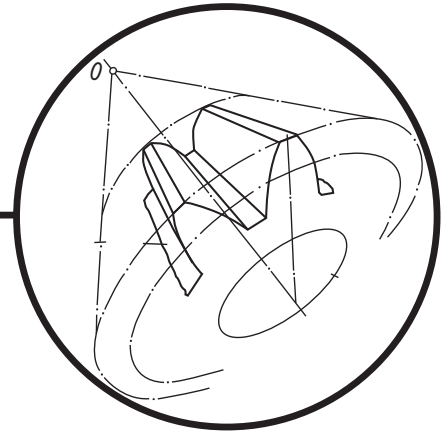




DOI 10.15589/jnn20170107
УДК 669-15
Д79

INFLUENCE OF THE COMBINED DEFORMATION ON THE THERMAL STABILITY OF THE POLYGONIZATION SUBSTRUCTURE OF IRON, NICKEL AND STEEL 20; 45

ВПЛИВ КОМБІНОВАНОГО ДЕФОРМУВАННЯ НА ТЕРМІЧНУ СТАБІЛЬНІСТЬ ПОЛІГОНІЗАЦІЙНОЇ СУБСТРУКТУРИ ЗАЛІЗА, НІКЕЛЮ Й СТАЛЕЙ 20; 45

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

Lyu Shen
lusheng119@yahoo.com.cn
ORCID: 0000-0001-7695-8547

Tetiana O. Makrukha
tmakruha@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8841-1699

О. М. Дубовий,
д-р техн. наук, проф.¹

Лю Шен,
проф.²

Т. О. Макруха,
асп.¹

¹*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

²*Jiangsu University of Science and Technology, People's Republic of China*

¹*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

²*Університет науки і техніки провінції Цзянсу, Китайська Народна Республіка*

Abstract. The influence of the combined deformation on the thermal stability of the polygonization substructure of the technically pure iron, nickel and carbon steels has been shown in the article. So, the aim of the work is to increase the thermal stability of the polygonization substructure, which provides maximum values of the hardness of iron, nickel, steel 20 and steel 45. The hardness after deformation and pre-recrystallization heat treatment, the influence of the magnitude of deformation, and influence of the concentration of carbon on the physical and mechanical properties and size of coherent scattering are experimentally investigated. The possibility of the thermal stability of the polygonization substructure during the pre-recrystallization heat treatment of the Fe, Ni and steels by using combined deformation is stated. The influence of the carbon concentration in steels on their hardness is studied. The magnification of the carbon concentration, which leads to decreasing of the hardness growth after the pre-recrystallization heat treatment of the deformed steels, is detected. The decrease of the ranges of coherent scattering for the values of the physical and mechanical properties, such as hardness, is proved. The combined deformation allows using this method for machine parts and appliances.

Keywords: technically pure iron; carbon steels; combined deformation; pre-recrystallization heat treatment; substructure elements; hardness.

Анотація. Розглянуто вплив комбінованої деформації на термічну стабільність заліза, нікелю і вуглецевих сталей. Запропоновано встановлення термічної стабільності полігонізаційної субструктури, яка забезпечує максимальну твердість технічно чистих заліза та нікелю, сталей 20; 45 шляхом комбінованого деформування. Експериментально досліджено твердість, вплив концентрації вуглецю й розміру областей когерентного роз-

сіювання на фізико-механічні властивості Fe, Ni, сталей 20; 45. З'ясовано можливість термічної стабільності полігонізаційної субструктури в процесі передрекристалізаційної термічної обробки після попередньої комбінованої деформації.

Ключові слова: технічно чисте залізо; комбіноване деформування; передрекристалізаційна термічна обробка; субструктурні елементи; твердість.

Аннотация. Рассматривается влияние комбинированного деформирования на термическую стабильность полигонизационной субструктуры железа, никеля и углеродистых сталей. Предлагается установление термической стабильности полигонизационной субструктуры, которая обеспечивает максимальную твердость технически чистых железа и никеля, сталей 20; 45 путем комбинированного деформирования. Экспериментально исследованы твердость, влияние количества углерода и размера областей когерентного рассеивания на физико-механические свойства Fe, Ni, сталей 20; 45. Выявлена возможность термической стабильности полигонизационной субструктуры в процессе передрекристаллизационной термической обработки после предварительной комбинированной деформации.

Ключевые слова: технически чистое железо; комбинированное деформирование; передрекристаллизационная термическая обработка; субструктурные элементы; твердость.

