

УДК 621.785:001.891.57

© Іващенко В.Ю.\*

**ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМІВ ТЦО НА ОСНОВІ  
АНАЛІЗУ ФРАКТАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ ПОВЕРХОНЬ ЗЛАМУ**

*Оптимізація складних режимів термічних обробок, в яких управління властивостями оброблюваних сталей відбувається при варіюванні великого числа параметрів, є досить трудомістким процесом. При використанні режимів термоциклічних обробок зі змінними температурами нагрівання та охолодження в циклах пропонується для знаходження оптимального поєднання параметрів використовувати методику фрактального опису поверхонь зламів, що утворилися під час випробування механічних властивостей сталей.*

**Ключові слова:** термоциклічна обробка (ТЦО), сталь, поверхня зламу, фрактальні показники, механічні властивості.

*Иващенко В.Ю. Выбор оптимальных параметров режимов ТЦО на основе анализа фрактальных показателей поверхностей излома. Оптимизация сложных режимов термических обработок, в которых управление свойствами обрабатываемых сталей происходит при варьировании большого числа параметров, является довольно трудоемким процессом. При использовании режимов термоциклических обработок с переменными температурами нагрева и охлаждения в циклах предлагается для нахождения оптимального сочетания параметров использовать методику фрактального описания поверхностей изломов, полученных при испытаниях механических свойств сталей.*

**Ключевые слова:** термоциклическая обработка (ТЦО), сталь, поверхность излома, фрактальные показатели, механические свойства.

*V. Yu. Ivashchenko. Selecting the thermo-cyclic treatment's optimum parameters based analysis of fractal surfaces indicators. Optimization of complex modes of heat treatments, in which control the properties of processed steel occurs by varying the large number of parameters, is quite time-consuming process. The influence of thermal processes on the formation of the metal structure manifested at the level of micro- and meso-sizes, which are realized qualitatively different mechanisms of destruction. Method of multi-factual description of the fracture's surfaces, which was got after tests of mechanical properties, was used for the choice of the optimum thermo-cyclic mode with the variable temperatures  $T_{max}$  and  $T_{min}$  in cycles in this work. It was founded the number of TCT-mode's cycles and order changing  $T_{max}$  affect the processes of dislocation motion and the formation of micro-voids in the metal. This work shows the relationship between these processes and fractal indices. Fractal indices of micro levels correlate to the dislocation density of the structure, and the meso-level indices - to the percentage reduction of area at fracture. It was proved that the analysis of the topography of the fracture's surfaces using fractal indices to determine the optimal combination of processing parameters required to obtain the best mechanical properties. The new TCT-modes with variable temperature settings can be seen as reinforcing thermal technology that promotes self-organization phase-structural state of steels because it is able to generate an effective barrier to the movement of dislocations and cracks promotion.*

**Keywords:** Thermo-cyclic treatment (TCT), steel, surface fracture, fractal indicators, mechanical properties.

**Постановка проблеми.** Оптимізація комплексних складних режимів термічної обробки, під час яких у структурі металу відбуваються різноманітні фізико-хімічні процеси, є досить

\* канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [gazetaxronos@gmail.com](mailto:gazetaxronos@gmail.com)

складним завданням. За допомогою планового факторного експерименту оптимізувати такі режими складно або навіть неможливо, особливо якщо зміни у структурі відбуваються спочатку накопичуючись, а з певного моменту відбувається їх самознищення. Далі процес циклічно повторюється, що ускладнює оптимізацію.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Традиційні прийоми управління властивостями матеріалів базуються на тріаді академіка Н. С. Курнаков «склад-структура-властивості». Основним об'єктом дослідження в металознавстві залишається структура, і, як відомо, на неї можна ефективно впливати різними прийомами, що сприяють утворенню перешкод для руху дислокацій та таким чином впливають на процеси деформування та руйнування. Такий підхід виділив в матеріалознавстві новий науковий напрям - дислокаційне металознавство [1, 2], в якому нова парадигма пов'язує властивості металу не з вихідною незмінною мікроструктурою, а з мезоструктурою, що розвивається та самоорганізується в нерівноважних умовах.

