробки

Для досліджень обрано зразки вуглецевої сталі звичайної якості Ст 3 (сертифікат якості № 05586 відповідно до стандарту

EN 10204/3.1:2005) та інструментальної сталі Х12.

Динамічну деформацію зразків проводили ударною циклічною дією. Статичну деформацію проводили на гідравлічному пресі Losen Housen WLRK (Dusseldorf) з навантаженням до 35 т. Величину деформації сталей визначали як відношення висоти zdeформованого зразка до початкової висоти деформації. Термічну обробку здійснювали в лабораторній електричній печі СНОЛ-1.6.2.0.08/9-М1. Температуру контролювали термопарою хромель-алюмель ТХА (ГОСТ 6616-74).

Аналіз мікроструктури проводили на аналітичному автоемісійному растровому електронному мікроскопі SUPRA55VP з електронно-оптичною колонкою Gemini.

Твердість HRC визначали на приладі типу «Роквел» за умови навантаження 150 кгс (ГОСТ 9013-59 (ІСО 6508-86)).

Твердість HV₅ визначали на приладі типу «Віккерс» (на повздовжніх шліфах) у разі навантаження на індентор 5 кг (ДСТУ ISO 6507-4:2008).

Для дослідження зміни тимчасового опору руйнування (границі міцності), відносного звуження та відносного подовження проводили випробуванням на розтяг за допомогою універсальної розривної машини Р-20 (ГОСТ 1497-84).

Для визначення тимчасового опору руйнування, відносного звуження та відносного подовження зразки піддали розтягуванню під дією плавного зростання зусилля до руйнування. Найбільше зусилля, попереднє руйнування зразка, приймається за зусилля, відповідне тимчасовому опору (ГОСТ 1497-84).

Зйомку дифрактограм проводили за допомогою рентгенівського дифрактометра загального призначення ДРОН-3.0 у випромінюванні міді ($\lambda = 0,15405929$ нм). Кількісний фазовий аналіз здійснювали за допомогою програмного забезпечення QualX2 з використанням міжнародної бази даних ICDD PDF-2 та кристалографічної відкритої бази даних ХПК.

Середній розмір (діаметр) та відносну кількість субзерен визначали за допомогою програмного забезпечення Image Pro Plus. Середній діаметр субзерна вимірюють з інтервалом 2 градуси і проходить через центроїд об'єкта.

Відпалені зразки сталей Ст3 та Х12 розміром 5×5×8 мм відповідно піддавали комбінованій деформації: спочатку здійснювали холодну динамічну деформацію на 30 % потім – статичну деформацію на 30 %. Таким чином, сумарна величина деформації становить 60 %.

Отримані зразки після комбінованого деформування нагрівали в печі до температури первинної рекристалізації 500 °С. Результати дослідження впливу тривалості витримки передрекристалізаційної термічної обробки на твердість представлено на рис. 1 та в табл. 1.

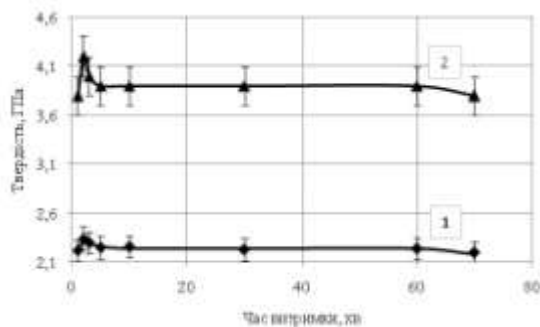


Рис. 1. Залежність впливу часу витримки передрекристалізаційної термічної обробки на твердість: 1 – сталь Ст3; 2 – сталь Х12

Наведені дані рис. 1 свідчать, що залежність твердості від тривалості часу витримки передрекристалізаційної термічної обробки має екстремальний характер. До того ж твердість у процесі витримки 60 хв децю падає, але залишається вищою, ніж після деформації, що дозволяє використовувати цей спосіб деформування та термічної обробки в промислових умовах.

