

УДК 621.785.54:543.442.3

## ВПЛИВ ТЕРМООБРОБКИ З РІЗНИМИ ШВИДКОСТЯМИ НАГРІВАННЯ НА СУБСТРУКТУРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛІ

О. Є. Вуєць, асп.,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

*Анотація.* На основі рентгеноструктурних досліджень встановлено позитивний вплив швидкісного нагрівання під час відпуску на субструктурний стан сталі 15Х11МФ: розмір областей когерентного розсіяння (ОКР), величину мікродеформації кристалічної ґратки та густину дислокацій.

*Ключові слова:* гартування, відпуск, пічне нагрівання, нагрівання струмами високої частоти (СВЧ), субструктурні характеристики.

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ С РАЗНЫМИ СКОРОСТЯМИ НАГРЕВА НА СУБСТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛИ

А. Е. Вуец, асп.,

Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»

*Аннотация.* На основе рентгеноструктурных исследований установлено положительное влияние скоростного нагрева во время отпуска на субструктурные характеристики стали 15Х11МФ: размер областей когерентного рассеяния (ОКР), величину микродеформации кристаллической решетки и плотность дислокаций.

*Ключевые слова:* закалка, отпуск, печной нагрев, нагрев токами высокой частоты (ТВЧ), субструктурные характеристики.

## THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT WITH DIFFERENT HEATING RATES ON SUBSTRUCTURE CHARACTERISTICS OF STEEL

O. Vuiets, P. G.,

National Technical University «Kharkiv Politechnical Institute»

*Abstract.* On the basis of x-ray studies there have been found positive effects of high-speed heating during tempering at substructural characteristics of steel 15H11MF: the size of coherent scattering regions, the magnitude of the crystal lattice microstrain and dislocation density value.

*Key words:* quenching, tempering, heat in the furnace, heating of high-frequency currents, substructure characteristics.

### Вступ

Для сучасного машинобудування одним з найважливіших завдань є введення прогресивних методів обробки деталей для підвищення їх поверхневої міцності, що дає значно меншу вірогідність швидкого зносу поверхні під час експлуатації.

Одним із прогресивних методів обробки кромки лопаток парових турбін з метою під-

вищення їх ерозійної стійкості є поверхневе гартування з використанням швидкісного нагрівання струмами високої частоти (СВЧ). Через великі габарити робочих лопаток проведення подальшого пічного відпуску для зняття залишкових напружень є трудомісткою та економічно не вигідною операцією.

Однією з методик, що дозволяє вирішити цю проблему, є використання заключної операції локального швидкісного відпуску кромки

з нагріванням СВЧ. Всупереч тому, що під час нагрівання в печі обов'язковими є тривалі витримки в області температур відпуску, за високочастотного нагрівання виявляється можливим отримання високих механічних властивостей після відпуску, тривалість якого досить мала.

### Аналіз публікацій

В роботах [1–3] описане використання швидкісних нагрівань ( $V_{\text{нагр}} > 100 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$ ) для відпуску загартованих сталей, але здебільшого зразки були виготовлені зі сталевих проволочок малого діаметра і прогрівалися наскрізь за допомогою електроконтактного нагрівання.

### Мета і постановка завдання

Метою роботи є дослідження впливу швидкості нагрівання під час термообробки (гартування та відпуску) на субструктурні характеристики конструкційної сталі 15X11МФ, що широко застосовується в турбінобудуванні для виготовлення робочих лопаток парових турбін.

### Методика дослідження

Термічна обробка та подальший рентгеноструктурний аналіз проводились на зразках зі сталі 15X11МФ у вихідному стані після поліпшення – гартування в печі  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$  (масло) + пічний відпуск  $680 \text{ }^\circ\text{C}$ . Розмір зразків –  $20 \times 30 \times 5 \text{ мм}$ .

Швидкісне нагрівання проводилось за допомогою генератора струмів високої частоти ВЧГ-60/0,44 (частота  $\nu = 440 \text{ КГц}$ ) з використанням прямого мідного індуктора діаметром 6 мм. Для отримання високих показників питомої потужності на індукторі застосовувався феритовий магнітопровід.

