

## Математичне моделювання режиму передрекристалізаційної термічної обробки технічно чистого заліза

О. М. Дубовий, О. В. Чечель\*, О. О. Жданов

Національний університет кораблебудування ім. адм. С. О. Макарова,  
Миколаїв, e-mail: oleksandr.dubovuj@nuos.edu.ua

\*Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,  
Київ, e-mail: achechel@trestmag.kiev.ua

*На основі експериментальних даних побудовано математичну модель впливу параметрів режиму передрекристалізаційної термічної обробки на показники твердості технічно чистого заліза марки 10880, що надало можливість виявити основні фактори, які впливають на вказану характеристику. Встановлено, що підвищення твердості і міцності технічно чистого заліза відбувається за рахунок здрібнення субструктури.*

**Ключові слова:** субструктура, твердість, передрекристалізаційна термічна обробка, рівняння регресії, математична модель.

### Вступ

Для підвищення ефективності експериментальних досліджень і інженерних розробок застосовують математичні методи планування експериментів, які суттєво скорочують кількість дослідів, терміни вирішення поставлених задач, знижують витрати на дослідження і підвищують точність отриманих результатів.

В роботах [1—6] показано, що ще не вичерпано всі можливості деформаційно-термічної обробки металів і сплавів щодо підвищення їх фізико-механічних властивостей. Запропоновано новий метод підвищення фізико-механічних характеристик пластично деформованих металів — формування полігонізаційної субструктури в процесі передрекристалізаційної термічної обробки, що забезпечує зростання твердості на 30—70% та зниження теплопровідності на 30% компактних металів та напилених покриттів. Суть методу полягає у фіксації у деформованому металі полігонізаційної субструктури шляхом нагріву до температури початку первинної рекристалізації матеріалу або одного з його компонентів, короткочасної витримки (до 10 хв) з наступним охолодженням до температури навколишнього середовища зі швидкістю, яка унеможлиблює ріст субзерен (блоків) [4—6].

Оптимізація параметрів режиму передрекристалізаційної термічної обробки потребує постановки чисельних дослідів. Тому необхідно побудувати математичну модель, яка дозволить скоротити кількість дослідів і прогнозувати властивості матеріалу після передрекристалізаційної термічної обробки.

Метою даної роботи є оптимізація режиму передрекристалізаційної термічної обробки технічно чистого заліза щодо підвищення показників твердості та встановлення факторів, що це ініціюють.

## Матеріали та методика досліджень

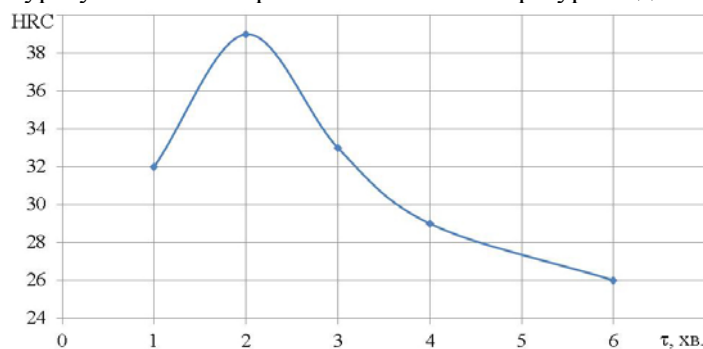
Зразки технічно чистого заліза марки 10880 (ГОСТ 11036-75) у вигляді паралелепіпедів  $10 \times 8 \times 8$  мм у відпаленому стані деформували на пресі P50. Ступінь деформації зразка визначали як відношення різниці висоти до та після деформації до вихідного значення. Термічну обробку зразків здійснювали в електричній печі СНОЛ-1.6.2.0.08/9-М1. Твердість вимірювали на приладі типу Віккерс згідно з ДСТУ ISO 6507-4:2008. Визначення розмірів областей когерентного розсіювання (ОКР) проводили на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3 у  $\text{CuK}_\alpha$ -випромінюванні методом апроксимації [7].

## Результати та їх обговорення

Дослідження залежності твердості статично деформованих на 70—80% технічно чистих Fe, Ni, сталей У8, 30ХГСА та бронзи БрАМц 9-2 від часу витримки при температурах, що відповідають температурному порозу первинної рекристалізації, показали її екстремальний характер (наприклад, для сталі 30ХГСА) (рисунок).