Далі відпалені та комбіновано деформовані зразки сталей піддавали випробуванню на розтяг. Отримані результати тимчасового опору руйнування, відносного подовження та відносного звуження наведено в табл. 1.

На рис. 2 наведено приріст твердості та тимчасового опору руйнування для сталей Ст3 та Х12 відносно комбіновано деформованого стану.

З рис. 2 видно, що приріст твердості та тимчасового опору руйнування сталей Ст3 та Х12 після комбінованого деформування та передрекристалізаційної термічної обробки протягом 60 хв децю зменшується щодо приросту після комбінованого деформування та ППО протягом 2 хв, але залишається значно вищим, ніж після деформування.

Порівняльний аналіз показників пластичності, а саме відносного подовження δ , свідчить про те, що внаслідок комбінованої деформації з подальшою ППО сталі Ст3 відбувається зростання цього параметра з плином часу витримки.

Тобто під час витримки ППО протягом 2 хв значення відносного подовження становить 5,3 % що ~ в 5 разів більше, ніж для деформованого зразка, який не зазнавав термічної

обробки. Збільшення часу витримки до 60 хв призводить до подальшого зростання показника до 7,5 % що ~ в 7 разів більше щодо комбіновано деформованого стану.

Таблиця 1 – Вплив комбінованого деформування та ППО на механічні властивості сталей Ст3 та Х12

Матеріал	Вид обробки	Твердість		Опір тимчасового руйнування	Відносне подовження δ , %	Відносне звуження ψ , %
		HRC	HV, ГПа			
Ст3	Комбінована деформація	63	1,8	0,3	1,0	74
	Комбінована деформація, ППО протягом 2 хв	81	2,3	0,6	5,3	75
	Комбінована деформація, ППО протягом 60 хв	77	2,0	0,4	7,5	59
Х12	Комбінована деформація	67	3,6	1,0	3,3	37
	Комбінована деформація, ППО протягом 2 хв	74	4,2	1,6	2,3	41
	Комбінована деформація, ППО протягом 60 хв	73	3,9	1,4	2,6	33

Отже, для сталі Ст3 запропонований метод обробки (комбінована деформація сумарно на 60 % з подальшою ППО) дозволяє досягнути одночасного підвищення показників переважної більшості досліджуваних механічних властивостей, а саме твердості, опору тимчасового руйнування на розрив та відносного подовження.

Децю інші зміни показників пластичності спостерігаються в дослідженні впливу комбіновано деформованих зразків з подальшою ППО зі сталі Х12 (див. табл. 2). Значення

відносного подовження після ППО зменшується ~ у 1,5 рази для обох досліджених часів витримки порівняно з комбіновано деформованим станом. Імовірно, така відмінність у зміні пластичності внаслідок передрекristалізаційної термічної обробки для сталей різного складу пов'язані з утворенням карбідів хрому Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$ [12], які негативно впливають на показники пластичності, але сприяють зростанню твердості та тимчасовому опору руйнування, що підтверджується результатами фазового аналізу. Але цей показник входить до літературних даних [13].