Зразки піддавались поверхневому гартуванню з використанням СВЧ – нагрівання до  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$  зі швидкістю  $V_{\text{нагр}} \approx 1000 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$  та подальше охолодження водяним спреєром (рис. 1,а). Через достатньо високу частоту генератора СВЧ товщина загартованого шару –  $h \approx 1 \text{ мм}$ , що становить 20 % від загальної товщини зразка. Проміжок між індуктором та поверхнею зразків складав  $z \approx 0,95 \text{ мм}$ , швидкість переміщення зразків уздовж індуктора –  $V_{\text{пер}} \approx 5,75 \text{ мм}/\text{c}$ .

Для порівняння було проведено об'ємне гартування в печі від температури  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$  з охолодженням у маслі (рис. 1,б).

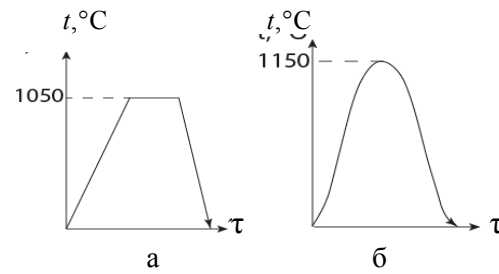


Рис. 1. Схема проведення гартування: а – у печі; б – за допомогою СВЧ

Після гартування з різними швидкостями нагрівання був проведений відпуск за двома методиками (рис. 2 та 3) – з повільним пічним нагріванням ( $V_{\text{нагр}} \approx 0,1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$ ) та швидкісним за допомогою СВЧ ( $V_{\text{нагр}} > 100 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$ ). Швидкісний відпуск СВЧ проводився за тих же технологічних параметрів, що і гартування ( $\nu$ ,  $z$ ,  $V_{\text{пер}}$ ), лише з пониженням питомої потужності генератора для досягнення заданої температури відпуску в поверхневому шарі. Попередньо загартований СВЧ шар був рівномірно прогрітий на задану глибину ( $h \approx 1 \text{ мм}$ ) до температур відпуску, що підтверджується результатами математичного моделювання [4]. Для визначення температури на поверхні зразків під час нагрівання СВЧ використовувались окремі термомпари із записом кривої нагрівання на комп'ютері через аналогово-цифровий перетворювач.

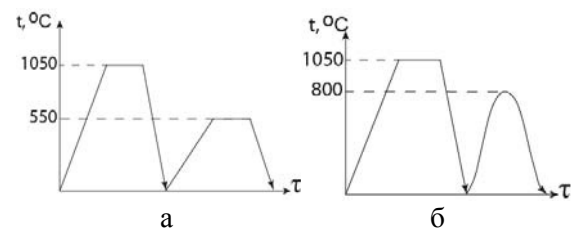


Рис. 2. Схема пічного гартування та подальшого відпуску: а – пічний відпуск  $550 \text{ }^\circ\text{C}$ ; б – відпуск СВЧ  $800 \text{ }^\circ\text{C}$

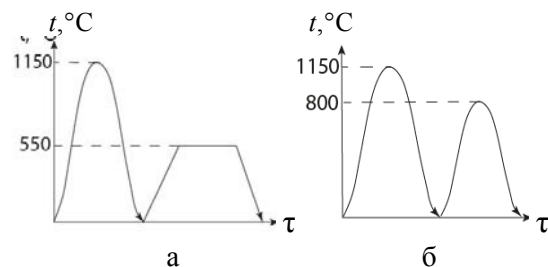


Рис. 3. Схема гартування СВЧ та подальшого відпуску: а – пічний відпуск  $550 \text{ }^\circ\text{C}$ , б – відпуск СВЧ  $800 \text{ }^\circ\text{C}$

Через очевидну різницю значень субструктурних характеристик під час проведення відпуску з різними швидкостями нагрівання за однакової температури критерієм порівняння впливу швидкості нагрівання було обрано твердість поверхневих шарів (HRC). Тому температури відпуску були підібрані з використанням результатів попередніх досліджень впливу температури та швидкості нагрівання на твердість сталі 15X11МФ [5] (рис. 4).

