

## ВПЛИВ КОМБІНОВАНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ТА ПЕРЕДРЕКРИСТАЛІЗАЦІЙНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СУБСТРУКТУРУ І ТВЕРДІСТЬ СТАЛЕЙ 40X ТА 12X13

Дубовий О.М., Макруха Т.О.,

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова

*Анотація.* В роботі досліджено вплив деформації та наступної передрекристалізаційної термічної обробки на субструктуру і твердість конструкційних легованих сталей 40X та 12X13. Встановлено можливість отримання термічної стабілізації полігонізаційної субструктури комбіновано деформованих сталей.

*Ключові слова:* комбіноване деформування, передрекристалізаційна термічна обробка, термічна стабілізація, полігонізаційна субструктура, леговані сталі.

### Вступ

Рівень розвитку машинобудування XXI століття характеризується підвищеною інтенсивністю режимів експлуатації машин і механізмів. Ускладнення умов експлуатації вузлів і агрегатів вимагає постійного вдосконалення матеріалів та технологій їх виготовлення із забезпеченням достатньої надійності та довговічності. Експлуатаційні характеристики деталей і приладів, а також ресурс їх роботи визначаються переважно фізико-механічними властивостями їх робочої поверхні. Вимоги щодо створення машин і механізмів з підвищеними властивостями можливо задовольнити не тільки розробкою сучасних конструкційних рішень і застосуванням нових матеріалів, але і за рахунок зміни субструктури існуючих матеріалів шляхом удосконалення технологічного процесу їх формування.

Ефективним способом підвищення фізико-механічних властивостей матеріалів є наноструктурування. Для вирішення цього завдання кафедрою матеріалознавства та технології металів Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова розроблено спосіб деформаційної та термічної обробки металів та сплавів, що включає попередню деформацію металу або сплаву з наступною термічною обробкою, яку назвали передрекристалізаційною. Зміст способу полягає у деформуванні металів або сплавів зі ступенем обтискування більше 70 % за температури навколишнього середовища, нагріванні до температури початку рекристалізації, витримці протягом 0,5–10 хвилин з наступним охолодженням до температури навколишнього середовища зі швидкістю, яка

не викликає росту рекристалізаційних зерен (не менше 5 °C/c) [1–3]. Слід відзначити, що ефект підвищення фізико-механічних властивостей починає проявлятися при деформації більше 20–30 %. Однак у даного способу є недолік, пов'язаний з малим часом витримки (до 10 хвилин), при якому забезпечуються максимальні значення твердості матеріалу, що ускладнює, а в деяких випадках і унеможлиблює його застосування в умовах промислового виробництва, особливо для масивних деталей. Тому розробка методів, спрямованих на термічну стабілізацію здрібненої й нанорозмірної полігонізаційної субструктури, є актуальною науковою задачею.

### Аналіз публікацій

В останні роки досягнуто значних успіхів у створенні наноструктурних матеріалів. Особливу увагу приділяють методам інтенсивної пластичної деформації (ППД). Ця група методів отримання матеріалів основана на проведенні великоступеневої пластичної деформації в умовах високих прикладених тисків за відносно низьких температур [4]. В таких умовах деформування відбувається подібнення мікроструктурних елементів у металах і сплавах до наномасштабного розміру. Методи ППД дозволяють отримувати об'ємні безпористі металеві наноструктуровані вироби (авіаційні кріплення, медичні імпланти тощо). Однак діапазон розмірів у таких виробах у більшості випадків перевищує 200 нм [5, 6]. Структура, отримана при ППД, відрізняється великою нерівноважністю через малу щільність вільних дислокацій та переважно висококутовий характер границь субзерен [4, 7].

Оскільки методи ПД 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 передрекristалізаційної термічної обробки матеріалів, суть якої полягає у фіксації полігонізаційної субструктури охолодженням матеріалу на етапі формування наномасштабних субзерен [1–3].