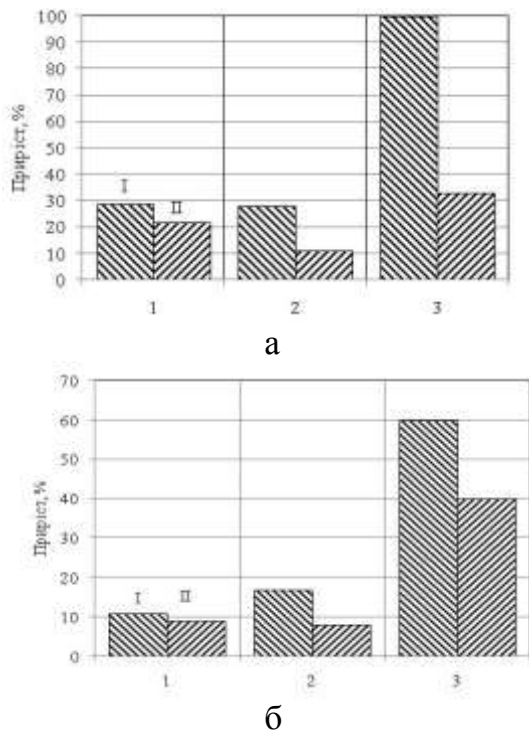


Рис. 2. Приріст показників механічних властивостей сталей Ст3 та X12: а – сталь Ст3; б – сталь X12; 1 – твердість за шкалою HRC; 2 – твердість за шкалою HV; 3 – тимчасовий опір руйнуванню; I – показники властивостей комбіновано деформованого зразка з подальшою ППО протягом 2 хв; II – показники властивостей комбіновано деформованого зразка з подальшою ППО протягом 60 хв

До того ж порівняння отриманих результатів із фактами, наведеними в роботі [14], свідчить про те, що запропонований спосіб комбінованої деформації та термічної обробки дозволяє досягнути більшого зростання твердості у разі аналогічних показників пластичності порівняно з властивостями зразків, отриманих методом високотемпературної механічної обробки та традиційного гартування та відпуску (56...60 HRC).

Результати дослідження демонструють значну зміну показників механічних властивостей сталей після комбінованої деформації та подальшої ППО, тому для встановлення механізму таких змін проведено дослідження здрібнення субструктури зразків сталі Ст3, які наведено на рис. 3.

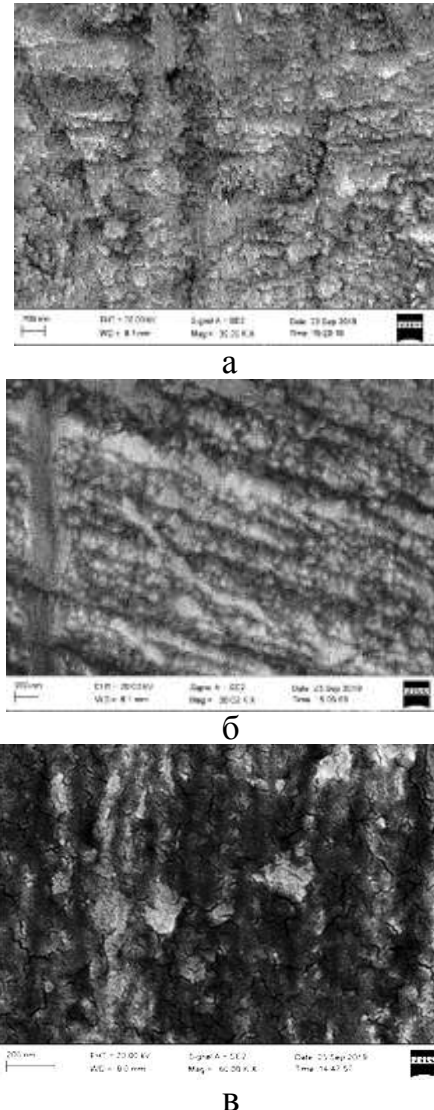


Рис. 3. Мікроструктура сталі Ст3: а – після комбінованої деформації; б – після комбінованої деформації та термічної обробки протягом 2 хв; в – після комбінованої деформації та термічної обробки протягом 60 хв

З рис. 3 видно, що відбувається здрібнення субструктурних елементів після ППО щодо деформованого стану, що підтверджують дані визначення середнього розміру областей когерентного розсіювання (ОКР) з фактором форми ~0,42 та відносну кількість нанорозмірний субзерен (табл. 2).

Таблиця 2 – Значення середнього розміру субзерна та кількості нанорозмірних елементів сталі Ст3 залежно від виду деформації та термообробки

Обробка	Середній розмір субзерна, нм	Кількість нанорозмірних субзерен, %
Комбінована деформація	94	55
Комбінована деформація з подальшою ППО протягом 2 хв	89	66
Комбінована деформація з подальшою ППО протягом 60 хв	92	62

Із наведених фактів у табл. 2 випливає, що відбувається зменшення величини субзерен після ППО щодо деформованого стану. Таким чином, встановлено, що найбільшою кількістю субзерен (66 %) з діаметром ≤ 100 нм у сталі Ст3 можна досягти, застосовуючи комбіновану деформацію на 60 % (30 % динамічної та 30 % статичної) з подальшою ППО за температури 500 °С з витримкою 2 хв. Витримка 60 хв дещо знижує кількість нанорозмірних субзерен (на 4 %), але їхня кількість залишається достатньою для забезпечення високої твердості.