Результати визначення міцності і пластичності технічно чистого заліза і окремих марок сталей, а також максимуму твердості після передрекристалізаційної термічної обробки наведено в табл. 1. Оскільки твердість є одним із критеріїв міцності сталей, а залізо являє собою основу будь-якої сталі, подальші дослідження причин збільшення твердості і міцності та оптимізації режимів передрекристалізаційної термічної обробки проводили на технічно чистому залізі.

Аналіз робіт, де досліджували вплив технологічних параметрів передрекристалізаційної термічної обробки [1—3, 8] на показники твердості, дозволив виявити, що основними параметрами, від яких залежить рівень твердості, отриманої в результаті передрекристалізаційної термічної обробки, є ступінь деформації  $\epsilon$ , температура нагріву  $T$  та час витримки  $\tau$  в печі. Використовуючи методи планування експерименту [9, 10], для побудови математичної моделі спільного впливу даних факторів на твердість після передрекристалізаційної термічної обробки технічно чистого заліза застосовували повнофакторний експеримент типу  $2^k$ , де  $k = 3$  (число факторів). За параметр оптимізації вибрано твердість  $Y$ . Кожен з трьох факторів варіювали на двох рівнях, вибираючи граничні значення з урахуванням експериментальних та літературних даних (табл. 2).



Залежність твердості деформованої на 70% сталі 30ХГСА від часу витримки передрекристалізаційної термічної обробки при 550 °С.

**Т а б л и ц я 1. Межі міцності, пластичності для технічно чистого заліза і сталей залежно від виду обробки**

Матеріал	Обробка	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %
Технічно чисте залізо	Деформація 60%	698	10	14
	Деформація 60% з наступною термічною обробкою при 500 °С і витримкою при цій температурі 1,5 хв	821 (+18)*	14 (+40)	34 (+143)
Сталь 20	Відпал при 850 °С, витримка 1 год	360	15,5	57,3
	Деформація 48% без термічної обробки	624 (+73)	2,7 (-83)	8,6 (-85)
	Деформація 48% з наступною термічною обробкою при 500 °С і витримкою при цій температурі 1,5 хв	684 (+90/+10)	4,1 (-73/+52)	14,9 (-74/+73)
Сталь 40	Відпал при 820 °С, витримка 1 год	457	16	40
	Деформація 60% без термічної обробки	669 (+46)	4 (-75)	12 (-70)
	Деформація 60% з наступною термічною обробкою при 500 °С і витримкою при цій температурі 1,5 хв	713 (+56/+7)	5,5 (-66/+38)	16,5 (-59/+38)
Сталь 20Х13	Відпал при 720 °С, витримка 1 год	833	6	43
	Деформація 60% без термічної обробки	1162 (+39)	2 (-83)	18 (-58)
	Деформація 60% з наступною термічною обробкою при 600 °С і витримкою при цій температурі 2 хв	1192 (+43/+3)	4 (-67/+100)	26 (-39/+44)

\*В дужках наведено приріст (зниження) у відсотках відносно відпаленого деформованого стану.

Для побудови моделі проводили вісім дослідів, які включали в себе по п'ять експериментальних значень. Результати дослідів перевірені на наявність грубих помилок за критерієм Груббса [9]. План і результати дослідів представлені в табл. 3.

Однорідність дисперсій, що характеризують помилку експерименту по окремих точках, також перевіряли за допомогою критерію Кохрена [9]. Оскільки отримане значення критерію Кохрена  $G$  менше табличного  $G_{\max} = 0,269 \leq G_{0,05}(4; 8) = 0,391$ , приймається нульова гіпотеза рівності дисперсій.

На підставі статистично оброблених експериментальних даних (табл. 3) розраховано коефіцієнти регресії, проведено перевірку їх

**Т а б л и ц я 2. Значення рівнів та інтервалів варіювання**

Фактор (код)	Рівень			Інтервал варіювання
	нижній	верхній	основний	
Рівень	-1	+1	0	$\Delta X_i$
Температура $T, ^\circ\text{C} (X_1)$	400	600	500	100
Час витримки $\tau, \text{с} (X_2)$	30	300	165	135
Ступінь деформації $\varepsilon, \% (X_3)$	20	80	50	30

**Т а б л и ц я 3. План і результати дослідів**

Номер дослід	Рандомізація дослідів	Кодування значень факторів			Функція відгуку, МПа					$\bar{y}_i^*$ , МПа	$s_i^2$ , МПа <sup>2</sup>
		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$		
1	3	+	-	+	2692	2690	2694	2696	2692	2693	5,2
2	1	+	+	+	2725	2715	2713	2724	2722	2720	29,7
3	8	-	-	-	2746	2736	2741	2740	2736	2740	17,2
4	5	+	+	-	2767	2772	2773	2769	2772	2771	6,3
5	4	-	-	+	2452	2448	2442	2450	2449	2448	14,2
6	6	-	+	-	2487	2484	2486	2485	2485	2485	1,3
7	2	-	+	+	2493	2500	2502	2507	2505	2501	29,3
8	7	+	-	-	2518	2515	2520	2516	2513	2516	7,3

\*  $\bar{y}_i$  — середнє значення функції відгуку;  $s_i^2$  — дисперсія дослідів.

