

DOI 10.15589/jnn20150207

УДК.621.78

Д79

STABILIZATION OF MILLED POLYGONIZATIONAL 12Cr18Ni10Ti STEEL SUBSTRUCTURE AFTER PRE-RECRYSTALLIZATIONAL HEAT TREATMENT

СТАБІЛІЗАЦІЯ ЗДРІБНЕНОЇ ПОЛІГОНІЗАЦІЙНОЇ СУБСТРУКТУРИ СТАЛІ 12Х18Н10Т ПІСЛЯ ПЕРЕДРЕКРИСТАЛІЗАЦІЙНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Oleksandr M. Dubovyj

oleksandr.dubovyj@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-2843-1879

Lyu Shen

lusheng119@yahoo.com.cn

ORCID: 0000-0001-7695-8547

Oleksandr O. Zhdanov

oleksandr.zhdanov@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0003-1967-7233

О. М. Дубовий,д-р техн. наук, проф.¹**Лю Шен,**проф.²**О. О. Жданов**провідний фахівець¹¹*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*²*Jiangsu University of Science and Technology*¹*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*²*Університет науки і техніки провінції Цзянсу*

Abstract. The possibility of the stabilization of milled polygonizational 12Cr18Ni10Ti steel substructure after pre-recrystallizational heat treatment has been studied in the article. It is determined that the repeated plastic deformation at 52 % of 12Cr18Ni10Ti steel causes the formation of oriented austenitic-ferritic structure due to the shear bands, with clear dislocation interlacements that form a cellular substructure, and dislocation density $\rho \sim 2,1 \times 10^{11}$. The repeated pre-recrystallizational heat treatment of previously twice deformed 12Cr18Ni10Ti steel at the temperature of 600 °C for 2 minutes leads to the formation of a subgrain structure. Each crystal is divided at the middle by longitudinal boundaries which, in their turn, are divided by transverse boundaries into nanosized crystallites, the amount of which is 16%. The dislocation density reduces to $\rho \sim 1,8 \times 10^{11}$. It is experimentally confirmed that the repeated plastic deformation causes the stabilization of milled polygonizational 12Cr18Ni10Ti steel substructure after pre-recrystallizational heat treatment at the temperature of 600 °C due to the formation of fixed dislocation connections that block the growth of subgrains at reheating. This allows increasing the exposure time at pre recrystallizational heat treatment of 12Cr18Ni10Ti steel to 20 minutes, and, as a result, enables a wider commercial use of this type of strengthening heat treatment of steel articles obtained by deformation.

Keywords: polygonizational substructure; plastic deformation; dislocation density; pre recrystallizational heat treatment.

Анотація. Досліджено можливість стабілізації здрібненої полігонізаційної субструктури сталі 12Х18Н10Т після передрекристиалізаційної термічної обробки. Встановлено, що повторна пластична деформація сталі після передрекристиалізаційної термічної обробки дозволяє збільшити час витримки до 20 хвилин за рахунок формування нерухомих дислокаційних з'єднань, що блокують зростання субзерен за повторного нагрівання.

Ключові слова: полігонізаційна субструктура; пластична деформація; щільність дислокацій.

Аннотация. Исследована возможность стабилизации измельченной полигонизационной субструктуры стали 12Х18Н10Т после передрекристиаллизационной термической обработки. Установлено, что повторная пластическая деформация стали после передрекристиаллизационной термической обработки позволяет увеличить время выдержки до 20 минут за счет формирования неподвижных дислокационных сплетений, блокирующих рост субзерен при повторном нагревании.

Ключевые слова: полигонизационная субструктура; пластическая деформация; плотность дислокаций.