Отже, комбінована деформація зразків, яка полягає в попередній динамічній деформації та наступній статичній деформації, сприяє утворенню субструктури наномасштабного розміру. Очевидно, що додаткова статична деформація збільшує кількість структурних недосконалостей у вигляді дислокаційних перехрещень.

Відомо, наприклад [9], що рух дислокацій перешкоджають границі субзерен, частинки іншої фази, концентраційні неоднорідності, структурні недосконалості (дислокації), флуктуації в ґратці, пов'язані з нерівномірним розподілом енергії та домішок.

Також дислокації, які були введені в разі деформації, блокуються домішковими атомами, тому в процесі наступного навантаження ці дислокації не беруть участі в ковзанні, вони гальмують новоутворені дислокації або частини дислокацій, які розблоковуються після деформаційного навантаження. Атоми проникнення в металах викликають більшу тетрагональність та приводять до різкого підвищення твердості та опору руй-

нування за рахунок утворення потрійних вузлів (перехрещень) дислокацій та гальмування дислокацій домішковими атомами переважно тими, що розчинені шляхом проникнення.

Висновки

1. Показано, що застосування комбінованого деформування та ППО протягом 2 хв для сталі Ст3 дозволяє досягнути підвищення твердості та міцності на 29 % і 100 % відповідно щодо деформованого стану, та на 22 % і 33 % відповідно після термічної обробки протягом 60 хв щодо деформованого стану.

2. Зміна твердості та тимчасового опору руйнування сталі Ст3 відбувається за рахунок подрібнення середнього розміру субзерна та збільшення відносної кількості нанорозмірних субзерен.

3. Установлено, що комбіноване деформування та передрекристилізаційна термічна обробка сталі Х12 приводить до підвищення твердості та тимчасового опору руйнування на 11 % і 60 % відповідно після комбінованої деформації з подальшою ППО протягом 2 хв та на 9 % і 40 % відповідно після комбінованої деформації та ППО з витримкою протягом 60 хв.

4. Показано, що екстремальні зміни твердості проявляються за умови підвищеного вмісту вуглецю та хрому в сталях.

Література

1. Пат. 95378 Україна МПК (2009) С21D8/00, С22F 1/00. Спосіб деформаційно-термічної обробки металів та сплавів / О. М. Дубовий, Т. А. Янковець, Н. Ю. Лебедева, Ю. О. Казимиренко, О. О. Жданов, М. М. Бобров; заявник и патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова – № а 201120102248, заявл. 01.03.2010; опубл. 25.07.2011, бюл. № 14. – 6 с.
2. Дубовий О.М., Лебедева Н.Ю., Янковець Т.А. Вплив передрекристилізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості напильних покриттів та деформованих металів та сплавів // Металознавство та обробка металів. – 2010. – №3. – С. 7–10.
3. Формування нанорозмірної полігонізаційної субструктури та її вплив на фізико-механічні властивості металів, стопів і напорошених покриттів / О.М. Дубовий та ін. // Металлофізика и новейшие технологии. – 2017. – Т. 39, №2. – С. 209–243.
4. Підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей електродугових та плазмових покриттів формуванням термічно ста-