значущості та адекватності отриманої моделі реальному процесу передрекристалізаційної термічної обробки.

Результати розрахунку коефіцієнтів регресії:

$$b_0 = 2609,3; b_1 = -13,8; b_2 = -22,8; b_3 = 121,5.$$

Рівняння регресії

$$Y = 2609,3 - 13,8X_1 - 22,8X_2 + 121,5X_3.$$

У табл. 4 наведено дослідні та розрахункові дані, що отримані за рівнянням регресії.

Перевірку значущості коефіцієнтів здійснювали за  $t$ -критерієм Стьюдента, незалежно для кожного коефіцієнта:

$$t_{0\text{дослід}} = \frac{|b_j|}{s\{b_j\}} = \frac{2609,3}{3,72} = 701,42 >$$

$$t_{\text{кр}}(32; 0,05) = 2,036;$$

$$t_{1\text{дослід}} = \frac{|b_j|}{s\{b_j\}} = \frac{13,8}{3,72} = 3,71 >$$

$$t_{\text{кр}}(32; 0,05) = 2,036;$$

**Т а б л и ц я 4. Результати випробувань і розрахунку**

Номер дослідної точки	$\bar{y}_i$ , МПа	
	Досліди	Розрахунок
1	2690	2694
2	2720	2722
3	2740	2740
4	2770	2767
5	2450	2451
6	2485	2479
7	2500	2497
8	2520	2524

$$t_{2\text{дослід}} = \frac{|b_j|}{s_{\{b_j\}}} = \frac{22,8}{3,72} = 6,12 > t_{\text{кр}}(32; 0,05) = 2,036;$$

$$t_{3\text{дослі}} = \frac{|b_j|}{s_{\{b_j\}}} = \frac{121,5}{3,72} = 32,66 > t_{\text{кр}}(32; 0,05) = 2,036.$$

Оскільки всі отримані коефіцієнти рівняння регресії є більшими за  $t$ -критерій Стьюдента, то всі вони є значущі.

Перевірку гіпотези про адекватність одержаної моделі проводили за допомогою дисперсійного відношення Фішера [9]

$$F_{\text{розр}} = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_{\{y\}}^2} \frac{38,27}{13,81} = 2,77 < F_{\text{кр}}(0,05; 4; 8) = 3,8.$$

Оскільки  $F_{\text{розр}} = 2,77 < F_{\text{кр}}(0,05; 4; 8) = 3,8$ , отримана математична модель вважається адекватною об'єкту дослідження і не підлягає подальшому ускладненню.

Для полегшення користування отриманим рівнянням регресії поліномом приведено до розмірного виразу за допомогою формули зворотного перетворення

$$Y = 2503,67 - 0,138T - 0,17\tau + 4,05\varepsilon.$$

З одержаного рівняння залежності твердості від технологічних факторів передрекристалізаційної термічної обробки випливає, що залежність твердості від часу витримки в печі менша, ніж від ступеню деформації; максимальна твердість спостерігається при мінімальному часі витримки в печі та максимальному ступені деформації. Режим передрекристалізаційної термічної обробки, що забезпечує найбільшу твердість для технічно чистого заліза, розрахований за рівнянням регресії та співпадає з експериментальними даними і становить: деформація — 80% з наступною передрекристалізаційною термічною обробкою при 500 °С з витримкою 1,5 хв.

Дослідженнями [1—3] встановлено, що підвищення твердості пластично деформованих металів після передрекристалізаційної термічної обробки зумовлене здрібненням субструктури. Це підтверджується результатами визначення розмірів областей когерентного розсіювання (табл. 5). Оскільки ОКР відповідає внутрішній впорядкованій області зерна та не включає сильно спотворені границі, розмір ОКР ототожнюють із

**Т а б л и ц я 5. Параметри субструктури технічно чистого заліза до і після передрекристалізаційної термічної обробки**

Обробка	Фізичне уширення, рад		Розмір ОКР $D$ , нм
	Fe <sub>[110]</sub>	Fe <sub>[211]</sub>	
Відпал	0,00171	0,001955	629
Деформація 60%	0,01833	0,02007	131
Деформація 60% з наступною передрекристалізаційною термічною обробкою при 500 °С, витримка 1,5 хв	0,01536	0,02182	78