Останнім часом мультифрактальний формалізм все ширше застосовується в металознавстві, оскільки саме природа процесів, що протікають в металі, не дозволяє застосувати для опису лінійний підхід і параметри евклідового простору. За останні 10-15 років вченими-металознавцями був накопичений деякий досвід в описі неспостережуваних безпосередньо процесів руйнування або розпаду [3-6], та за допомогою теорії фракталів і принципу самоподібності геометричних об'єктів були вирішені деякі важливі прикладні задачі металознавства.

Оптимізація складних видів термообробки з великою кількістю параметрів - є одним із важливих завдань в організації машинобудівного виробництва, вирішення якої дозволяє ефективно управляти властивостями металу, економлячи енергетичні витрати та час термообробки.

**Мета статті** – оптимізація режиму термоциклічної обробки (ТЦО) зі змінними температурами циклів на основі аналізу кількісних показників топографії поверхонь зламів.

**Викладення основного матеріалу.** Зразки зі сталі 50ХН, що термічно оброблялися за розробленими нами режимами ТЦО зі змінними верхніми ( $T_{max}$ ) і нижніми температурами ( $T_{min}$ ) термоциклування, а також змінною кількістю циклів - від двох до чотирьох, було використано для оптимізації параметрів режимів.

Детальніше про розроблені режими ТЦО можна ознайомитись у роботах автора [7, 8]. Для прикладу, один з режимів складався з 4 циклів пічного нагріву до верхніх температур, що змінювалися від циклу до циклу за наступною схемою (рис. 1):  $T_{max1} = 780\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{max2} = 880\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{max3} = 780\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{max4} = 880\text{ }^{\circ}\text{C}$ , після кожного циклу було проведено охолодження на повітрі до нижньої температури  $T_{min} = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$  у всіх циклах, крім останнього, де охолодження здійснювалося до кімнатної температури. Часові витримки при  $T_{max}$  проводилися з урахуванням розміру перерізу зразка.

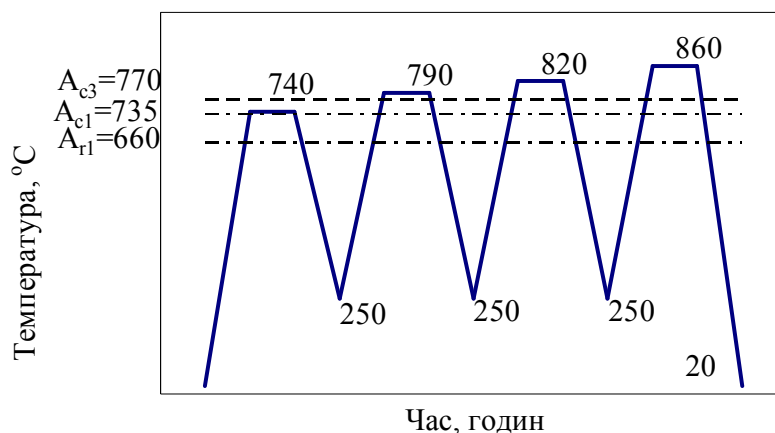


Рис. 1 – Режим ТЦО зі змінними температурами  $T_{max}$  та постійною температурою  $T_{min}$

По завершенні ТЦО досліджували вплив змінних параметрів обробки на розвиток руйнування сталі 50ХН під час випробувань на розтяг. Для цього після кожного циклу ТЦО було випробувано механічні властивості, а отримані поверхні зламів сфотографовані за допомогою

РЕМ при збільшенні  $\times 750$  (рис. 2). Зображення поверхонь оцінювалися за відомою методикою, що базується на аналізі різниці в яскравості ( $|I-I'|$ ) точок зображення, які знаходяться на відстані  $L$  одна від одної [5]. На графіку можна розрізнити три розмірові області: мікрорівень, мезорівень та макрорівень, кожної з яких притаманний певний характер розподілу точок на координатному полі (рис. 3).