- більшої здрібненої і нанорозмірної субструктури / О.М. Дубовий та ін. // *Металофіз. і новітні технології*. – 2019. – Т. 41, № 4. – С. 461–480.
5. Юркова О.І., Косянчук А.В., Гриценко М.Г. Структурний стан і механічні властивості пластично деформованого заліза // *Металознавство та обробка металів*. – 2011. – № 1. – С. 3–9.
 6. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – Москва: Академкнига, 2007. – 372 с.
 7. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – Москва: Логос, 2000. – 272 с.
 8. Юркова О.І., Карпов Р.В., Клягін Є.О. Особливості формування нанокристалічної структури в α -залізі при деформації тертям // *Металознавство та обробка металів*. – 2010. – № 1. – С. 12–16.
 9. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. – Москва: МИСИС, 2005. – 432 с.
 10. Дубовий О.М., Лю Шен, Макруха Т.О. Вплив комбінованого деформування на термічну стабільність полігонізаційної субструктури заліза, нікелю й сталей 20, 45 // *Зб. наук. праць НУК*. – Миколаїв: НУК, 2017. – № 1. – С. 39–47.
 11. Дубовий О.М., Макруха Т.О. Вплив виду комбінованого деформування на полігонізаційну субструктуру заліза та сталі У8 // *Зб. наук. праць НУК*. – Миколаїв: НУК, 2018. – № 3–4 (474). – С. 66–74.
 12. Мордасов Д.М., Зотов С.В. Термоциклическая обработка штампов для работы в условиях горячего деформирования из стали // *Вестник ТГТУ*. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 481–490.
 13. Алифанов А.В. Милюкова А.М., Цуран В.В. Сравнительный анализ механических характеристик сталей, применяемых для изготовления рубильных ножей, получаемых методами термической и термомеханической обработки // *Литье и металлургия*. – 2014. – 4 (77). – С. 74–80.
 14. Алифанов А.В. Милюкова А.М., Цуран В.В. Влияние термомеханической обработки на механические свойства инструментальных сталей, применяемых при изготовлении ножей для рубки технологической щепы // *Литье и металлургия*. – 2013. – № 1 (69). – С. 127–131.
- References**
1. Dubovyi O.M., Yankovec T.A., Lebedieva N.Yu., Kazymyrenko Yu.O., Zhdanov O.O., Bobrov M.M. Sposib deformatsiino-termichnoi obrobky metaliv ta splaviv [Method deformation and heat treatment of metals and alloys] Patent UA 95378 no. a 201120102248, 2011
 2. Dubovyi O.M., Lebedieva N.Yu., Yankovec T.A. Vplyv peredrekrystalizatsiynoi termichnoi obrobky na fizyko-mexanichni vlastyvoli napylenyh pokryttiv ta deformovanyh metaliv ta splaviv [Effect of pre-recrystallization heat treatment on physical and mechanical properties of sprayed coatings and deformed metals and alloys] *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv [Metallurgy and metal processing]* 2010. Vol. 3, pp. 7-10.
 3. Duboviy O. M., Karpechenko A. A., Bobrov M. M., Zhdanov O. O., Makruha T. O., Nedel'ko Ju. Je. Formuvannja nanorozmir-noi' poligonizacijnoi' substrukury ta ii' vplyv na fizyko-mexanichni vlastyvoli metaliv, stopiv i naporoshenyh pokryttiv [Formation of nanosized polygonization substructure and its influence on the physical and mechanical properties of metals, feet and powdered coatings] *Metal-lofzyka y novejshe tehnology [Metal-physics and the latest technologies]*. - 2017. – Vol. 39, № 2, pp. 209-243.
 4. Duboviy O. M., Karpechenko A. A., Bobrov M. M., Labartkava O. V., Nedel'ko Ju. Je., Lymar O. O. Pidvysshennja fizyko-mexanichnyh ta ekspluatacijnyh vlastyvolej elektrodugovyh ta plazmovykh pokryttiv formuvannjam termichno stabil'noi' zdribnenoj i nanorozmirmoi' substrukury [Improving the physical and mechanical and operational properties of electric arc and plasma coatings by forming thermally stable crushed and nanosized substructure] *Metalofiz. novitni tehnologii' [Metalphysics. new technologies]*. 2019. Vol. 41, no. 4, pp. 461-480.
 5. Yurkova O. I., Kosianchuk A. V., Hrycenko M. H. Strukturnyi stan i mexanichni vlastyvoli plastychno deformovanogho zaliza [Structural state and mechanical properties of plastically deformed iron] *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv [Metal science and treatment of metals]*, 2011, no.1, pp. 3-9.
 6. Valiev R. Z., Aleksandrov I. V. Obemnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie, struktura i svoystva [The volumetric nanostructured metallic materials: preparation, structure and properties]. Moscow: Akademkniga, 2007. 372 p.
 7. Vallyev R. Z., Aleksandrov Y. V. Nanostrukturnye materyaly, poluchennye yntensyvnoj plastycheskoj deformatsiej [Nanostructured materials obtained by intense plastic deformation]. Moscow: Logos [Logos], 2000. 272 p.
 8. Yurkova O. I., Karpov R. V., Kliaghin Ye. O. Osoblyvosti formuvannia nanokrystalichnoi struktury v α -zalizi pry deformacii tertiam [Specific features of formation of nanocrystalline structure in α -iron at deformation with friction] *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv [Metal science and treatment of metals]*, 2010, no.1, pp. 12–16.
 9. Gorelik S. S., Dobatkin S. V., Kaputkina L. M., Rekrystallizatsiya metallov i splavov