REFERENCES

- [1] Alymov M. I., Zelenskiy V. A. *Metody polucheniya i fiziko-mekhanicheskiye svoystva obyemnykh nanokristallicheskikh materialov* [Methods of obtaining the bulk nanocrystalline materials and their physical and mechanical properties]. Moscow, MIFI Publ., 2005. 52 p.
- [2] Valiev R. Z., Aleksandrov I. V. *Obyemnyye nanostrukturnyye metallicheskiye materialy: polucheniye, struktura i svoystva* [Bulk nanostructured metallic materials: obtaining, structure and properties]. Moscow, Akademkniga Publ., 2007. 372 p.
- [3] Gorelik S. S., Dobatkin S. V., Kaputkina L. M. *Rekristallizatsiya metallov i spлавov* [Recrystallization of metals and alloys]. Moscow, MISIS Publ., 2005. 432 p.
- [4] Dubovyi O. M., Kulik S. H., Zhdanov O. O., Bobrov M. M., Myrko O. I. *Vplyv deformatsii ta lehuyuchykh elementiv na tverdist stalei i napylenykh pokryttiv pislia peredrekrystalizatsiinoi termichnoi obrobky* [Influence of deformation and alloying elements on the hardness of steel and sprayed coatings after the pre-recrystallization heat treatment]. *Zb. nauk. prats NUK — Collection of scientific publications of NUOS*, Mykolaiv, NUOS Publ., 2011, issue 2, pp. 36–44.
- [5] Dubovyi O. M., Lebedeva N. Yu., Yankovets T. A. *Vplyv peredrekrystalizatsiinoi termichnoi obrobky na fizyko-mekhanichni vlastyivosti napylenykh pokryttiv ta deformovanykh metaliv ta splaviv* [Influence of the pre-recrystallization heat treatment on the physical and mechanical properties of sprayed coatings and deformed metals and alloys]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv* [Metallurgy and metal processing]. 2010, no. 3, pp. 7–10.
- [6] Dubovyi O. M., Yankovets T. A., Shkurat S. I., Zhdanov O. O. *Doslidzhennia mozhlyvostei pidvyshchennia fizyko-mekhanichnykh vlastyivostei napylenykh pokryttiv* [Study of the opportunities of improving the physical and mechanical properties of sprayed coatings]. *Elektronnyi visnyk NUK* [Electronic Bulletin of NUOS]. Mykolaiv, 2010, no. 2. Available at: <http://evn.nuos.edu.ua/article/view/24689/22163>.
- [7] Dubovyi O. M., Bondarenko O. V., Zhdanov O. O., Zhyzhko O. V., Bobrov M. M., Halkina T. S. *Vplyv peredrekrystalizatsiinoi termichnoi obrobky na substukturu i tverdist deformovanykh koliorovykh metaliv i splaviv ta napylenykh pokryttiv* [Influence of the pre-recrystallization heat treatment on the substructure and hardness of deformed nonferrous metals, alloys and sprayed coatings]. *Obrobka materialiv u mashynobuduvanni* [Materials treatment in mechanical engineering]. Mykolaiv, NUOS Publ., 2012, pp. 69–79.
- [8] Dubovyi O. M., Chechel O. V., Zhdanov O. O. *Matematychni modeliuvannia rezhymu peredrekrystalizatsiinoi termichnoi obrobky tekhnichno chystoho zaliza* [Mathematical modeling of the pre-recrystallization heat treatment regime of technically pure iron]. *Elektronnaya mikroskopiya i prochnost materialov, Trudy Instituta problem materialovedeniya im. I. N. Frantsevicha NAN Ukrainy* [Electron microscopy and strength of materials, Proceedings of the Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NASU of Ukraine]. Kyiv, 2014, pp. 76–81.
- [9] Dubovyi O. M., Lyu Shen, Zhdanov O. O. *Stabilizatsiya zdribненоi poligonizatsiynoi substrukтури stali 12Kh18N10T pislia peredrekrystalizatsiinoi termichnoi obrobky* [Stabilization of the crushed polygonization

substructure of the 12Cr18BNi10C steel after the pre-recrystallization heat treatment]. *Zb. nauk. prats NUK — Collection of scientific publications of NUOS*. Mykolaiv, NUOS Publ., 2015, issue 2, pp. 45–50.