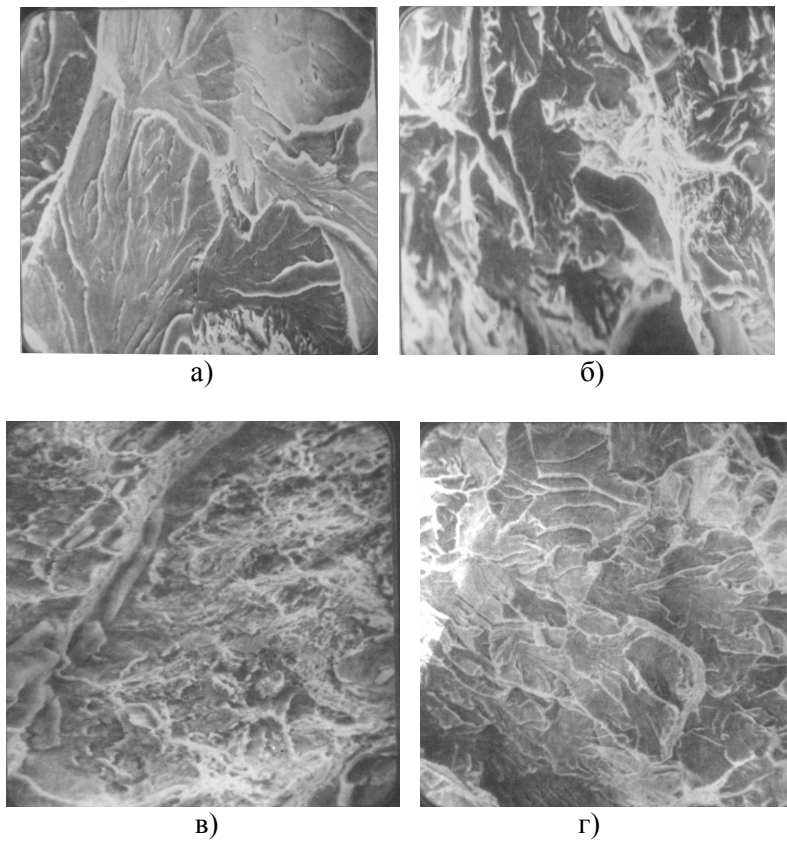


Рис. 2 – Фото поверхонь зламу зразків з сталі 50ХН ( $\times 750$ ) оброблених за наведеним у статті режимом ТЦО, відповідно після циклів: а – №1; б – №2; в – №3; г – №4

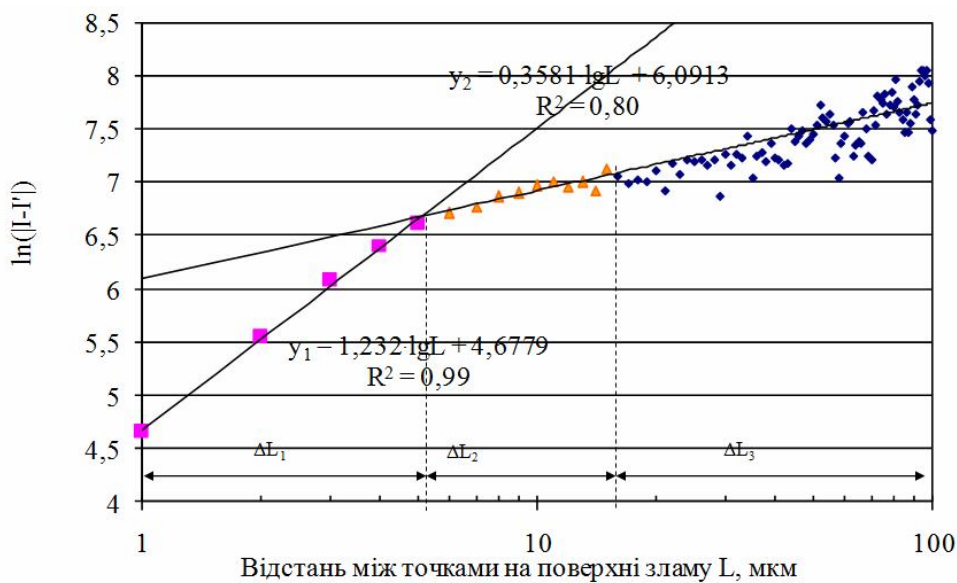


Рис. 3 – Графічна залежність логарифма ( $|I-I'|$ ) від відстані між точками на поверхні зламу зразка

Графічні залежності, що отримані для кожного зразка, котрий пройшов певну кількість циклів ТЦО мають по 2 ділянки, кожна з яких апроксимується до лінійної функції  $y_i$ . Для кожної ділянки було розраховано фрактальний показник  $D_{c1}$  (дорівнює коефіцієнту рівняння, що стоїть перед логарифмом), який є основним кількісним показником для аналізу впливу кількості циклів ТЦО на характер руйнування. Рівняння  $y_1$  (див. рис. 3) характеризує різновид поверхні зламу на розмірному рівні субзерна, а  $y_2$  - на рівні зерна.