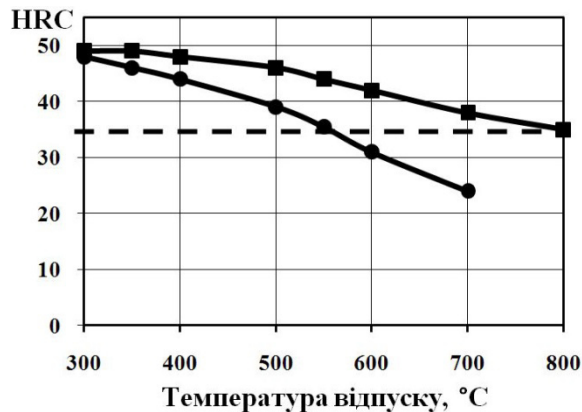


Рис. 4. Вплив температури та швидкості нагрівання під час відпуску на твердість сталі 15X11МФ: ■ – відпуск СВЧ; ● – пічний відпуск

З рис. 4 видно, що твердість 34-35 HRC може бути досягнута шляхом швидкісного відпуску СВЧ 800 °C або пічного відпуску 550 °C. Саме ці дані і було покладено в основу подальшого порівняльного дослідження.

Для попередження впливу недоліків термічної обробки на результати рентгеноструктурного аналізу усі зразки перед аналізом були піддані електролітичному поліруванню. Зйомка спектрів дифракційних ліній проводилась на установці ДРОН-3 в  $\lambda$ -Сг випромінюванні. За допомогою рентгеноструктурного аналізу для кожного із дослідних зразків були отримані значення розширення дифракційних максимумів інтерференційних ліній (110) та (211). Після визначення істинного фізичного розширення  $\beta_1$  та  $\beta_2$  було проведено якісне оцінювання частки впливу факторів розміру кристалітів та мікродеформації [6]. В усіх випадках співвідношення істинних фізичних розширень знаходиться між співвідношенням косинусів та тангенсів (1).

$$\frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} < \frac{\beta_2}{\beta_1} < \frac{\operatorname{tg} \theta_2}{\operatorname{tg} \theta_1} \quad (1)$$

Отже, фізичне розширення ліній викликане як мікродеформацією, так і подрібненням кристалітів.

Методом апроксимації (функції Коші та Гаусса) були визначені розміри областей когерентного розсіяння та значення мікродеформацій кристалічної ґратки. Густина дислокацій (з точністю до напівпорядку) розраховувалась за формулою (2) [6]

$$\rho = \frac{4}{s} \frac{\operatorname{ctg}^2 \theta}{b^2} \beta^2, \quad (2)$$

де  $b$  – вектор Бюргерса,  $\beta$  – фізичне розширення, рад.

### Результати дослідження

На рис. 5 та 6 наведені порівняльні діаграми впливу швидкості нагрівання під час гартування та відпуску на субструктурні характеристики сталі 15X11МФ.

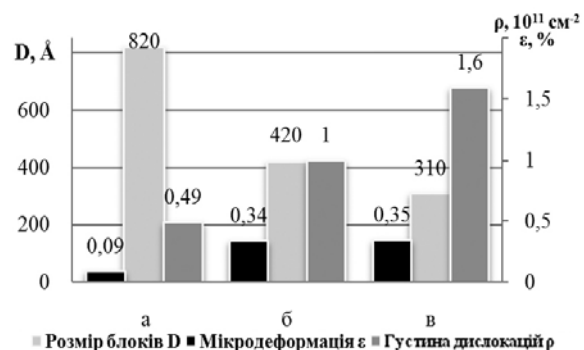


Рис. 5. Субструктурні характеристики сталі 15X11МФ у вихідному стані та після гартування з різними швидкостями нагрівання: а – вихідний стан; б – пічне гартування; в – гартування СВЧ

Гартування в печі і за допомогою СВЧ порівняно із вихідним станом приводить до подрібнення блочної структури майже у 2–2,5 рази, збільшення показників мікродеформації – у 3,5 рази та густини дислокацій у – 2–3 рази. Через високу швидкість нагрівання гартування СВЧ приводить до отримання більш розвиненої субструктури, на відміну від пічного гартування (менший розмір блоків, густина дислокацій більша у 1,5 рази). Це пояснюється тим, що внаслідок високої швидкості нагрівання аустенітне зерно подрібнюється і спадково передається отриманому після гартування СВЧ дрібногочлатому мартенситу.