- [10] Zhdanov O. O. *Zakonomirnosti vplyvu peredrekrystalizatsiinoi termichnoi obrobky na fizyko-mekhanichni vlastyvosti deformovanykh stalei*. Avtoreferat Diss. [Patterns of the influence of the pre-recrystallization heat treatment on the physical and mechanical properties of deformed steel]. Kherson, 2015. 24 p.
- [11] Kononov A. V., Smirnov A. S. *Vlianiye dinamicheskogo deformatsionnogo stareniya splava AMg6 na soprotivleniye deformatsii* [Influence of the dynamic strain aging of the AMg6 alloy on the resistance to deformation]. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike* [Physical and chemical kinetics in gas dynamics]. Available at: http://chemphys.edu.ru/media/published/012_S7AaFz5.pdf.
- [12] Dubovyi O. M., Yankovts T. A., Lebedeva N. Yu., Kazymyrenko Yu. O., Zhdanov O. O., Bobrov M. M. *Sposib deformatsiino-termichnoi obrobky metaliv ta splaviv* [Method of the deformation and heat treatment of metals and alloys]. Patent UA 95378 no. a 2011 20102248, 2011.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Проблемою сучасного машинобудування є підвищення надійності й ресурсу роботи деталей машин і механізмів. Це вимагає постійного їхнього вдосконалення, застосування нових матеріалів. Експлуатаційні характеристики деталей машин, загалом їх ресурс роботи визначаються переважно фізико-механічними властивостями металів і сплавів, з яких вони виготовляються. Для вирішення цієї проблеми використовують здебільшого сталі й сплави з підвищеними показниками міцності, зокрема твердості. Посилення фізико-механічних показників можливе за рахунок передрекристиалізаційної термічної обробки, яка забезпечує формування здрібненої субструктури і наноструктури включно. Для розв'язання цього питання запропоновано спосіб деформаційної й термічної обробки металів і сплавів, що включає попередню деформацію металу або сплаву з наступною термічною обробкою. Метали або сплави деформують зі ступенем обтискування більше 70% за температури навколишнього середовища, нагрівають до температури початку рекристиалізації, витримують протягом 0,5...10 хв. з наступним охолодженням до температури навколишнього середовища зі швидкістю, яка не викликає росту рекристиалізаційних зерен [12]. Однак цей спосіб має недолік, пов'язаний з малим часом витримки (до 10 хв.), під час якого забезпечуються максимальні значення твердості матеріалу, що ускладнює, а в деяких випадках й унеможлиблює його застосування, особливо для масивних деталей.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В останні роки досягнуто значних успіхів у створенні наноструктурних матеріалів. Особливу увагу приділяють методам інтенсивної пластичної деформації (ПД). Ця група методів отримання матеріалів базується на проведенні великоступеневої пластичної деформації при високих прикладених тисків за відносно низьких температур [2]. У таких умовах деформування відбувається подрібнення мікроструктурних елементів у металах і сплавах до наномасштабного

розміру. Методи ПД дозволяють одержувати об'ємні безпористі металеві наноструктурні матеріали. Однак діапазон розмірів субзерен наноматеріалів, як правило, складає більше 100 нм. Структура, отримана під час ПД, відрізняється великою нерівноважністю через малу щільність вільних дислокацій і переважно висококутового характеру границь субзерен [1].

Через те, що методи ПД характеризуються високою вартістю, трудомісткістю й складністю обладнання й придатні тільки для деталей малого перерізу (до 10 мм), то одним із напрямів вирішення цієї проблеми може стати застосування передрекристиалізаційної термічної обробки матеріалів, сутність якої полягає у фіксації полігонізаційної субструктури охолодженням матеріалу покриття на етапі формування субзерен наномасштабного розміру [2]. Як було встановлено в роботах [4, 12], передрекристиалізаційна термічна обробка деформованих зразків на 75% зі сталі У8 і технічно чистого заліза за температури, яка відповідає температурному порогу рекристиалізації, призводить до посилення твердості за рахунок формування здрібненої полігонізаційної субструктури, максимальне значення якої спостерігається під час тривалості витримки 2 хв. Фізико-механічні властивості змінюються, наприклад, твердість зменшується в разі нарощування часу витримки через збільшення розміру субзерен, що свідчить про нестабільність субструктури за підвищеної температури.

МЕТА РОБОТИ — установити термічну стабільність полігонізаційної субструктури, яка забезпечує максимальну твердість технічно чистих заліза, нікелю та сталей 20; 45 шляхом комбінованої деформації.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Оскільки залізо є основою сталей і чавунів, які на сьогодні складають приблизно 90% з усіх конструкційних матеріалів, що застосовують у техніці й побуті, в подальших дослідженнях застосовували технічно чисте залізо марки Э12 (ГОСТ 3836-83). Для порівняння впливу типу кристалічних ґраток (ОЦК і ГЦК) на ефект підвищення фізико-механічних

властивостей обрано технічно чистий нікель Н1У (ГОСТ 849-97). Відпалені за температури 800 °С протягом 1 год. зразки із заліза розміром 6×6×8 мм і з нікелю — 4×10×10 мм піддавали холодній і гарячій динамічній деформації. Динамічну деформацію проводили шляхом ударної циклічної дії до заданої величини цього процесу. Після охолодження зразків до кімнатної температури виконували статичну деформацію за допомогою гідравлічного пресу LosenHousenWLRK (Dusseldorf, 35 т) з навантаженням 20 т. Термічну обробку зразків здійснювали в лабораторній електричній печі СНОЛ-1.6.2.0.08/9-М1. Твердість HV_5 визначали на приладі типу «Віккерс» у разі навантаження на індентор 5 кг (ДСТУ ISO 6507-4:2008), для кожної експериментальної точки проводили 10 вимірів. Аналіз структури деформованих і термооброблених зразків виконували за допомогою оптичного металографічного мікроскопу. Знімки мікроструктур отримували на оптичному металографічному мікроскопі ММУ-3 за допомогою цифрової камери *DeltaOpticalHDCE-20C*, що укомплектована програмним забезпеченням для обробки зображень *ScopelImage 9.0*, та сканувального електронного мікроскопу ZEISS GeminiSEM 500. Розмір областей когерентного розсіювання рентгенівських променів (ОКР) визначали за формулою Шеррера. Зйомку дифрактограм проводили за відображенням [110] на приладі ДРОН-3.0.