REFERENCES

- [1] Chuvildeev V.N., Nokhrin A.V., Kopylov V.I. et al. Anomalnyy rost zeren v nano- i mikrokristallicheskih metallov, poluchennykh metodami RKU-pressovaniya. Chast I-II [Abnormal grain growth in nano- and microcrystal metals obtained by equal channel angular extrusion]. *Materialovedenie — Metal Science*, 2003, no. 4 pp. 9–18, no. 5, pp.12–23.
- [2] Golosova T.N., Lychagin A.D., Starenchenko V.A. Aktivizatsiya skolzheniya dislokatsiy pri izmenenii osi deformatsii v GTsK-monokristallakh [Activation of dislocation slip when changing the axis of deformation in FCC single crystals]. *Fundamentalnye problemy sovremennogo materialovedeniya — Basic Problems of Material Science*, 2008, no. 3, pp. 38–42.
- [3] Gorelik S.S., Dobatkina S.V., Kaputkina L.M. *Rekristallizatsiya metallov i splavov 3-e izd.* [Recrystallization of metals and alloys 3rd edition]. Moscow, MISIS Publ., 2005. 432 p.
- [4] Gorelik S.S. *Rentgenograficheskiy i elektronnoopticheskiy analiz* [Radiographic and electron-optical analysis]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 336 p.
- [5] Dubovyi O.M., Kulik S.H., Zhdanov O.O., Bobrov M.M., Myrko O.I. Vplyv deformatsii ta lehuiuchykh elementiv na tverdist stalei i napylenykh pokryttiv pislia peredrekristalizatsiinoi termichnoi obrobky [Influence of deformation and alloying elements on the hardness of steels and sprayed coatings after pre-recrystallizational heat treatment]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK* [Collection of Scientific Publications of NUS], 2011, no. 2, pp. 36–44.
- [6] Dubovyi O.M., Lebedeva N.Yu., Yankovets T.A. Vplyv peredrekristalizatsiinoi termichnoi obrobky na fizyko-mekhanichni vlastyvoli napylenykh pokryttiv ta deformovanykh metaliv ta splaviv [Influence of pre-recrystallizational heat treatment on physical and mechanical properties of sprayed coatings and deformed metals and alloys]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv — Metal Science & Treatment of Metals*, 2010, no. 3, pp. 7–10.
- [7] Dubovyi O.M., Lebedeva N.Yu., Yankovets T.A., Karpechenko A.A., Zhdanov O.O. Doslidzhennia mozhlyvosti pidvyshchennia fizyko-mekhanichnykh vlastyvolei deformovanykh metaliv i splaviv termichnoiu obrobkoiu [Study of the possibilities of the improvement of physical and mechanical properties of metals and alloys deformed by heat treatment]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK* [Collection of Scientific Publications of NUS], 2010, no. 3, issue 432, pp. 69–79.
- [8] Dubovyi O.M., Karpechenko A.A., Yankovets T.A., Zhdanov O.O. *Sposib nanesennia pokryttiv* [Method of coating] Patent UA, no. 88755, 2009.
- [9] Dubovyi O.M., Yankovets T.A., Lebedeva N.Yu., Kazymyrenko Yu.O., Zhdanov O.O., Bobrov M.M. *Sposib deformatsiino-termichnoi obrobky metaliv ta splaviv* [Method of deformation and heat treatment of metals and alloys] Patent UA, no. 95378, 2010.
- [10] Dubovyi O.M., Karpechenko A.A., Yankovets T.A., Zhdanov O.O. *Sposib nanesennia elektroduhovyykh pokryttiv* [Method of electric-arc coating] Patent UA, no. 43984, 2009.
- [11] Starenchenko V.A., Lychagin D.V., Shaekhov R.V. Vliyanie temperatury ispytaniya na evolyutsiyu dislokatsionnoy struktury monokristallov nikelya s orientatsiyei osi szhatiya [001] [Influence of testing temperature on the evolution of the dislocation structure of nickel single crystals with compression axis orientation [001]]. *Izvestiya vuzov. Fizika — Russian Physics Journal*, 1999, no. 7, pp. 71–77.
- [12] Nokhrin A.V., Smirnova Ye.S., Chuvildeev V.N., Kopylov V.I. Temperatura nachala rekristallizatsii v mikrokristallicheskih metallakh, poluchennykh metodami intensivnogo plasticheskogo deformirovaniya [Temperature of the beginning of recrystallization in microcrystalline metals obtained by severe plastic deformation]. *Izvestiya RAN. Metally — Bulletin of Russian Academy of Science. Metals*, 2003, no. 3, pp. 27–37.
- [13] Chuvildeev V.N. Mikromekhanizm deformatsionno-stimulirovannoy zernogranichnoy samodiffuzii [Micro-mechanism of strain-enhanced grain-boundary self-diffusion]. *Fizika metallov i metallovedenie — The Physics of Metals and Metallography*, 1996, no. 5, pp. 5–13.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Проблема надійності й довговічності є однією з основних, що визначає ефективність роботи будь-якого виробництва. Втрата ресурсу праці обладнання через його відмову призводить до простоїв, значних витрат на ремонт і запасні частини, що є великою проблемою в умовах сучасного економічного розвитку.