- [Recrystallization of metals and alloys]. Moscow: MISIS, 2005. 432 p.
10. Dubovii O. M., Makruha T. O., Lyu Shen. Vplyv kombinovanogo deformuvannia na termichnu stabilnist poligonizachii noi substruktu zaliza, nikelu i stalei 20; 45 [Influence of the combined deformation on the thermal stability of the polygonization substructure of iron, nickel and steel 20; 45]. Zb. nauk. prac. NUK [Collection of scientific publications of NUOS], Mykolaiv, NUOS Publ., 1. 2017, pp. 39-47.
 11. Dubovij O. M., Makruha T. O. Vplyv vydu kombinovanogo deformuvannja na poligonizacijnu sub-strukturu zaliza ta stali U8 [Influence of the type of combined deformation on the polygonization substructure of iron and steel U8] Zb. nauk. prac' NUK [Coll. Science. against NUOS] . Mykolaiv: NUOS, 2018, no. 3-4 (474). pp. 66-74.
 12. Mordasov D.M., Zotov S.V. Termocyklycheskaja obrabotka shtampov dlja raboty v uslovijah gorjachego deformyrovanyja yz staly [Thermocyclic processing of dies for work in the conditions of hot deformation of steel] Vestnyk TGIU [Bulletin of TSTU.]. 2016. Vol 22. no. 3. pp. 481-490.
 13. Alifanov A. V., Miljukova A. M., Curan V. V. Svrnitel'nyj analiz mehanicheskikh harakteristik stalej, primenjaemyh dlja izgotovlenija rubil'nyh nozhej, poluchaemyh metodami termicheskoj i termomehanicheskoj obrabotok [Comparative analysis of the mechanical characteristics of steels used for the manufacture of chopping knives obtained by the methods of thermal and thermomechanical processing] Lit'e i metallurgija [Casting and metallurgy], 4 (77), 2014. pp. 74-80.
 14. Alifanov A. V., Miljukova A. M., Curan V. V. Vlijanie termomehanicheskoj obrabotki na mehanicheskie svojstva instrumental'nyh stalej, primenjaemyh pri izgotovlenii nozhej dlja rubki tehnologicheskoi shhepy [The influence of thermomechanical processing on the mechanical properties of tool steels used in the manufacture of knives for cutting technological chips] Lit'e i metallurgija [Casting and metallurgy], 1 (69), 2013. pp. 127-131

Дубовий Олександр Миколайович, д.т.н., проф.
кафедри матеріалознавства та технології металів,
тел. +38 068-557-34-00, e-mail:
oleksandr.dubovij@nuos.edu.ua,

Макруха Тетяна Олександрівна, пров. фахівець
кафедри матеріалознавства та технології металів,
тел. +38 093-79-35-865,
e-mail: tmakruha@gmail.com,
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, пр. Героїв України
(Сталінграда), 9, м. Миколаїв, 54025, Україна.