Твердість зразків після відпалу складала: технічно чистого заліза — 1,11 ГПа, технічно чистого нікелю — 0,79 ГПа.

Спочатку здійснювали холодну динамічну деформацію на 30%, потім — статичну деформацію на 30%, далі навпаки, спочатку — гарячу динамічну деформацію зразків на 30%, після чого — статичну деформацію на 30%. Гарячу динамічну деформацію проводили за температури зразків 880 °С. Сумарна величина деформації в обох випадках дорівнювала 60%. Для порівняння виконали статичну деформацію на 60%. Значення твердості зразків після деформації наведено в табл. 1.

Аналіз даних показує, що твердість після холодної динамічної деформації більша, ніж після гарячої динамічної деформації на 21% для технічно чистого

заліза і на 35% для технічно чистого нікелю. Проте значення твердості після додаткової статичної деформації в обох випадках майже однакові, перебувають в межах 5-відсоткової похибки.

За великих ступенів деформації виникає переважна орієнтація кристалографічних площин і напрямів у зернах. Як приклад на рис. 1 показано мікроструктуру технічно чистого заліза після холодної динамічної й наступної статичної деформації.

З рис. 1 видно, що в деформованому технічно чистому залізі спостерігається текстура деформації, яка пов'язана зі збільшенням дефектів кристалічної будови й пояснює підвищення твердості після деформації відносно відпаленого стану.

Отримані зразки після комбінованого деформування нагрівали в печі до температури початку первинної рекристалізації: технічно чисте залізо — 500 °С, а нікель — 480 °С [6, 8]. Результати дослідження впливу тривалості витримки на твердість представлено на рис. 2.

Дані рис. 2, а свідчать про термічну стабілізацію полігонізаційної субструктури, оскільки твердість залишається на одному рівні: для технічно чистого заліза за витримки від 20 хв. до 70 хв.; для технічно чистого нікелю — від 10 до 60 хв.

З рис. 2, б випливає, що стабілізація субструктури відбувається лише для нікелю в межах від 5 хв. до 25 хв. Твердість для обох дослідів знижується порівняно з максимальною, але залишається суттєво вищою, ніж після деформації. Стабілізація субструктури здійснюється за рахунок додаткової деформації матеріалу, що проводили до передрекристалізаційної термічної обробки. Вона сприяє гальмуванню дислокацій шляхом утворення дислокаційних перехрещень (потрійних вузлів) [11].

Максимальна твердість статично деформованого на 60% зразка технічно чистого заліза після передрекристалізаційної термічної обробки (температура — 500 °С, тривалість витримки — 1,5 хв.) становить 2,47 ГПа, що на 15% більше максимальної твердості зразка термообробленого стану після комбінованої (холодної динамічної й наступної статичної) деформації (див. табл. 1, дослід 3).

Таблиця 1. Залежність значень твердості технічно чистих заліза й нікелю від величини й виду деформації

Номер дослідів	Деформація	Твердість, ГПа	
		технічно чисте залізо	технічно чистий нікель
1	Холодна динамічна деформація на 30%	1,65	1,54
	Холодна динамічна деформація на 30% + статична деформація на 30%	2,02	1,86
2	Гаряча динамічна деформація на 30%	1,29	1,00
	Гаряча динамічна деформація на 30% + статична деформація на 30%	2,06	1,92
3	Статична деформація на 60%	2,20	1,34