Сучасні методи підвищення показників міцності, зокрема твердості металів і сплавів, мають велике практичне значення у виробництві деталей машин і механізмів, приладів тощо, оскільки забезпечують покращення експлуатаційних показників вузлів й агрегатів, визначають рівень удосконалення виробництва.

Вивчення механізму рекристалізації на різних її стадіях у ряді робіт С.С. Гореліка, М.Л. Бернштейна, В.Д. Садовського, С.С. Дьяченка та ін. авторів сприяло формуванню принципово нового підходу в розумінні природи й властивостей матеріалів. У результаті аналізу сучасних уявлень про механізми полігонізації й рекристалізації в металах і сплавах виявлено, що підвищення фізико-механічних властивостей пластично деформованого металу можна досягти шляхом формування здрібненої полігонізаційної субструктури, але така субструктура не є стабільною за умови підвищених температур і збільшення часу витримки.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ПУБЛІКАЦІЙ І ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботах [5–10] показано можливість підвищення твердості сталей після пластичної деформації завдяки здрібненню субструктури під час передрекристалізаційної термічної обробки, яка полягає в нагріванні до температури початку первинної рекристалізації, короткочасній витримці з наступним охолодженням до температури навколишнього середовища зі швидкістю, яка унеможливує ріст субзерен. Однак збільшення температури або часу витримки призводить до зростання розмірів субзерен за рахунок протікання процесів збиральної полігонізації та рекристалізації. Підвищення температури викликає рух границь субзерен, які утворюються на початковій стадії полігонізації [3], що викликає збільшення розміру субзерен і, як наслідок, зменшення показників твердості.

МЕТА СТАТТІ — дослідження можливості стабілізації здрібненої полігонізаційної субструктури за підвищеної температури, сформованої в пластично деформованій сталі 12X18H10T передрекристалізаційною термічною обробкою.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Зразки корозійностійкої сталі 12X18H10T (ГОСТ 5632-72) у відпаленому стані у вигляді паралелепіпедів 8×10 мм деформували на 60% з використанням пресу P50. Твердість вимірювали на приладі типу Віккерс (ГОСТ 9013), для кожної експериментальної точки використовували 3 паралельних зразки, на кожному з яких проводили 10 вимірів. Передрекристалізаційну термічну обробку здійснювали в електричній печі СНОЛ-1.6.2.0.08/9-М1 згідно з рекомендаціями [5, 9]. Дослідження структури виконували на електронному мікроскопі JEOL ARM200F, крім цього, застосовували рентгеноструктурний аналіз на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3 у випромінюванні міді $Cu_{K\alpha}$ з використанням стандартних методик [4].

Як було встановлено в роботах [5, 9], передрекристалізаційна термічна обробка за 880°C деформованих на 70% зразків зі сталі 12X18H10T призводить

до підвищення твердості за рахунок формування здрібненої полігонізаційної субструктури, максимальне значення якої спостерігається за час витримки 2 хвилини.

З метою дослідження можливості збільшення часу витримки в процесі передрекристалізаційної термічної обробки пластично деформованих сталей шляхом стабілізації здрібненої полігонізаційної субструктури, що дозволить розширити сферу промислового використання передрекристалізаційної термічної обробки як зміцнювальну обробку деформованих сталевих деталей, відпалені зразки корозійностійкої сталі 12X18H10T деформували на 60% (твердість після деформації $HV_5 = 2,4$ ГПа) і піддавали передрекристалізаційній термічній обробці за 880°C (рис. 1 крива 1), після чого зразки повторно деформували на максимально можливий ступінь деформації, який склав 52% (рис. 1 крива 2) і піддавали повторній передрекристалізаційній термічній обробці за 880°C (рис. 1 крива 3).

Згідно з даними, наведеними на рис. 1, повторна пластична деформація призводить до підвищення показників твердості на 38%, отриманих після передрекристалізаційної термічної обробки сталі 12X18H10T, що викликає явищем наклепу. Наступна повторна передрекристалізаційна термічна обробка за 880°C викликає зменшення показників твердості до значень менших, ніж після першої пластичної деформації, що може свідчити про протікання процесу збиральної полігонізації й рекристалізації. Пояснюється це тим, що зі збільшенням ступеня деформації зростають щільність дислокацій і енергія, накопичена при деформації, тобто зростає термодинамічний стимул рекристалізації. Відповідно до [1, 12, 13] дефекти, внесені за повторної деформації в межі зародків, впливають на температуру початку рекристалізації, збільшують вільний об'єм границь зерен і, як наслідок, зменшують енергію активації дифузії. Оскільки температура початку рекристалізації пропорційна активації, то за умови