Відомо, що збільшення кількості циклів ТЦО сприяє подрібненню зерна, формуванню розвиненої осередкової структури, підвищенню хімічної однорідності і, як наслідок, зростанню ударної в'язкості [9]. Однак для одночасного з ним підвищення межі міцності та межі текучості запропоновано варіювати також верхніми і нижніми температурами в циклах, що дозволяє реалізувати різні фазово-концентраційні, а отже, і структурні стани у сталях. З метою подальшої оптимізації режиму ТЦО цікаво було вивчити вплив  $T_{max}$  та  $T_{min}$  в циклі, а також кількості циклів в режимі на особливості процесів руйнування. Вплив  $T_{max}$  на властивості сталі 50XH з урахуванням перегріву відносно температури  $A_{C3}$  при змінних параметрах ТЦО для різних схем чергування в циклах раніше було описано в роботі [7].

За допомогою математичної обробки згідно теорії фракталів був виявлений певний характер зміщення точок графіку в залежності від числа циклів ТЦО та температур  $T_{max}$  і  $T_{min}$  у циклах. Виявлена подібність у динаміці зміни щільності дислокацій в фериті, виміряної за допомогою рентгеноструктурного аналізу [8], і показника  $D_{c1}$ . Подібний характер зміни спостерігається також між відносним звуженням ( $\psi$ ) і показником  $D_{c2}$ : зазвичай максимальні значення показника  $D_{c2}$  збігаються з максимумами  $\psi$ , які припадають частіше на третій цикл у випробуваних режимах ТЦО.

Встановлено, що точці перетину двох прямих  $y_1$  і  $y_2$  (див. рис. 3) відповідає певний розмірний рівень, за умови перевищення якого система стрибкоподібно змінює механізм пластичної течії без порушення суцільності матеріалу на механізм утворення локальних мікропорожнин. Кожен розмірний рівень характеризується подібними геометричними елементами на поверхні зламу, розміри яких знаходяться в межах  $\Delta L_1$ . Розмірний рівень  $L_1$  пов'язаний з дислокаціями, як з елементарними носіями пластичної течії. Таким чином,  $\Delta L_1$  - це діапазон розмірів ділянок руйнування мікрорівня, що коливається для випробуваних режимів ТЦО у вузьких межах - в середньому від 0,51 до 2,20 мкм.

Розмірний рівень  $L_2$  пов'язаний з об'ємними елементами, які здійснюють одночасний зсув із поворотом, в результаті чого утворюються мікропорожнини в товщі металу [1]. Такими елементами можна вважати дисклінації, прикордонні об'єми субзерен і зерен, а показник  $\Delta L_2$  - це діапазон розмірів ділянок руйнування мезорівню. Так наприклад, найбільші за величиною відрізки  $\Delta L_2$  (5,0-8,0 мкм) відповідають циклам, де  $T_{max}$  трохи перевищує температуру  $A_{C3}$ , після цих циклів отримані найбільші значення КСУ і  $\psi$ . При перевищенні температури  $A_{C3}$  більш ніж на 100 °С при нагріванні у четвертому циклі, величина  $\Delta L_2$  зменшується в порівнянні з попереднім циклом, що мабуть пов'язано зі змінами у субструктурі. Також зменшенню  $\Delta L_2$  сприяє високий відпуск, проведений після будь-якого режиму ТЦО незалежно від того за якою схемою змінювалися температури у циклах.

На графіках (див. рис.3) спостерігається ще одна ділянка з хаотичним розкидом точок ( $\Delta L_3$ ), який свідчить про відсутність схожості в протіканні процесів руйнування на великих розмірних рівнях поверхонь зламу.

В результаті проведених досліджень встановлено, що щільність дислокацій у сталі взаємопов'язана з величиною  $D_{c1}$ , але не має зв'язку з довжиною відрізка кореляції на мікрорівні  $\Delta L_1$ , тому для підвищення міцності слід прагнути до підвищення  $D_{c1}$ .