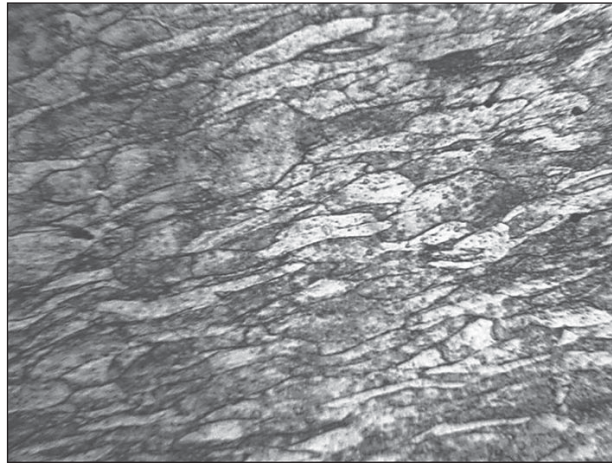
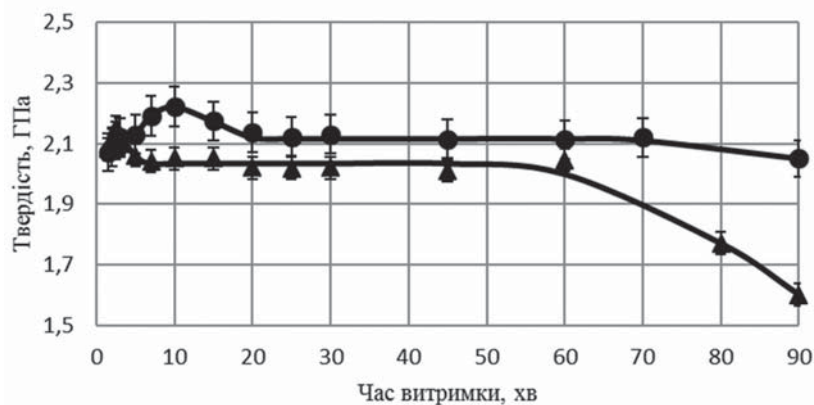
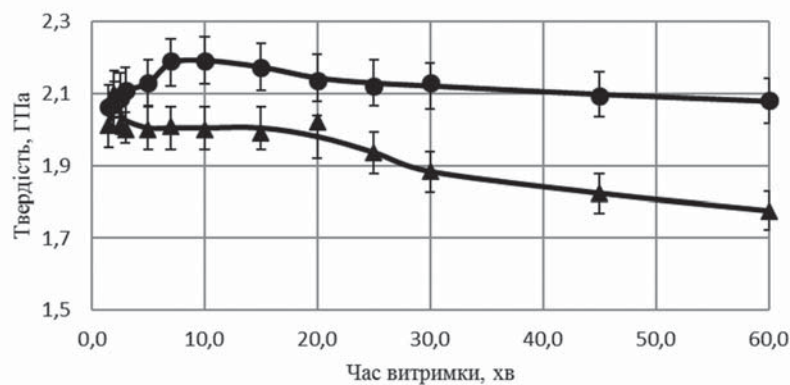


Рис. 1. Фотографія мікроструктури технічно чистого заліза після холодної динамічної та наступної статичної деформації, $\times 250$



а)



б)

Рис. 2. Залежність твердості від тривалості витримки за передрекristалізаційної термічної обробки деформованих зразків:

а) дослід 1; б) дослід 2:

● — технічно чисте залізо; ▲ — технічно чистий нікель

Для визначення впливу збільшення величини деформації зробили дослід 4: проведено холодну динамічну деформацію технічно чистого заліза на 40% й наступну статичну деформацію на 40%. Твердість деформованого зразка склала 2,10 ГПа. Після ком-

бінованої деформації здійснювали передрекristалізаційну термічну обробку за температури 500 °С. На рис. 3 відображено залежність твердості від часу витримки за передрекristалізаційної термічної обробки.

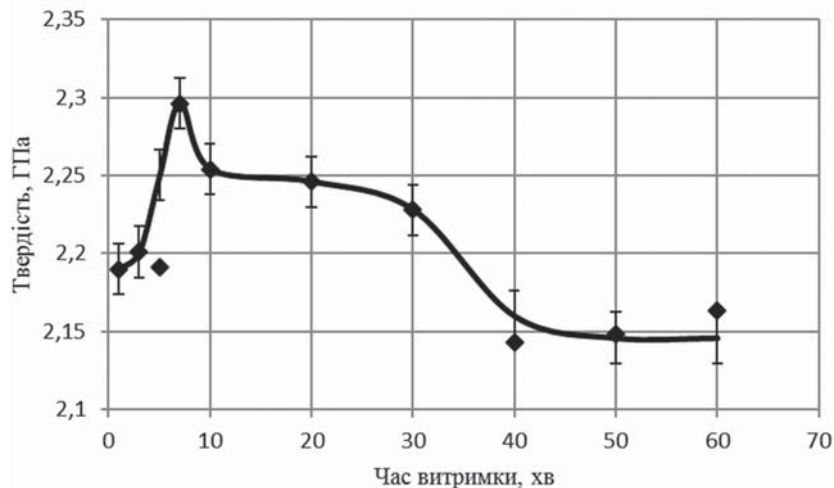


Рис. 3. Залежність твердості технічно чистого заліза від тривалості витримки за передрекристалізаційної термічної (дослід 4)

З рис. 3 випливає, що стабілізація субструктури спостерігається в межах від 10 хв. до 30 хв.

Максимальна твердість статично деформованого на 80% зразка технічно чистого заліза після передрекристалізаційної термічної обробки (температура — 500 °С, тривалість витримки — 0,5 хв) дорівнює 3,05 ГПа, що на 25% більше максимальної твердості зразка термообробленого стану після холодної динамічної й наступної статичної деформації. Комбінування шляхом статичного, потім холодного динамічного деформування не спричиняє подібної стабілізації.