Значний вплив на формування комірчастої нанорозмірної структури справляє вид деформування і ступінь деформації матеріалу [6]. Види деформування розрізняють залежно від швидкості протікання деформації: динамічне і статичне. Відмінності у структурі, отриманій при різних швидкостях деформації, призводять до того, що при одному і тому ж ступені деформації початок полігонізації зі збільшенням швидкості деформування розвивається за більш низьких температур і протікає інтенсивніше [9].

Вплив схеми напруженого стану на полігонізацію пов'язаний з різною щільністю дислокацій, що утворюється після різних способів деформування. Вимірювання щільності дислокацій у сталях після статичної та динамічної деформації показали, що щільність дислокацій після динамічного впливу приблизно на 30 % більше, ніж після статичного [4, 10].

В роботах [9, 10] досліджено вплив динамічної деформації на ковальському молоті та наступної передрекristалізаційної термічної обробки на твердість для технічно чистого заліза, сталей 20, 20X13 та 12X18H10T. Швидкість деформації складала 100 мм/с. Встановлено, що збільшення швидкості деформації призводить до зниження показників твердості та зменшення ефекту підвищення твердості в результаті передрекristалізаційної термічної обробки. Зі збільшенням швидкості деформації збільшується щільність дислокацій і ступінь зміцнення, при цьому підвищується прихована енергія, що веде до збільшення швидкості та зниження температури початку рекристалізації. Тобто після динамічної деформації у процесі передрекristалізаційної термічної обробки відбувається більш інтенсивне зростання субзерен, що ускладнює можливість фіксації полігонізаційної субструктури. Неоднорідність субструктури призводить до неоднорідного подрібнення зразка, в результаті чого відбувається зниження приросту твердості в порівнянні зі статичною деформацією [9, 10].

У роботі [11] досліджено вплив комбінованого деформування (динамічне деформування на 30 % та статичне деформування на 30 %) і наступної передрекristалізаційної термічної обробки на субструктуру та твердість технічно чистих заліза і нікелю, вуглецевих сталей 20 та 45. Встановлено можливість термічної стабілізації полігонізаційної субструктури у процесі передрекristалізаційної термічної обробки для технічно чистого заліза, вуглецевих сталей 20 та 45 до 20–70 хв, 10–60 хв і 5–60 хв відповідно. Додаткова статична деформація (пресування) сприяє збільшенню кількості структурних недосконалостей та утворенню потрійних вузлів (перехрещень) дислокацій, що підвищує термічну стабільність полігонізаційної субструктури.

Але в роботах [1, 2, 11–14] приділено недостатньо уваги впливу комбінованого деформування та наступної передрекristалізаційної термічної обробки для конструкційних легованих сталей.

#### **Мета і постановка завдання**

Метою роботи є розробка комбінованих методів, спрямованих на термічну стабілізацію подрібненої та нанорозмірної полігонізаційної субструктури. Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання: дослідження впливу комбінованого деформування та наступної передрекristалізаційної термічної обробки на твердість та стабілізацію полігонізаційної субструктури сталей 40X і 12X13.

#### **Дослідження впливу комбінованого деформування та термічної обробки на твердість та стабілізацію субструктури легованих сталей**

На сьогодні найпоширенішими матеріалами залишаються сталі та чавуни, які складають приблизно 90 % з усіх конструкційних матеріалів, які використовують у техніці й побуті, тому в подальших дослідженнях використовували конструкційні хромисті сталі 40X (ГОСТ 2590-2006), 12X13 (ГОСТ 2879-2006).

Відпалені зразки зі сталі 40X за температури 760 °C та зі сталі 12X13 за температури 740 °C протягом 1 години розміром 6×6×10 мм піддавали холодній динамічній деформації. Динамічне деформування проводили шляхом ударної циклічної дії до заданої величини деформації за кімнатної температури.

Величину деформації для компактних матеріалів визначали як відношення висоти

здеформованого зразка до початкової висоти деформації.

Термічну обробку зразків здійснювали в лабораторній електричній печі СНОЛ-1.6.2.0.08./9-М1.