середнім розміром зерен [11]. Розмір областей когерентного розсіювання дає узагальнену картину здрібнення по всьому об'єму зразка, що унеможливує визначення точної кількості субструктурних елементів в структурі деформованого технічно чистого заліза після передрекристалізаційної термічної обробки. Однак ці результати надають можливість стверджувати, що підвищення твердості і міцності деформованого технічно чистого заліза після передрекристалізаційної термічної обробки відбувається внаслідок здрібнення субструктури.

Для визначення залежності фізико-механічних властивостей після передрекристалізаційної термічної обробки від розмірів і кількості субструктурних елементів необхідно провести подальші дослідження з використанням електронної мікроскопії.

### Висновки

Отримано рівняння регресії, що дозволяє вибирати оптимальний режим передрекристалізаційної термічної обробки технічно чистого заліза марки 10880, який забезпечить отримання максимальної твердості на рівні 2770 МПа. Встановлено, що підвищення твердості і міцності технічно чистого заліза відбувається внаслідок здрібнення субструктури.

1. *Дубовий О. М.* Вплив деформації і легуючих елементів на твердість сталей і напилених покриттів після передрекристалізаційної термічної обробки / [О. М. Дубовий, С. Г. Кулік, О. О. Жданов та ін.] // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК. — 2011. — № 2 (437). — С. 37—48.
2. *Дубовий О. М.* Вплив передрекристалізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості напилених покриттів та деформованих металів і сплавів / О. М. Дубовий, Н. Ю. Лебедева, Т. А. Янковець // *Металознавство та обробка металів*. — К., 2010. — С. 161—162.
3. *Дубовий О. М.* Дослідження можливостей підвищення фізико-механічних властивостей деформованих металів і сплавів термічною обробкою / [О. М. Дубовий, Н. Ю. Лебедева, Т. А. Янковець та ін.] // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК. — 2010. — № 3 (432). — С. 69—79.
4. *Пат. 03877 України.* Спосіб нанесення електродугових покриттів / [О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, Т. А. Янковець, О. О. Жданов]. — Опубл. 10.09.2009, Бюл. № 17.
5. *Пат. 02658 України.* Спосіб нанесення покриттів / [О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, Т. А. Янковець, О. О. Жданов]. — Опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21.
6. *Пат. 02248 України.* Спосіб деформаційно-термічної обробки металів та сплавів / [О. М. Дубовий, Н. Ю. Лебедева, Т. А. Янковець та ін.]. — Опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14.
7. *Уманский Я. С.* Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. — М. : *Металлургия*, 1982. — 632 с.
8. *Горелик С. С.* Рекристаллизация металлов и сплавов. — М. : *Металлургия*, 1978. — 404 с.
9. *Адлер Ю. П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. — М. : *Наука*, 1976. — 279 с.
10. *Стиридонов А. А.* Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. — М. : *Машиностроение*, 1981. — 178 с.
11. *Гусев А. И.* Аттестация нанокристаллических материалов по размеру частиц (зерен) / А. И. Гусев, А. С. Курлов // *Металлофизика и новейшие технологии*. — 2008. — 30, № 5. — С. 679—694.

## **Математическое моделирование режима предрекристаллизационной термической обработки технически чистого железа**

А. Н. Дубовой, А. В. Чечель, А. А. Жданов

*На основе экспериментальных данных построена математическая модель влияния параметров режима предрекристаллизационной термической обработки на показатели твердости технически чистого железа марки 10880, что позволило выявить основные факторы, влияющие на указанную характеристику. Установлено, что повышение твердости и прочности технически чистого железа происходит за счет измельчения субструктуры.*

**Ключевые слова:** субструктура, твердость, предрекристаллизационная термическая обработка, уравнение регрессии, математическая модель.

## **Mathematical modelling of the prerecrystallization heat treatment condition of the technically pure iron**

A. N. Dubovij, A. V. Chechel, A. A. Zhdanov

*Based on experimental data, the mathematical model of the influence of the profile prerecrystallization heat treatment on hardness indices technically pure iron 10880 mark, which made it possible to identify the main factors that affect the performance of hardness. It was established that the increase in hardness and strength of technically pure iron is due to degeneration substructure.*

**Keywords:** substructure, hardness, prerecrystallization heat treatment, the regression equation, the mathematical model.