Для дослідження впливу вуглецю на субструктуру й твердість після передрекристалізаційної термічної обробки проведено аналогічне дослідження для сталей 20 і 45. Попередньо здійснювали відпал зразків за температури 800 °С протягом 1 год. Далі їх динамічно деформували на 30%, після чого статично деформували на 30% і піддавали наступній передрекристалізаційній термічній обробці за температури 500 °С [4]. Результати дослідження наведено на рис. 4.

З рис. 4 видно, що збільшення концентрації вуглецю сприяє підвищенню твердості. Чим більше вуглецю, тим більше в сталі твердого цементиту, що зумовлює зростання твердості. Тривалість витримки для отримання максимальних показників твердості скорочується. Крім цього, підвищення термічної стабільності полігонізаційної субструктури технічно чистого заліза, сталей 20 і 45 можливе комбінуванням динамічної й статичної деформації сумарно на 60% і за наступної передрекристалізаційної термічної обробки відповідно до 20...70 хв., 10...60 хв., 5...60 хв.

Визначено приріст значень твердості зразків технічно чистого заліза, сталей 20 і 45, результати наведено на рис. 5.

З рис. 5 випливає, що твердість після деформування й тривалої витримки за передрекристалізаційної термічної обробки дещо зменшується порівняно з максимальними значеннями твердості, але все ще суттєво вища, ніж після деформації. Особливо значний приріст після витримки 60 хв спостерігається у сталей 20; 45.

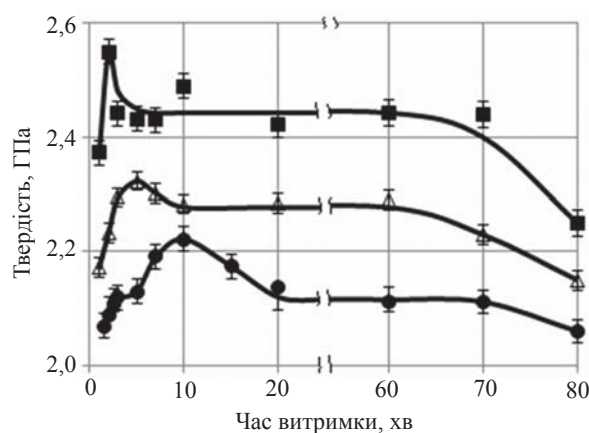


Рис. 4. Залежність твердості технічно чистого заліза, сталей 20 і 45 від тривалості витримки передрекристалізаційної термічної обробки:

● — технічно чисте залізо; △ — сталь 20; ■ — сталь 45

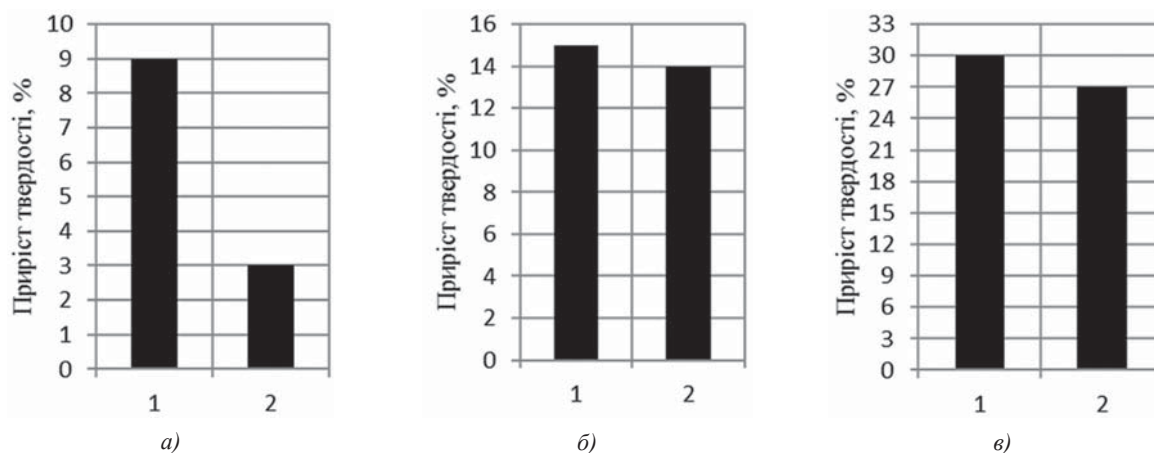


Рис. 5. Значення приросту твердості зразків відносно комбіновано деформованого стану:

а) технічно чисте залізо; б) сталь 20; в) сталь 45:

1 — після комбінованої деформації та термічної обробки (максимальне значення твердості); 2 — після комбінованої деформації та термічної обробки протягом 60 хв

Таким чином, комбінована деформація зразків, яка полягає в попередній холодній динамічній деформації й наступній статичній деформації, ймовірно, сприяє утворенню середньокуткових субграниць. Очевидно, що додаткова статична деформація збільшує кількість структурних недосконалостей у вигляді дислокаційних перехрещень.

Відомо, наприклад [5], що рух дислокацій перешкоджають границі субзерен, частинки іншої фази, концентраційні неоднорідності, структурні недосконалості (дислокації), флуктуації в ґратці, пов'язані з нерівномірним розподілом енергії й домішок.