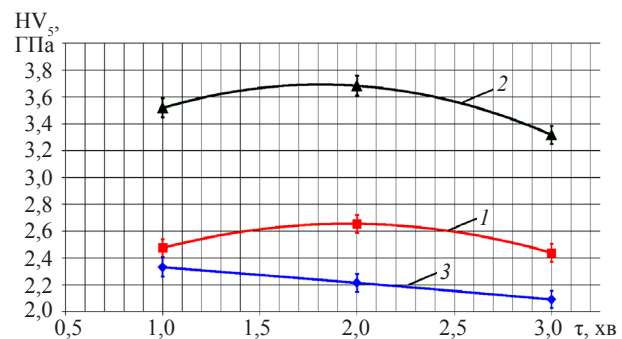


Рис. 1. Значення твердості деформованої на 60% сталі 12X18H10T після передрекристалізаційної термічної обробки за 880°C: 1 — передрекристалізаційна термічна обробка; 2 — повторна пластична деформація на 52%; 3 — повторна передрекристалізаційна термічна обробка

збільшення щільності внесених дефектів час процесу зменшується. Крім того, зі збільшенням ступеня деформації зростає концентрація вакансій, що також сприяє прискоренню процесу зародження й зростання центрів рекристалізації. Враховуючи це, температуру повторної передрекристалізаційної термічної обробки зменшено до 600 °С (рис. 2 крива 3).

Як видно з рис. 2, максимальне значення твердості після повторної передрекристалізаційної термічної обробки за 600 °С сталі 12Х18Н10Т складає 4,12 ГПа і спостерігається під час витримки 2 хвилини, що на 17% більше, ніж значення твердості після повторної пластичної деформації. Подальше збільшення часу витримки до 20 хвилин призводить до поступового зменшення показників твердості, які залишаються вищими, ніж після повторної пластичної деформації.

Такий ефект, ймовірно, можна пояснити таким чином. Одноосьова пластична деформація передбачає накопичення дефектів за одноосьовою схемою навантаження в центральній частині матеріалу і за складною схемою навантаження поблизу пуансонів. За повторної обробки металів тиском змінюється не тільки напрямок осі навантаження в центральній частині зразка, але й розташування області зі схемою

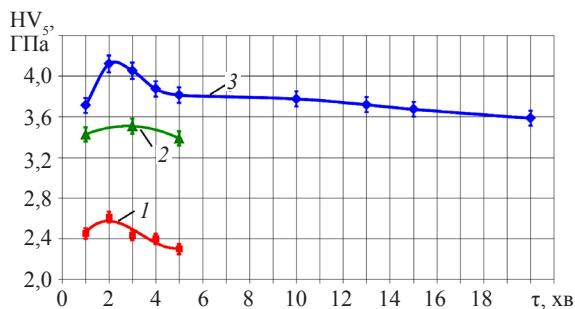


Рис. 2. Значення твердості деформованої на 60% сталі 12Х18Н10Т після передрекристалізаційної термічної обробки: 1 — деформація 60% з наступною передрекристалізаційною термічною обробкою за 880 °С; 2 — повторна пластична деформація на 52%; 3 — повторна передрекристалізаційна термічна обробка за 600 °С

нерівномірного всебічного стиснення, яка переходить з торцевої поверхні на бічну [2]. Для окремо взятого кристала при цьому змінюється кристалографічна вісь навантаження. Під час первинного одноосьового навантаження йде накопичення дислокацій. У процесі подальшого нагрівання дислокаційна структура еволюціонує від хаотичного розподілу дислокацій до клубкової, потім до комірчастої й далі до смугової й фрагментованої субструктури [11]. У роботах [1, 2] та інших показано, що за повторної деформації 25% взаємодій не дають дислокаційних з'єднань, тобто дислокації перетинаються з утворенням порогів і перегинів; 50% дислокаційних взаємодій призводить до утворення бар'єрів Хірта, що лежать уздовж напрямків, перпендикулярних осі деформації кристала; 25% дислокаційних взаємодій — до утворення дислокаційних з'єднань. Останні дислокаційні сполуки є бар'єрами Ломер-Коттрелла, тобто близько 75% дислокаційних взаємодій повторної деформації призводять до утворення нерухомих з'єднань, які блокують зростання зерен за повторного нагрівання, що, в свою чергу, і викликає стабілізуючий ефект. Підтвердженням цього можуть бути результати рентгеноструктурних досліджень зміни субструктури сталі 12Х18Н10Т (табл. 1).