Study of the impact of combined deformation and pre-recrystallization thermal treatment on the structure and mechanical properties of steel

Abstract. Problem. Currently, the overall level of modern machine building, namely shipbuilding, is characterized by the use and creation of new materials with increased indicators of durability and reliability that are characterized by physical and mechanical properties. Nanostructuring is one of the methods of increasing physical and mechanical properties of materials. However, it has significant drawback which involves the difficulty of obtainment of nanosized structure by all of the volume of metal parts of the machines. The method of metal deformation and subsequent pre-recrystallization thermal treatment, developed at Adm. Makarov National University of Shipbuilding, can solve this problem. **Goal.** The goal is the study of the impact of pre-recrystallization thermal treatment on mechanical properties of St3 and H12 steels after combined deformation. **Methodology.** The methods of raster electron microscopy, structure analysis, hardness measurement, fracture testing and X-ray diffraction patterns analysis were used in order to determine the changes of structure and mechanical properties of the studied specimens. **Results.** It is shown that the use of combined deformation and subsequent pre-recrystallization thermal treatment during 2 minutes for St3 steel allows obtainment of the increase of hardness and strength by 29 % and 100 % respectively if compared to the deformed state, and by 22 % and 33 % respectively after 60 minutes of thermal treatment if compared to the deformed state. Changes of hardness and temporary fracture resistance of St3 steel occurs due to the decrease of mean subgrain size and increase of relative quantity of nanosized subgrains. It is found out that combined deformation and subsequent pre-recrystallization thermal treatment of H12 steels leads to the increase of hardness and temporary fracture resistance by 11 % and 60 % respectively after treatment during 2 minutes if compared to the deformed state and by 9 % and 40 % respectively after treatment during 60 minutes if compared to the deformed state. It is shown that extreme changes of hardness occur in case of increased content of carbon and chromium in steels. **Originality.** Optimal modes for treatment of St3 and H12 steels are proposed. Changes of structure and mechanical properties of H12 steel after combined deformation and thermal treatment are studied for the first time. **Practical value.** The use of the proposed method of combined deformation and subsequent thermal treatment can be used in industry (namely, shipbuilding, automotive industry and tools manufacture) to increase hardness, strength and durability of details.

Key words: pre-recrystallization thermal treatment, combined deformation, steel substructure, mechanical properties.

Dubovyi Oleksandr, professor, Doct. of Science, Materials Science and Technology of Metals Department, oleksandr.dubovyj@nuos.edu.ua, tel. +38 068-557-34-00,

Makruha Tetiana, Senior Specialist, Materials Science and Technology of Metals Department, tel. +38 093-79-35-865, tmakruha@gmail.com, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Prospect of Heroes of Ukraine (Stalingrada), 9, Mykolaiiv, 54025, Ukraine.

Исследование влияния комбинированной деформации и предрекристаллизационной термической обработки на структуру и механические свойства сталей

Аннотация. Исследовано влияние комбинированной деформации и предрекристаллизационной термической обработки (ППО) на изменение структуры, твердости, временного сопротивления разрушению и относительного удлинения сталей Ст3 и Х12. Показано, что применение комбинированного деформирования и ППО в течение 2 мин для стали Ст3 позволяет достичь

повышения твердости на 29% относительно деформированного состояния. Установлено, что комбинированное деформирование и предрекристаллизационная термическая обработка стали Х12 приводит к повышению твердости на 11% после комбинированной деформации с последующей ППО в течение 2 мин.

Ключевые слова: предрекристаллизационная термическая обработка, комбинированная деформация, субструктура сталей,

Дубовой Александр Николаевич, д.т.н., проф. кафедры материаловедения и технологии металлов, тел. +38 068-557-34-00, oleksandr.dubovyj@nuos.edu.ua,

Макруха Татьяна Александровна, вед. специалист кафедры материаловедения и технологии металлов, тел. +38 093-79-35-865, e-mail: tmakruha@gmail.com, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, проспект Героев Украины (Сталинграда), 9, г. Николаев, 54025, Украина.