Дислокації, які були введені за деформації, блокуються домішковими атомами, тому під час наступного навантаження ці дислокації не братимуть участі в ковзанні; вони гальмують новоутворені дислокації або частини дислокацій, які розблоковуються після деформаційного навантаження [7]. Атоми проникнення в металах з ОЦК-ґратками викликають більшу тетрагональність і призводять до різкого підвищення міцності.

Отже, стабілізація субструктури технічно чистих заліза, нікелю й вуглецевих сталей полягає в зменшен-

ні рухомості границь субзерен за рахунок утворення потрійних вузлів (перехрещень) дислокацій і гальмування дислокацій домішковими атомами, переважно тими, що розчинені шляхом проникнення (у технічно чистому залізі — 0,009% С, у технічно чистому нікелі — 0,01% С).

Падіння твердості в разі використання гарячої динамічної деформації й наступної передрекристалізаційної термічної обробки більш значне, ніж під час застосування холодної динамічної деформації, що, очевидно, пов'язано з протіканням процесів динамічної полігонізації.

Аналіз структури, який здійснювали на оптичному металографічному мікроскопі показав, що структура всіх зразків після передрекристалізаційної термічної обробки не змінювалась порівняно з деформованим станом. Зображення субструктури технічно чистого заліза, отримані за допомогою сканувального електронного мікроскопу, наведено на рис. 6.

Рис. 6 показує, що відбувається здрібнення субструктурних елементів після передрекристалізаційної термічної обробки щодо деформованого стану,

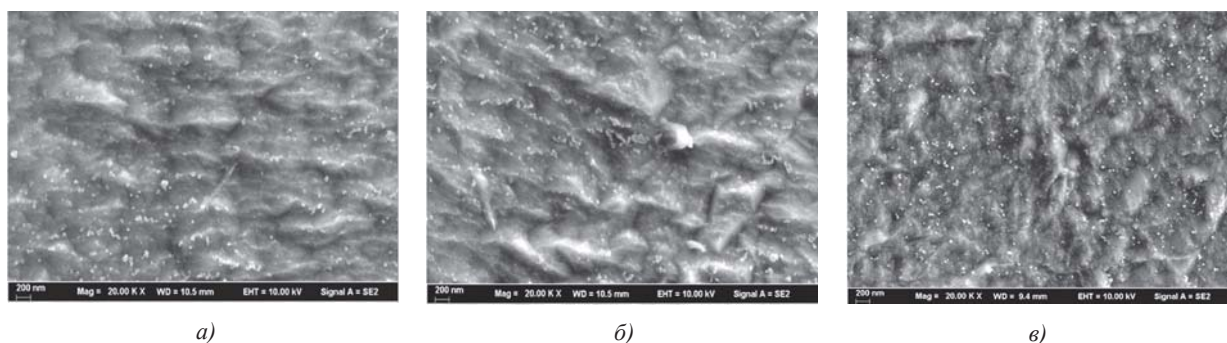


Рис. 6. Субструктура технічно чистого заліза:

а — після комбінованого деформування; б — після комбінованого деформування та термічної обробки (10 хв.); в — після комбінованого деформування та термічної обробки (60 хв.)

що підтверджують визначені розміри ОКР методами рентгеноструктурного аналізу (див. табл. 2), згідно з якими відбувається їхнє зменшення після передрекристалізаційної термічної обробки відносно деформованого стану. Це є прямим доказом здрібнення субструктури пластично деформованого технічно чистого заліза в процесі передрекристалізаційної термічної обробки.

Наступним етапом експерименту став аналіз впливу величини субструктурних елементів у технічно чистому залізі й вуглецевих сталях на твердість за оцінкою розмірів областей когерентного розсіювання, які визначали на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3 у випромінюванні міді $Mo_{K_{\alpha}}$ ($\lambda = 0,071069$ нм). Оскільки ОКР відповідає внутрішній впорядкованій області субзерна і до його складу не входять спотворені границі, розмір ОКР ототожнюють із середнім розміром субзерен. Результати досліджень наведено в табл. 2.

З табл. 2 випливає, що розмір ОКР технічно чистого заліза, сталей 20; 45 після передрекристалізаційної термічної обробки, яка забезпечує максимальну твердість, зменшується порівняно зі станом після деформації й набуває практично наномасштабного розміру. Після комбінованої деформації в процесі передрекристалізаційної термічної обробки відбувається більш інтенсивне зростання субзерен. Неоднорідність деформації (особливо для вуглецевих сталей) призводить до неоднорідності здрібнення субструктурних елементів, у результаті чого зменшується приріст твердості після передрекристалізаційної термічної обробки комбіновано деформованих зразків.

ВИСНОВКИ. 1. Встановлено можливість термічної стабілізації полігонізаційної субструктури в процесі передрекристалізаційної термічної обробки технічно чистих заліза й нікелю впродовж 20...70 хв.