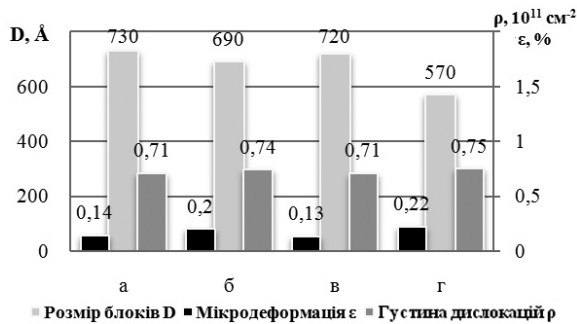


Рис. 6. Субструктурні характеристики сталі 15X11MФ після термообробки з різними швидкостями нагрівання: а – пічне гартування і пічний відпуск 550 °С; б – пічне гартування і відпуск СВЧ 800 °С; в – гартування СВЧ і пічний відпуск 550 °С; г – гартування СВЧ і відпуск СВЧ 800 °С

Після гартування обох типів відпуск з різними швидкостями нагрівання на однакову твердість призводить до збільшення розміру блоків і зменшення мікродеформації та густини дислокацій. Порівнюючи обидва типи відпуску після обох типів гартування, помітно, що відпуск СВЧ в порівнянні з пічним приводить до затримки процесів релаксації мікронапружень та процесів збільшення блоків  $\alpha$ -фази. Це пояснюється набагато меншим часом витримки в інтервалі відпускових температур при нагріванні СВЧ ( $\tau \approx 1-2$  с).

Незалежно від типу гартування подальший пічний відпуск приводить до отримання рівноважної структури майже з однаковими значеннями субструктурних характеристик, що пояснюється тривалою витримкою ( $\tau = 2$  години) в печі (рис. 6, а, в).

Порівнюючи субструктурні характеристики після гартування з різними швидкостями нагрівання в поєднанні з відпуском СВЧ, бачимо (рис. 6, б, г), що більш високі показники мікродеформації, густини дислокацій та високодисперсну блочну структуру  $\alpha$ -фази мають зразки, що піддавалися послідовному гартуванню та швидкісному відпуску за допомогою СВЧ. Попереднє гартування СВЧ внаслідок короткочасної витримки при аустенізації дозволило зберегти більш високу дисперсність блоків.

### Висновки

Застосування високої швидкості нагрівання у процесі відпуску ( $V_{\text{нагр}} > 100$  °С/с) приводить

до отримання такого структурного стану в сталі, що в порівнянні зі звичайним пічним відпуском характеризується більш високими значеннями мікродеформації кристалічної ґратки, густини дислокацій і вищим ступенем дисперсності когерентних областей (блоків). З досліджених типів термообробки проведення поверхневої комплексної швидкісної термообробки за допомогою СВЧ (гартування та відпуску) приводить до отримання найбільш розвиненої субструктури в сталі, що, вочевидь, сприятиме отриманню вигідного поєднання властивостей міцності і пластичності порівняно із традиційною об'ємною термообробкою в печі.

### Література

1. Физические основы электротермического упрочнения стали / В. Н. Гриднев и др. – К.: Наукова думка, 1973. – 336 с.
2. Головин Г. Ф. Высокочастотная термическая обработка: вопросы металлостроения и технологии / Г. Ф. Головин, М. М. Замятин. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1990. – 240 с.
3. Белоус М. В. Превращение при отпуске стали / М. В. Белоус, В. Т. Черепин, М. А. Васильев. – М.: Металлургия, 1973. – 232 с.
4. Погрібний М. А. Математичне моделювання температурних полів під час відпуску з нагріванням струмами високої частоти / М. А. Погрібний, О. Є. Вуєць // Проблеми машиностроения. – 2013. – Т. 16, № 2. – С. 11–18.
5. Вуєць О. Є. Особливості формування структур та властивостей сталей при відпуску в умовах швидкісного нагріву / О. Є. Вуєць, М. А. Погрібний // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XVIII Міжнародної науково-практичної конференції 12–14 травня 2010 р., Харків. Ч. II. – Х., 2010. – С. 13.
6. Металловедение и термическая обработка стали: справ. изд.: в 3 т. / под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – Т. 1. Методы испытаний и исследования. – 1983. – 352 с.

Рецензент: С. С. Дьяченко, професор, д. т. н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 28 січня 2014 р.