Однак також відомо, що сталеві вироби після ТЦО менш схильні до викривлення [9], що свідчить про можливість пластичних деформацій в мікрооб'ємах металу. Співставлення довжин відрізків кореляції  $\Delta L_2$  для ТЦО та типових для валкової сталі 50XH нормалізації та високого відпуску також свідчить про ймовірність пластичних деформацій. Наприклад, ТЦО в порівнянні з типовою термообробкою збільшує довжину відрізка кореляції  $\Delta L_2$ , що відповідає мезорівню руйнування, в 2 і більше разів. Тобто спостерігається збільшення критичного розміру мікропорожнин, нездатних до стрімкого зростання шляхом об'єднання їх у єдину магістральну тріщину. Оскільки розкриття пор або порожнин контролюються процесами пластичної течії, то при періодичному гальмуванні дислокацій у стінок осередків швидкість росту мікропорожнин

буде сповільнюватися. Іншими словами, збільшення  $\Delta L_2$  свідчить про резерв надійності та збільшення тривалості терміну служби виробу до виникнення поломки. Таким чином, доцільно застосовувати ті режими ТЦО, які дають найбільші величини  $\Delta L_2$ .

У загальному вигляді самоорганізацію структури під дією змінних умов нагріву-охолодження при ТЦО можна описати таким чином. Кристалічна структура металів, як система з великою кількістю взаємодіючих елементів, під дією умов, що циклічно змінюються, поступово еволюціонує до певного стану. Цей стан характеризується деякою надкритичною щільністю точкових і лінійних дефектів кристалічної будови, які утворили певний порядок, завдяки якому така самоорганізована структура при випробуваннях механічних властивостей поводить себе як знеміцнена. У цьому зв'язку цікаво виявити порогові умови обробки (параметри ТЦО), при яких виникає ця самоорганізація зі стабілізованою дефектністю, що сприяє мінімальній пошкоджуваності при механічних випробуваннях чи під час експлуатації.

Фрактальна мікро- і мезоструктура, що була отримана після ТЦО зі змінними параметрами (три цикли із зростаючою  $T_{\max}$ ) і яка характеризується великим діапазоном довжини відрізків  $\Delta L_2$  очевидно має більш високий пороговий показник переходу до стану знеміцненого впорядкування. Такі структурні зміни в умовах зовнішнього навантаження сприяють одночасному підвищенню міцності, пластичних властивостей і ударної в'язкості сталі, що зазвичай недосяжно традиційними режимами термообробки, а також і термоциклічними обробками з постійними параметрами циклування.

### Висновки

1. Під час вибору оптимального режиму ТЦО за допомогою фрактальних показників необхідно прагнути до зниження фрактального показника  $D_{c1}$  мікрорівню і підвищення довжини відрізка кореляції  $\Delta L_2$  мезорівню. Саме таке поєднання цих параметрів вказує на оптимальне поєднання параметрів ТЦО, при якому спостерігається підвищення комплексу властивостей конструкційної сталі.
2. Розроблені нові режими ТЦО зі змінними температурними параметрами можна розглядати як зміцнювальну термічну технологію, яка сприяє самоорганізації фазово-структурного стану сталей типу 50ХН, бо вона здатна генерувати ефективні бар'єри на шляху руху дислокацій та просування магістральної тріщини.

### Список використаних джерел:

1. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова [и др.]. – М. : Наука, 1994. – 383 с.
2. Большаков В.И. Причины, приведшие к возникновению теории фракталов и особенности ее применения в материаловедении / В.И. Большаков, Ю.И. Дубов, А.Е. Бардах // Стародубовские чтения. – 2002. – С. 43-52.
3. Бунин И.Ж. Мультифракталы в оценке диссипативных свойств металлических материалов / И.Ж. Бунин, А.Г. Колмаков, Г.В. Встовский // Металлы. – 1998. – №1. – С. 103-106.
4. Vstovsky G.V. Multifractal parametrization of structures in material science / G.V. Vstovsky, I.J. Bunin // J. Advanc. Mater. – 1994. – V.1. – №3. – P. 230.
5. Бобро Ю.Г. Определение фрактальности поверхностей разрушения по данным РЭМ-стереоизмерений / Ю.Г. Бобро, В.Н. Мельник, А.В. Шостак, В.У. Волошин // Металлы. – 1999. – №3. – С. 109-113.
6. Трефилов В.И. Фрактальная размерность поверхности изломов / В.И. Трефилов, В.В. Картузов, Н.В. Минаков // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2001. – № 3. – С.10-13.
7. Иващенко В.Ю. Влияние термоциклической обработки на свойства валковой стали 50ХН / В.Ю. Иващенко // Захист металургійних машин від поломок : Міжвуз. темат. зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2000. – Вип. 5. – С. 257-261.
8. Иващенко В.Ю. Влияние ТЦО с переменными параметрами на состояние субструктуры и свойства валковой стали 50ХН / В.Ю. Иващенко, Ф.К.Ткаченко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2004. – №2. – С.16-18.
9. Федюкин В.К. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин / В.К. Федюкин, М.Е. Смагоринский. – Л. : Машиностроение, 1989. – 255 с.

## Bibliography:

1. Synergetic and Fractals in materials science / V.S. Ivanova [and others]. – M. : Nauka, 1994. – 383 p. (Rus.)
2. Bolshakov V.I. Reasons that have led to the emergence of the theory of fractals and especially its application in materials science / V.I. Bolshakov, Yu.I. Dubov, A.E. Bardah // Starodubovskie chteniya. – 2002. – P. 43-52. (Rus.)
3. Bunin I.Zh. Multifractals in assessing the dissipative properties of metallic materials / I.Zh. Bunin, A.G. Kolmakov, G.V. Vstovskiy // Metally. – 1998. – №1. – P. 103-106. (Rus.)
4. Vstovsky G.V. Multifractal parametrization of structures in material science / G.V. Vstovsky, I.J. Bunin // J. Advanc. Mater. – 1994. – V.1. – №3. – P. 230.
5. Bobro Yu.G. Determination of the fractal surfaces indexes according to SEM-stereo measurements / Yu.G. Bobro, V.N. Melnik, A.V. Shostak, V.U. Voloshin // Metally. – 1999. – №3. – P. 109-113. (Rus.)
6. Trefilov V.I. The fractal dimension of fracture surfaces / V.I. Trefilov, V.V. Kartuzov, N.V. Minakov // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. – 2001. – №3. – P. 10-13. (Rus.)
7. Ivaschenko V.Yu. The influence of TCT on the properties of roller's steel / V.Yu. Ivaschenko // Zakhist metalurgii i mashin vid polomok : Interuniversity thematic collection of scientific papers / PGU. – Mariupol, 2000. – №. 5. – P. 257-261. (Rus.)
8. Ivaschenko V.Yu. The influence of TCT with variable parameters on the state of the substructure and the properties of roller's steel / V.Yu. Ivaschenko, F.K. Tkachenko // Novi materialy i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni. – 2004. – №2. – P. 16-18. (Rus.)
9. Fedyukin V.K. Thermocyclic treatment of metals and machine parts / V.K. Fedyukin, M.E. Smagorinskiy. – L. : Mashinostroenie, 1989. – 255 p. (Rus.)

Рецензент: Л.С. Малінов  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 24.11.2014

УДК 669.15-194.57:620.186

© Грешта В.Л.\*

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ  
ХОЛОДНОКАТАНИХ ЛИСТОВИХ ФЕРИТНИХ  
КОРОЗИЙНОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ**

*В роботі досліджено вплив термічної обробки гарячекатаного підкату на структуру холоднокатаних листових феритних корозійностійких сталей. Встановлено, що оптимальним варіантом попередньої термічної обробки гарячекатаного підкату є відпал при 800 °С – 4 години. Це приводить до утворення максимальної кількості карбідів, що обумовлює більш високий рівень структурної стабільності при рекристалізації (960-980 °С) холоднодеформованого металу порівняно з іншими режимами.*

**Ключові слова:** карбіди, рекристалізація, холодна деформація, домішки, мікроструктура, гартування.

*Грешта В.Л. Исследование влияния термической обработки на структуру холоднокатаных листовых ферритных коррозионностойких сталей. В работе исследовано влияние термической обработки горячекатаного подката на структуру холоднокатаных листовых ферритных коррозионностойких сталей. Установлено, что оптимальным вариантом предварительной термической обработки горячекатаного подката является отжиг при 800 °С – 4 часа. Это приводит к об-*

\* канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, greshhta@zntu.edu.ua