Таблиця 2. Вплив комбінованого деформування (сумарно на 60%) на ОКР після передрекристалізаційної термічної обробки технічно чистого заліза та вуглецевих сталей

Матеріал	Тривалість витримки, хв	Розмір ОКР, нм	Твердість, ГПа
Технічно чисте залізо	—	186/148	1,65
	10	125/110	2,22
	60	175/172	2,11
Сталь 20	—	143	1,96
	5	119	2,32
	60	187	2,29
Сталь 45	—	110	2,23
	2	80	2,55
	60	179	2,44

Примітка. Через / вказано середній розмір субзерен, визначений за мікроструктурами, рис. 6.

і 10...60 хв. відповідно, який полягає в проведенні холодної динамічної деформації й наступної статичної деформації й передрекристалізаційної термічної обробки. 2. З'ясовано, що підвищення термічної стабільності полігонізаційної субструктури сталей 20 і 45 можливе комбінуванням динамічної й статичної деформації сумарно на 60% і наступною передрекристалізаційною термічною обробкою відповідно в межах до 10...60 хв. і 5...60 хв., при цьому твердість дещо зменшується, але залишається вищою порівняно зі станом після деформації на 14 і 27% відповідно. 3. Доведено, що підвищення твердості технічно чистого заліза й вуглецевих сталей порівняно з комбіновано деформованим станом за тривалою витримки до 60...70 хв, забезпечує здрібнену субструктуру, розмір ОКР якої становить менше 187 нм.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Алымов М. И. Методы получения и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов [Текст] / М. И. Алымов, В. А. Зеленский. — М. : МИФИ, 2005. — 52 с.
- [2] Валиев Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы. Получение, структура и свойства [Текст] / Р. З. Валиев, И. В. Александров. — М. : Академкнига, 2007. — 398 с.
- [3] Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов [Текст] / С. С. Горелик, С. В. Добаткин, Л. М. Капуткина. — М. : МИСИС, 2005. — 432 с.
- [4] Дубовий О. М. Вплив деформації та легуючих елементів на твердість сталей і напилених покриттів після передрекристалізаційної термічної обробки [Текст] / О. М. Дубовий, С. Г. Кулік, О. О. Жданов, М. М. Бобров, О. І. Мирко // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2011. — № 2. — С. 36–44.
- [5] Дубовий О. М. Вплив передрекристалізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості напилених покриттів та деформованих металів та сплавів [Текст] / О. М. Дубовий, Н. Ю. Лебедева, Т. А. Янковець // Металознавство та обробка металів, 2010. — № 3. — С. 7–10.
- [6] Дубовий О. М. Дослідження можливостей підвищення фізико-механічних властивостей напилених покриттів [Електронний ресурс] / О. М. Дубовий, Т. А. Янковець, С. І. Шкурат, О. О. Жданов // Електронний вісник НУК, 2010. — № 2. — Режим доступу: <http://evn.nuos.edu.ua/article/view/24689/22163>.
- [7] Дубовий О. М. Дослідження можливостей підвищення фізико-механічних властивостей деформованих металів і сплавів термічною обробкою [Текст] / О. М. Дубовий, О. В. Бондаренко, О. О. Жданов, О. В. Жижко, М. М. Бобров, Т. С. Галкіна // Обробка матеріалів у машинобудуванні. — Миколаїв : НУК, 2010. — С. 69–79.

- [8] **Дубовий О. М.** Математичне моделювання режиму передрекристалізаційної термічної обробки технічно чистого заліза [Текст] / О. М. Дубовий, О. В. Чечель, О. О. Жданов // *Электронная микроскопия и прочность материалов, Труды института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины*. — К. : 2014. — С. 76–81.
- [9] **Дубовий О. М.** Стабілізація здрібненої полігонізаційної субструктури сталі 12Х18Н10Т після передрекристалізаційної термічної обробки [Текст] / О. М. Дубовий, Лю Шен, О. О. Жданов // *Зб. наук. праць НУК*. — Миколаїв : НУК, 2015. — № 2 (458). — С. 45–50.
- [10] **Жданов О. О.** Закономірності впливу передрекристалізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості деформованих сталей : автореф. дис. на здобуття наук.ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.01 — «Матеріалознавство» / Жданов Олександр Олександрович. — Херсон, 2015. — 24 с.
- [11] **Коновалов А. В.** Влияние динамического деформационного старения сплава АМгб на сопротивление деформации [Электронный ресурс] / А. В. Коновалов, А. С. Смирнов // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. — Режим доступа: http://chemphys.edu.ru/media/published/012_S7AaFz5.pdf.
- [12] Пат. 95378 Україна МПК (2009) C21D8/00, C22F 1/00. Спосіб деформаційно-термічної обробки металів та сплавів [Текст] / 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.

© О. М. Дубовий, Лю Шен, Т. О. Макруха

Надійшла до редколегії 16.01.2017

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК

д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницький