

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 – $V_{\text{пер}} \approx 5,75 \text{ мм}/\text{с}$.

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

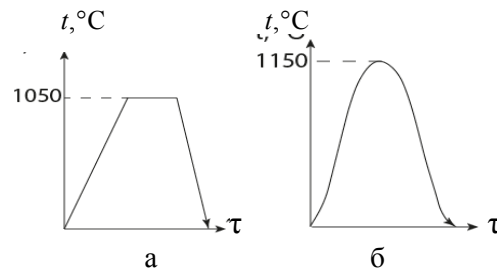


Рис. 1. Схема проведення гартування: а – у печі; б – за допомогою СВЧ

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 (ν , 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.

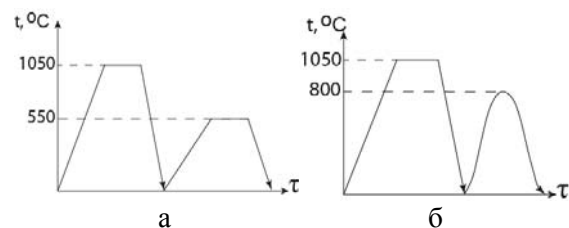


Рис. 2. Схема пічного гартування та подальшого відпуску: а – пічний відпуск $550 \text{ }^\circ\text{C}$; б – відпуск СВЧ $800 \text{ }^\circ\text{C}$

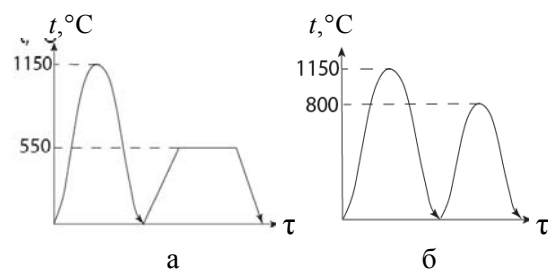


Рис. 3. Схема гартування СВЧ та подальшого відпуску: а – пічний відпуск $550 \text{ }^\circ\text{C}$, б – відпуск СВЧ $800 \text{ }^\circ\text{C}$

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).

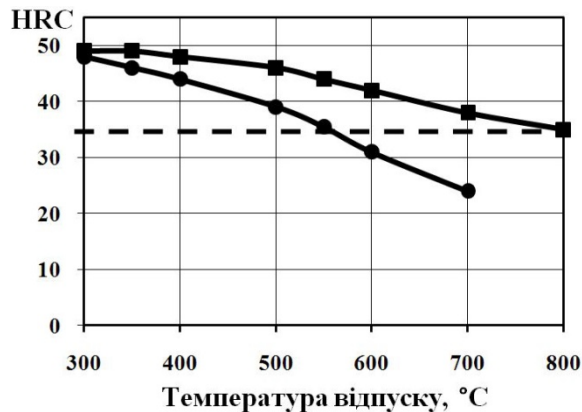


Рис. 4. Вплив температури та швидкості нагрівання під час відпуску на твердість сталі 15X11МФ: ■ – відпуск СВЧ; ● – пічний відпуск

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 λ -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 β_1 та β_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, β – 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.

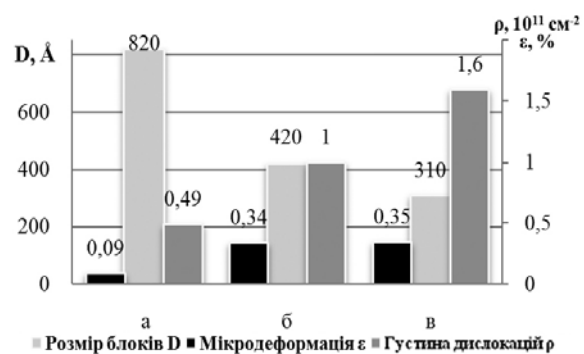


Рис. 5. Субструктурні характеристики сталі 15X11МФ у вихідному стані та після гартування з різними швидкостями нагрівання: а – вихідний стан; б – пічне гартування; в – гартування СВЧ

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.

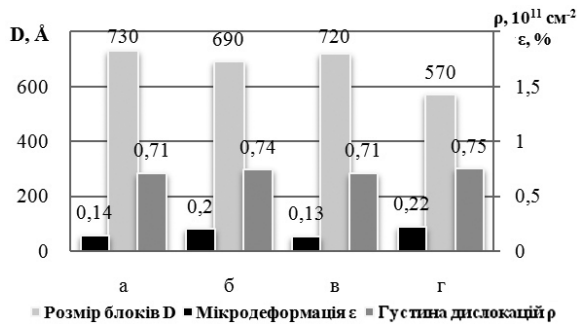


Рис. 6. Субструктурні характеристики сталі 15X11MF після термообробки з різними швидкостями нагрівання: а – пічне гартування і пічний відпуск 550 °С; б – пічне гартування і відпуск СВЧ 800 °С; в – гартування СВЧ і пічний відпуск 550 °С; г – гартування СВЧ і відпуск СВЧ 800 °С

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 α -фази. Це пояснюється набагато меншим часом витримки в інтервалі відпускних 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 α -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.