Твердість  $HV_5$  визначали на приладі типу «Віккерс» при навантаженні на індентор 5 кг (ДСТУ ISO 6507-4:2008), для кожної експериментальної точки проводили 10 вимірів.

Зйомку дифрактограм проводили за допомогою рентгенівського дифрактометра загального призначення ДРОН-3 у випромінюванні молібдену  $Mo_{K\alpha}$  ( $\lambda = 0,071069$  нм) за відображенням [110]. Обертання зразків проводили в інтервалі подвійних кутів у діапазоні  $18...22^\circ$ , швидкість розгортки складала  $1^\circ/\text{хв}$ , швидкість руху діаграмної стрічки  $60$  мм/год. Напруга на трубці –  $40$  кВ, сила струму –  $40$  мА. Як еталон використовували технічно чисте залізо марки Э12 (ГОСТ 3836-83).

Розмір областей когерентного розсіювання (ОКР) розраховували методом гармонічного аналізу форми дифракційного профілю.

Відносну кількість нанорозмірних частинок визначали за допомогою методу апроксимації дифракційного профілю (згортка функції Гауса). Тобто відносна кількість наномасштабних ОКР розраховувалась як відношення різниці площин рефлексів досліджуваного зразка та еталону до площі рефлексу досліджуваного зразка.

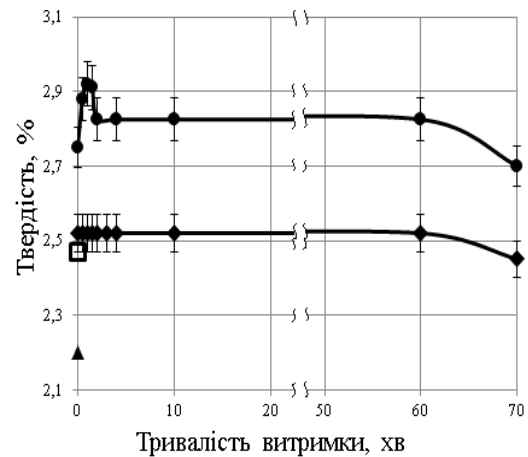
Для визначення середнього кута розорієнтування субзерен використовували метод, основою якого є визначення кривих розподілу інтенсивностей правильних відображень від кристалу, встановленого під кутом Вульфа–Брегга.

Твердість зразків після відпалу складала: сталь 40X –  $1,86$  ГПа, сталь 12X13 –  $2,02$  ГПа.

Для сталей 40X та 12X13 проводили комбіновану деформацію: спочатку здійснювали холодну динамічну деформацію на  $30\%$ , потім – статичну деформацію на  $30\%$ . Таким чином, сумарна величина деформації складає  $60\%$ .

Отримані зразки після комбінованого деформування нагрівали в печі до температури первинної рекристалізації, яку визначено для сталі 40X –  $500^\circ\text{C}$ , для 12X13 –  $600^\circ\text{C}$ .

Результати дослідження впливу тривалості витримки передрекристалізаційної термічної обробки на твердість подано на рис. 1.



- ▲ після комбінованої деформації сталі 40X
- ◆ після комбінованої деформації та термічної обробки сталі 40X
- після комбінованої деформації сталі 12X13
- після комбінованої деформації та термічної обробки сталі 12X13

Рис. 1. Залежність твердості від тривалості витримки передрекристалізаційної термічної обробки деформованих сталей 40X та 12X13

З рисунка 1 видно, що твердість сталі 40X зростає відносно комбіновано деформованого стану на  $15\%$  та зі збільшенням часу витримки не змінюється. Це свідчить про термічну стабілізацію полігонізаційної субструктури сталі 40X після комбінованої деформації та наступної передрекристалізаційної термічної обробки до  $60$  хвилин.

Залежність твердості сталі 12X13 після комбінованого деформування та передрекристалізаційної термічної обробки (рис. 1) носить екстремальний характер. Таким чином, максимальне значення твердості  $2,92$  ГПа досягається при витримці передрекристалізаційної термічної обробки протягом  $1$  хвилини, що на  $18\%$  більше, ніж після комбінованої деформації. Потім твердість дещо падає, але залишається більшою, ніж після комбінованого деформування на  $14\%$ .

Руху дислокацій перешкоджають границі субзерен, частинки іншої фази, концентраційні неоднорідності, структурні недосконалості (дислокації), флуктуації у 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 [2].

Очевидно, що додаткова статична деформація збільшує кількість структурних недосконалоостей у вигляді дислокаційних перехрещень та потрійних вузлів.

Далі аналізували зміну субструктурних елементів після комбінованої деформації та передрекристалізаційної термічної обробки, а саме розмір ОКР, кількість наноструктурних елементів та середній кут розорієнтування субзерен. Результати розрахунків наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Вплив комбінованого деформування та передрекристалізаційної термічної обробки на субструктуру сталей 40X та 12X13

Матеріал	Сумарна деформація, %. Режим термообробки	Середній розмір ОКР, нм	Кількість наноструктурних елементів, %	Кут розорієнтування субзерен, °
40X	деформація 60 %	131	16	0,02
	деформація 60 %, 500 °С, 1 хв	117	29	0,08
	деформація 60 %, 500 °С, 60 хв	118	25	0,06
12X13	деформація 60 %	117	18	0,08
	деформація 60 %, 600 °С, 1 хв	101	34	0,16
	деформація 60 %, 600 °С, 60 хв	106	28	0,14

Із табл. 1 випливає, що розмір ОКР сталей 40X та 12X13 після передрекристалізаційної термічної обробки зменшується порівняно за станом після деформації та набуває практично наномасштабного розміру (менше 120 нм), при цьому відносна кількість нанорозмірних елементів збільшується.

Найбільший кут розорієнтування спостерігається за максимальних значень твердості. За збільшення часу витримки він зменшується, але залишається більшим, ніж після комбінованого деформування. Звідси випливає, що комбіноване деформування з наступною передрекристалізаційною термічною обробкою забезпечують здрібнення субструктури та збільшують термічну стабільність. Це за-

безпечує прояв «розмірного ефекту», зокрема підвищення твердості.

### Висновки

1. Встановлено можливість підвищення твердості сталей 40X та 12X13 комбінованим деформуванням та наступною передрекристалізаційною термічною обробкою пза температур 500 і 600 °С з витримкою до 60 хв, що дозволяє обробляти габаритні деталі за рахунок термічної стабілізації субструктури.

2. Встановлено, що зі збільшенням кута розорієнтування полігонізаційних субзерен збільшується твердість відповідно на 15 та 18 % після передрекристалізаційної термічної обробки.

### Література

- Дубовий, О. М. Вплив передрекристалізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості напиленних 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.
- 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. Жишко, М. М. Бобров, Т. С. Галкіна // *Обробка матеріалів у машинобудуванні, Національний університет кораблебудування*. – 2010. – С. 69–79.
- 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 і патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № а 201120102248, заявл. 01.03.2010; опубл. 25.07.2011, бюл. № 14. – 6 с.
- Валиев, Р. З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией [Текст] / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
- Юркова, О. І. Особливості формування нанокристалічної структури в  $\alpha$ -залізі при деформації тертям [Текст] / О. І. Юркова, Р. В. Карпов, Є. О. Клягін // *Металознавство та обробка металів*. – 2010. – № 1. – С. 12–16.
- Юркова, О. І. Структурний стан і механічні властивості пластично деформованого заліза / О. І. Юркова, А. В. Косянчук, М. Г. Гриценко // *Металознавство та обробка металів*. – 2011. – № 1. – С. 3–9.
- Альмов, М. И. Методы получения и физико-механические свойства объемных нанокрис-

- таллических материалов / М.И. Алымов, В.А. Зеленский. – Москва: МИФИ, 2005. – 52 с.
8. Засимчук, Е. Э. Полигонизация, рекристаллизация и термическая стабильность свойств материалов / Засимчук Е. Э. – К.: Наукова думка, 1976. – 209 с.
  9. Горелик, С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С. С. Горелик, В. Т. Добаткин, Л. М. Капустина. – 3-е изд. – М.: МИСИС, 2005. – 432 с.
  10. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов: учебник. – 3-е изд. исп. и доп. – М.: Металлургия, 1978. – 392 с.
  11. 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.
  12. Жданов, О. О. Дослідження можливостей стабілізації полігонізаційної субструктури деформованого нікелю / О. О. Жданов, О. В. Доріна // Макаровські читання: матеріали Всеукраїнського форуму молодих науковців, Національний університет корабледування ім. адм. Макарова, 2014.
  13. Дубовий, О. М. Вплив комбінованого деформування на термічну стабільність полігонізаційної субструктури заліза, нікелю й сталей 20; 45 / О. М. Дубовий, Лю Шен, Т. О. Макруха // Збірник наукових праць НУК: Миколаїв. - № 1. – 2017. – С. 39–47.
  14. Дубовий, О. М. Вплив деформації та легуючих елементів на твердість сталей і напильних покриттів після передрекристалізаційної термічної обробки / О. М. Дубовий, С. Г. Кулік, О. О. Жданов, М. М. Бобров, О. І. Мирко // Зб. наук. праць НУК. – 2011. – № 2. – С. 36–44.
  3. Dubovy O. M., Yankovets T. A., Lebedeva N. Yu., Kazymyrenko Yu. O., Zhdanov O. O., Bobrov M. M., Sposib Deformatsiyno-Termichnoi Obrobky Metaliv ta Splaviv [Method of the deformed and heat treatment of the metals and alloys], Patent of Ukraine No. 95378 (Publ. 25.07.2011. Bull. No. 14) (2011) [in Ukrainian].
  4. Valiev R. Z., Aleksandrov I. V. (2007). Obyemnyye nanostrukturnyye metallicheskiye materialy: polucheniye, struktura i svoystva [Bulk nanostructured metallic materials: obtaining, structure and properties]. Moscow.
  5. Yurkova O. I., Karpov R. V., Kliaghin Ye. O. (2010). Osoblyvosti formuvannya nanokystalichnoi struktury v  $\alpha$ -zalizi pry deformacii tertiam [Specific features of formation of nanocrystalline structure in  $\alpha$ -iron at deformation with friction] Metaloznavstvo ta obrobka metaliv [Metal science and treatment of metals], 1, 12–16.
  6. Yurkova O. I., Kosianchuk A. V., Hrycenko M. H. (2011). Strukturnyi stan i mekhanichni vlastyvoli plastychno deformovanogho zaliza [Structural state and mechanical properties of plastically deformed iron] Metaloznavstvo ta obrobka metaliv [Metal science and treatment of metals], 1, 3–9.
  7. Alymov M. I., Zelenskiy V. A. (2005). Metody poluchenyai fiziko-mekhanicheskiye svoystva obyemnykh nanokristallicheskiykh materialov [Methods of obtaining the bulk nanocrystalline materials and their physical and mechanical properties]. Moscow.
  8. Zasimchuk E. E. (1976). Poligonizachii, recristalizachii i termicheskaia stabilnost svoistv metallov [Poligonization, recrystallization and thermal stability of materials' properties]. Kiev.
  9. Gorelik S. S., Dobatkin S. V., Kaputkina L. M. (2005). Rekristalizatsiya metallov i splavov [Recrystallization of metals and alloys]. Moscow.
  10. Novikov I. I. (1978). Teoriia termicheskoi obrabotki metallov [The theory of the heat treatment of metals]. Moscow.
  11. Zhdanov O. O. (2015). Zakonomirnosti vplyvu przedrekristalizatsiinoi termichnoi obrobky na fizyko-mekhanichni vlastyvoli deformovanykh stalei. Avtoreferat Diss. [Patterns of the influence of the pre-recrystallization heat treatment on the physical and mechanical properties of deformed steel]. Kherson.
  12. Zhdanov O. O., Dorina O. V. (2014). Doslidzenia mozlyvostei stabilizachii poligonizachiiinoi substrukтури deformovanogo nikeliu [The researching the possibility of the stabilization of the substructure of the deformed nickel]. Makarovski chitannia: materiali Vseukrainsko goforumu molodih naukovich [Makarov's reading: materials of the Ukrainian forum of the young scientists]. Mykolaiv.
  13. Dubovii O. M., Makruha T. O., Lyu Shen (2017). Vplyv kombinovanogo deformuvannya na termichnu stabilnist poligonizachiiinoi substruktu-

### References

tu 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 NUS], Mykolaiv, NUS Publ., 1, 39-47.

14. Dubovyi O. M., Kulik S. H., Zhdanov O. O., Bobrov M. M., Myrko O. I. Vplyv deformacii ta leghuiuchykh elementiv na tverdists napylenykh pokryttiv pislia peredrekrystalizaciiinoii termichnoii obrobky [Influence of deformation and alloying elements on the hardness of steels and sprayed coatings after pre-recrystallization heat treatment] Zb. nauk. prac. NUK [Collection of scientific publications of NUS], Mykolaiv, NUS Publ., 2011, issue 2, pp. 36-44.

**Дубовий Олександр Миколайович** –

д.т.н., професор, тел.: +38 068-557-34-00,  
[oleksandr.dubovyj@nuos.edu.ua](mailto:oleksandr.dubovyj@nuos.edu.ua)

**Макруха Тетяна Олександрівна** – аспірант,  
Національний університет кораблебудування  
ім. адм. Макарова, проспект Героїв України  
(Сталінграду), 9, Миколаїв, Україна, 54025,  
тел.: +38 093-793-58-65,  
[tmakruha@gmail.com](mailto:tmakruha@gmail.com)

**THE INFLUENCE OF THE COMBINED  
DEFORMATION AND PRE-  
RECRYSTALLIZATION HEAT TREATMENT  
ON THE SUBSTRUCTURE AND HARDNESS  
OF STEELS 40X AND 12X13**

**Dubovyi A.N., Makruha T.A., Admiral Makarov  
National University of Shipbuilding**

**Abstract. Problem.** Increasing the physical and mechanical properties of materials by nanostructurization is the main problem of modern material science. Combination of previous deformation by 70 % and the following pre-recrystallization heat treatment of metals and alloys is the effective way of improving properties. Yet this method has some disadvantages. The main shortcoming of this is small exposure time.

*It does not allow the usage of this method for manufacture of massive parts of machines and mechanisms. **Goal.** Researching the influence of combined deformation and subsequent pre-recrystallization heat treatment on the hardness and substructure of 40X and 12X13 alloyed steels. **Methodology.** Methods of computer metallography were used. The X-Ray methods were used to determine the size of coherent scattering areas, quantity of nanoscale subgrains and the angle of orientation of subgrains. **Results.** The hardness of examples increases with the increasing angle of orientation after pre-recrystallization heat treatment. **Originality.** The possibility of thermal stabilization of polygonization substructure by combined deformation by 60 % and the following pre-recrystallization heat treatment was established. **Practical value.** The possibility of using pre-recrystallization heat treatment for details of overall dimensions was created.*

**Key words:** combined deformation, pre-recrystallization heat treatment, thermal stability, polygonization substructure, alloyed steels.

**ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ  
ДЕФОРМАЦИИ И  
ПРЕДРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННОЙ  
ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА  
СУБСТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ СТАЛЕЙ  
40X И 12X13**

**Дубовой А.Н., Макруха Т.А., Национальный  
университет кораблестроения**

**Аннотация.** В работе исследовано влияние комбинированной деформации и последующей предрекристиаллизационной термической обработки на субструктуру и твердость конструкционных легированных сталей 40X и 12X13. Установлено возможность термической стабилизации полигонизационной субструктуры комбинированно деформированных сталей.

**Ключевые слова:** комбинированное деформирование, предрекристиаллизационная термическая обработка, термическая стабилизация, полигонизационная субструктура, легированные стали.