Згідно з даними табл. 1 підвищення твердості пластично деформованої на 60% сталі 12Х18Н10Т в результаті передрекристалізаційної термічної обробки викликане здрібненням субструктури, про що свідчить зменшення розміру областей когерентного розсіювання (ОКР). Щільність дислокацій у сталі 12Х18Н10Т після пластичної деформації на 60% складала $\rho \sim 1,4 \times 10^{11}$ м. Подальша передрекристалізаційна термічна обробка за 880 °С з витримкою 2 хвилини призводить до впорядкування дислокаційної структури, при цьому щільність дислокацій зменшується до $\rho \sim 4,3 \times 10^{10}$ м, що викликано упорядкуванням структури й частковим протіканням релаксаційних процесів під час нагрівання деформованого металу. Повторна пластична деформація на 52% стає причиною подальшого зменшення розміру ОКР і підвищення щільності дислокацій, значення якої стає

Таблиця 1. Залежність параметрів субструктури сталі 12Х18Н10Т від виду обробки

Вид обробки	Параметр ґратки a , нм		ОКР D , нм	ρ , м ⁻²
	α -Fe	γ -Fe		
Деформація 60%	0,2860	0,326	184	$1,4 \times 10^{11}$
Деформація 60% з наступною передрекристалізаційною термічною обробкою за 880 °С з витримкою 2 хв.	0,2865	0,347	144	$4,3 \times 10^{10}$
Деформація 60% з наступною передрекристалізаційною термічною обробкою за 880 °С з витримкою 2 хв. та повторна деформація 52%	0,2832	0,331	121	$2,1 \times 10^{11}$
Деформація 60% з наступною передрекристалізаційною термічною обробкою за 880 °С з витримкою 2 хв. Повторна деформація 52% з повторною передрекристалізаційною термічною обробкою за 600 °С з витримкою 2 хв.	0,2841	0,343	98	$1,8 \times 10^{11}$

більшим, ніж після першої деформації, що пояснюється протіканням процесу наклепу. Повторна передрекристалізаційна термічна обробка за 600 °С викликає зменшення ОКР одночасно зі зменшенням щільності дислокацій, відбувається формування субструктури з елементами в нанорозмірному діапазоні. Мікроструктуру сталі 12X18H10T після повторної пластичної деформації на 52% і наступної передрекристалізаційної термічної обробки за 600 °С наведено на рис. 3.

Після повторної пластичної деформації на 52% в сталі 12X18H10T спостерігається орієнтована аустенитно-феритна структура (рис. 3, а), зумовлена смугами зсуву. Структура має характерну смугасту будову, чітко видно дислокаційні сплетіння, що формують комірчасту субструктуру, щільність дислокацій складає $\rho \sim 2,1 \times 10^{11}$ м. Повторна передрекристалізаційна термічна обробка попередньо двічі деформованої сталі 12X18H10T за температури 600 °С протягом 2 хвилин призвела до формування субзеренної структури (рис. 3, б). Кожен кристал у середньому розбивається поздовжніми границями, котрі, в свою чергу, поперечними границями діляться на нанорозмірні кристаліти, кількість яких знаходиться на рівні 16%. Щільність дислокацій зменшується до $\rho \sim 1,8 \times 10^{11}$ м. Повторна передрекристалізаційна термічна обробка сталі 12X18H10T за температури 600 °С не викликає повного зняття далекодіючих

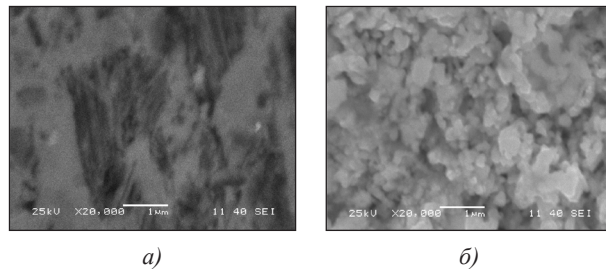


Рис. 3. Мікроструктура сталі 12X18H10T: а — після повторної пластичної деформації на 52%; б — після повторної передрекристалізаційної термічної обробки за 600 °С з витримкою 2 хв.

полів напружень, що формуються в структурі під час повторної пластичної деформації, джерелами яких є границі й стики границь зерен і субзерен.

ВИСНОВКИ. Показано, що повторна пластична деформація викликає стабілізацію здрібненої полігонізаційної субструктури сталі 12X18H10T після передрекристалізаційної термічної обробки за 600 °С за рахунок формування нерухомих дислокаційних з'єднань, що блокують зростання субзерен за повторного нагрівання. Це дозволяє збільшити час витримки в процесі передрекристалізаційної термічної обробки сталі 12X18H10T до 20 хвилин, і, як наслідок, надає можливість більш широкого промислового використання цього виду зміцнювальної термічної обробки сталевих виробів, отриманих методами деформування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Аномальный рост зерен в нано- и микрокристаллических металлов, полученных методами РКУ-прессования [Текст] : Часть I–II / В. Н. Чувильдеев, А. В. Нохрин, В. И. Копылов и др. // *Материаловедение*. — 2003. — № 4. — С. 9–18; 2003. — № 5. — С. 12–23.
- [2] **Голосова, Т. Н.** Активизация скольжения дислокаций при изменении оси деформации в ГЦК-монокристаллах [Текст] / Т. Н. Голосова, А. Д. Лычагин, В. А. Старенченко // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. — 2008. — № 3. — С. 38–42.
- [3] **Горелик, С. С.** Рекристаллизация металлов и сплавов [Текст] / С. С. Горелик, С. В. Добаткина, Л. М. Капуткина. — 3-е изд. — М. : МИСИС, 2005. — 432 с.
- [4] **Горелик, С. С.** Рентгенографический и электроннооптический анализ [Текст] / С. С. Горелик. — М. : Металлургия, 1970. — 336 с.
- [5] **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.
- [6] **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.
- [7] **Дубовий, О. М.** Дослідження можливостей підвищення фізико-механічних властивостей деформованих металів і сплавів термічною обробкою [Текст] / О. М. Дубовий, Н. Ю. Лебедева, Т. А. Янковець, А. А. Карпеченко, О. О. Жданов // *Зб. наук. праць НУК*. — Миколаїв : НУК, 2010. — № 3 (432). — С. 69–79.
- [8] **Пат. а 2009 02658 Україна, МПК С23С 4/18.** Спосіб нанесення покриттів [Текст] / О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, Т. А. Янковець, О. О. Жданов ; заявник та патентовласник Національний університет кораблебудування. — № 88755 ; заявл. 23.03.2009 ; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21. — 6 с.

- [9] Пат. а 2010 02248 Україна, МПК С2Ш 8/00 С22F 1/00. Спосіб деформаційно-термічної обробки металів та сплавів [Текст] / Дубовий О. М., Янковець Т. А., Лебедева Н. Ю., Казимиренко Ю. О., Жданов О. О., Бобров М. М. ; заявник та патентовласник Національний університет кораблебудування. — № 95378; заявл. 01.03.2010 ; опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14. — 6 с.
- [10] Пат. и 2009 03877 Україна, МПК С23С 4/00. Спосіб нанесення електродугових покриттів [Текст] / Дубовий О. М., Карпеченко А. А., Янковець Т. А., Жданов О. О. ; заявник та патентовласник Національний університет кораблебудування. — № 43984 ; заявл. 21.03.2009 ; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 17. — 6 с.
- [11] Старенченко, Д. В. Влияние температуры испытания на эволюцию дислокационной структуры монокристаллов никеля с ориентацией оси сжатия [001] [Текст] / В. А. Старенченко, Д. В. Лычагин, Р. В. Шаехов // Изв. вузов. Физика. — 1999. — № 7. — С. 71–77.
- [12] Температура начала рекристаллизации в микрокристаллических металлах, полученных методами интенсивного пластического деформирования [Текст] / А. В. Нохрин, Е. С. Смирнова, В. Н. Чувильдеев, В. И. Копылов // Известия РАН. Металлы.— № 3. — 2003. — С. 27–37.
- [13] Чувильдеев, В. Н. Микромеханизм деформационно-стимулированной зернограничной самодиффузии [Текст] / В. Н. Чувильдеев // Физика металлов и металловедение. — 1996. — № 5. — С. 5–13.

© О. М. Дубовий, Лю Шен, О. О. Жданов

Надійшла до редколегії 09.02.2015

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницький