

УДК 621.785.54:620.17

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІДПУСКУ З РІЗНИМИ ШВИДКОСТЯМИ НАГРІВАННЯ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ

**М.А. Погрібний, к.т.н., О.Є. Вуець, м.н.с.,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»**

***Анотація.** Досліджено механічні властивості конструкційної високолегованої сталі 15Х11МФ після відпуску з різними швидкостями нагрівання (повільне пічне та швидкісне нагрівання за допомогою струмів високої частоти). Розроблено методику швидкісного відпуску зразків. Проведено порівняльний аналіз механічних властивостей після відпуску з різними швидкостями нагрівання.*

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТПУСКА С РАЗНЫМИ СКОРОСТЯМИ НАГРЕВА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ

**Н.А. Погребной, к.т.н., А.Е. Вуец, м.н.с.,
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»**

***Аннотация.** Исследованы механические свойства конструкционной высоколегированной стали 15Х11МФ после отпуска с различными скоростями нагрева (медленный печной и скоростной нагрев с помощью токов высокой частоты). Разработана методика скоростного отпуска образцов. Проведен сравнительный анализ механических свойств после отпуска с различными скоростями нагрева.*

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

STUDY OF THE INFLUENCE OF TEMPERING WITH DIFFERENT HEATING RATES ON MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL

**N. Pogrebnoy, Cand. Sc. (Eng.), O. Vuiets, J. Researcher,
National Technical University «Kharkiv Politechnical Institute»**

***Abstract.** The mechanical properties of structural steel 15H11MF after tempering with different heating rates (slow oven and rapid heating by applying high frequency currents) are studied. A method of high-speed tempering of samples is developed. Comparative analyses of mechanical properties after tempering with different heating rates is carried out.*

***Key words:** quenching, tempering, heat in the furnace, heating by high-frequency currents, mechanical properties.*

Вступ

Найважливішою вимогою, що висувається до конструкційних матеріалів, є їх надійність у виробі, що забезпечується оптимізацією властивостей міцності, пластичності та

в'язкості. Одним зі способів зміцнення поверхні є термічна обробка за допомогою струмів високої частоти (СВЧ). Найчастіше нагрівання СВЧ використовується для поверхневого гартування, після якого деталь набуває високої твердості та істотної зносо-

стійкості, а серцевина залишається досить пластичною, здатною сприймати динамічні та знакозмінні навантаження.

Аналіз публікацій

На основі дослідження фізичної природи явищ, що відбуваються при нагріванні зі швидкістю вище $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, в роботах [1, 2] було виявлено фактори, що забезпечують високу конструкційну та експлуатаційну міцність, пластичність сталей, визначено шляхи реалізації цих властивостей.

Мета та постановка завдання

Метою роботи було дослідження та порівняння механічних властивостей сталі 15X11МФ, що використовується у турбінобудуванні, після термообробки (гартування та відпуск) з різними швидкостями нагрівання.

Методика швидкісної термообробки та механічні дослідження

Швидкісне нагрівання проводилось за допомогою генератора струмів високої частоти ВЧГ-60/0,44 (частота струму – 440 кГц) з використанням прямого та багатовиткового (для термообробки зразків на розтяг) мідного індуктора діаметром 6 мм . Усі зразки зі сталі 15X11МФ ($A_{с3} = 880\text{ }^{\circ}\text{C}$) піддавались попередньому гартуванню СВЧ та подальшому відпуску з різними швидкостями нагрівання в інтервалі температур $300\text{--}850\text{ }^{\circ}\text{C}$. Швидкість нагрівання СВЧ під час гартування становила приблизно $1000\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, під час відпуску – $500\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ залежно від температури.

Механічні випробування циліндричних зразків після різних типів термообробки (робоча частина зразків рівномірно прогрівалась наскрізь як при пічному, так і при швидкісному нагріванні СВЧ) проводились за кімнатної температури в режимі активного розтягування на універсальній установці TIRATEST-2300. Довжина робочої частини зразків становила 40 мм , діаметр – 4 мм [3]. Після випробування за первинними діаграмами визначали характеристики міцності ($\sigma_b, \sigma_{0,2}$) та пластичності (δ, ψ).

Через очевидну різницю значень механічних властивостей при проведенні відпуску за однакової температури, але з різними швидкостями нагрівання, критерієм порівняння

властивостей сталі після різних типів термообробки було обрано не температуру, а твердість поверхневих шарів.

Випробування для визначення показників ударної в'язкості проводились на маятниковому копрі з використанням стандартних зразків на ударний згин із U -подібним концентратором [4]. Ударні зразки не мали концентратора під час термообробки. Відмова від зразків з надрізом дозволила уникнути не-однорідностей у структурі або навіть оплавлення в зоні надрізу, внаслідок підвищеної концентрації поверхневих струмів та складного тепловідводу при нагріванні СВЧ, що, безумовно, спотворило б результати випробувань. Термічна обробка за допомогою СВЧ проводилась із двох протилежних сторін зразка послідовно і рівномірно на задану глибину $h \approx 1\text{ мм}$. Рівномірність прогрівання шару було обрано на основі результатів математичного моделювання [5]. Вже після цього був вирізаний концентратор для проведення випробувань (рис. 1).

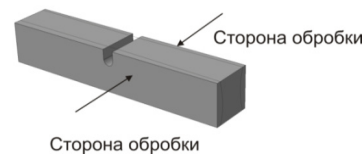


Рис. 1. Сторони, що підлягають термічній обробці при нагріванні СВЧ, та розташування концентратора

Випробування на зносостійкість проводились в умовах тертя на установці СМЦ-2 за різновидом схеми «диск–колодка»; колодка – зразок зі сталі 15X11МФ, диск – СЧ40 [6].

Для визначення особливостей будови зламів ударних зразків був застосований електронний растровий мікроскоп РЕММА-101А.

Результати дослідження

За однакової температури твердість після відпуску за допомогою СВЧ вища, ніж після пічного у всьому інтервалі температур (рис. 2). Це пояснюється зменшенням часу витримки під час нагрівання СВЧ та зменшенням інтервалу відпускних перетворень у бік більш високих температур. Зразки після різних типів відпуску були згруповані за однаковими значеннями твердості у певних інтервалах. У табл. 1 наведено значення механічних властивостей сталі 15X11МФ після випробувань на розтяг.

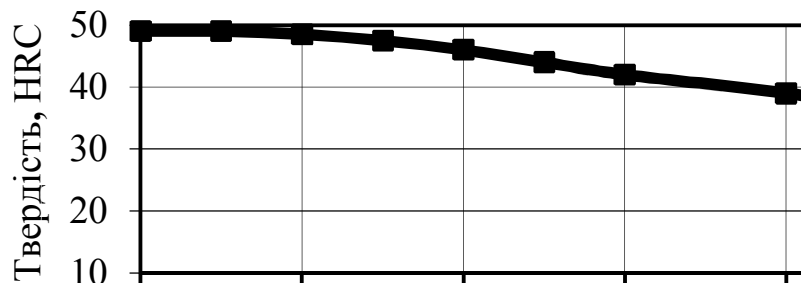


Рис. 2. Вплив температури та швидкості нагрівання під час відпуску на твердість сталі 15X11МФ: ■ – відпуск СВЧ; ● – пічний відпуск

Таблиця 1 Механічні властивості сталі 15X11МФ після відпуску з різними швидкостями нагрівання

Гартування СВЧ +	HRC	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Пічний відпуск 300 °C	48–49	1450	900	9	40
Відпуск СВЧ 450 °C		1500	920	13	45
Пічний відпуск 500 °C	40–41	1300	800	14	44
Відпуск СВЧ 600 °C		1350	860	18	49
Пічний відпуск 600 °C	30–31	1000	650	18	50
Відпуск СВЧ 850 °C		1000	670	21	56

Як видно, за однакової твердості характеристики міцності ($\sigma_{\text{в}}$, $\sigma_{0,2}$) майже однакові, а характеристики пластичності (δ , ψ) вище саме після відпуску з нагріванням СВЧ, що сприяє отриманню кращого комплексу характеристик міцності і пластичності, порівняно з пічним.

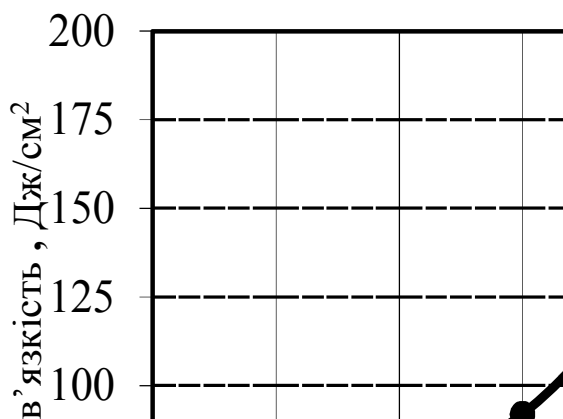


Рис. 3. Вплив температури відпуску при нагріванні в печі та СВЧ на ударну в'язкість сталі 15X11МФ: ■ – відпуск СВЧ; ● – пічний відпуск

В інтервалі температур 300–600 °C спостерігаються підвищені показники ударної в'язкості після пічного відпуску, порівняно з відпуском СВЧ, що пояснюється більшим часом витримки і більшим рівнем розпаду

мартенситу гартування (рис. 3). В інтервалі 600–850 °C спостерігається різке збільшення показників ударної в'язкості після пічного відпуску, а короточасний відпуск СВЧ, стримуючи більший розпад мартенситу, зберігає більш плавний характер зростання ударної в'язкості. Більш детальний аналіз результатів випробування на ударний згин може дати діаграма «Твердість – ударна в'язкість», що наведена на рис. 4.

З діаграми видно, що при термообробці на однакову твердість після швидкісного відпуску з нагріванням СВЧ у сталі 15X11МФ можна отримати більш високу в'язкість, і навпаки – за однакової ударної в'язкості – різну твердість.

Таким чином, результати проведених досліджень ударної в'язкості свідчать про те, що за тієї самої твердості після відпуску СВЧ досягається менш крихкий стан сталі з меншою ймовірністю появи тріщин. Це узгоджується з результатами механічних випробувань на розтяг і пояснюється збереженням дрібнодисперсних складових – фериту та карбідів (рис. 5) і більш розвиненою субструктурою [7] після відпуску СВЧ, що зумовлено високою швидкістю нагрівання та відсутністю витримки в області температур відпуску.

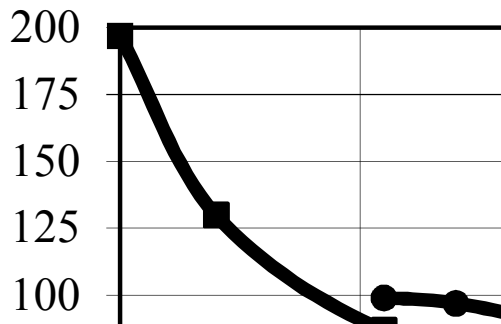
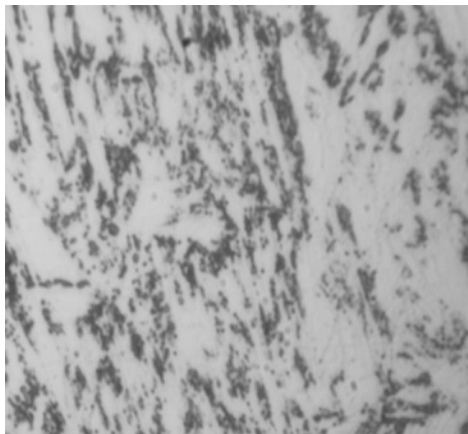
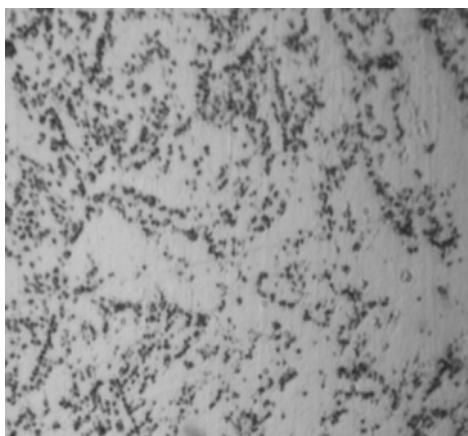


Рис. 4. Діаграма «Твердість – ударна в'язкість» для зразків зі сталі 15X11МФ після відпуску з різними швидкостями нагрівання: ■ – відпуск СВЧ; ● – пічний відпуск



а



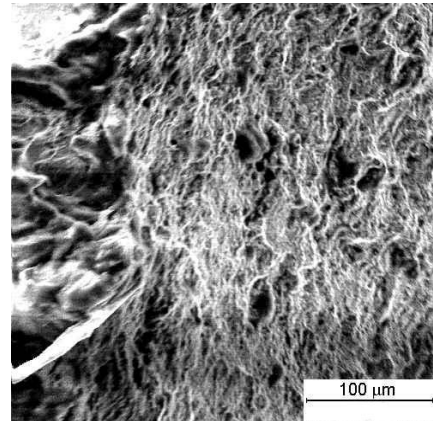
б

Рис. 5. Мікроструктура сталі 15X11МФ після гартування СВЧ та подальшого відпуску на твердість 40–41 HRC: а – пічний відпуск 500 °С; б – відпуск СВЧ 600 °С (×2000)

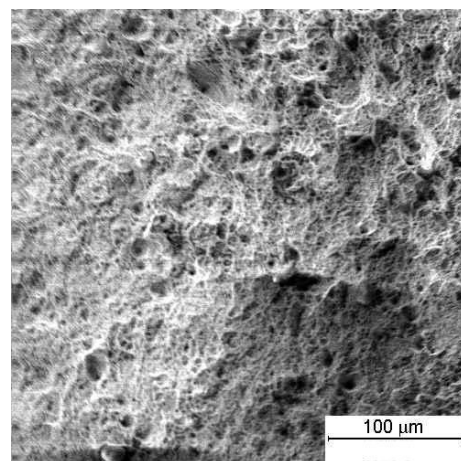
Для оцінки характеру руйнування злами досліджувались за допомогою РЕМ (рис. 6).

Після пічного відпуску 500 °С спостерігається (рис. 6, а) мікрорельєфний злам та ділянки з розвиненим мікрорельєфом – ямки та гребені.

Бокові скоси зламу мають рівноосну ямкову мікробудову, яка формується під дією нормальних розтяжних напружень. На відміну від цього, у зразку після відпуску СВЧ 600 °С спостерігається (рис. 6, б) більш дрібнозернистий злам, із глибокими ямками. Це свідчить про більш енергоємний процес утворення тріщини, що і підтверджується показниками ударної в'язкості.



а



б

Рис. 6. РЕМ зламів після гартування СВЧ та відпуску з різними швидкостями нагрівання: а – пічний відпуск 500 °С; б – відпуск СВЧ 600 °С

Вплив термообробки з різними швидкостями нагрівання показаний на рис. 7. З нього видно, що зносостійкість в умовах тертя поверхневих шарів зразків, що піддавалися відпуску за допомогою швидкісного нагрівання СВЧ, вища, ніж після пічного відпуску на аналогічну твердість. Це пов'язано з більш високою дисперсністю структурних складових і більш розвиненою субструктурою, які сформувалися завдяки впливу високої швидкості нагрівання.

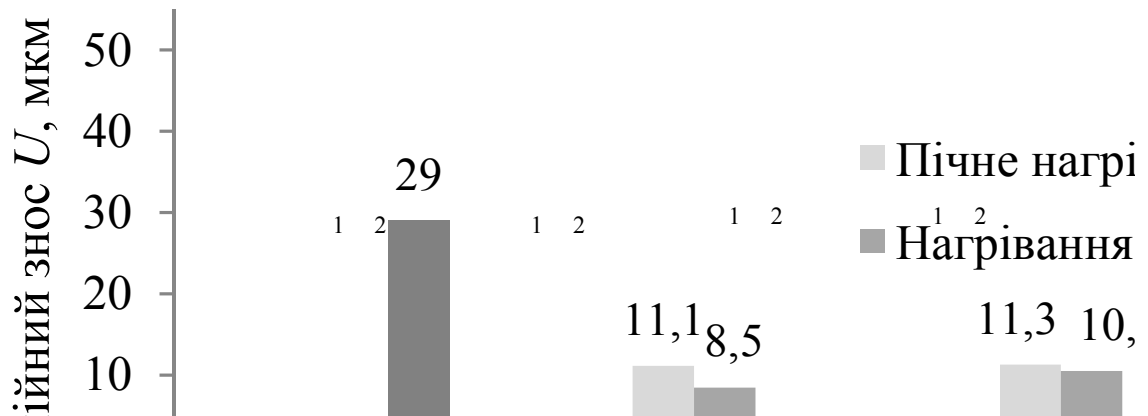


Рис. 7. Діаграма розподілу лінійного зносу U після різних режимів термічної обробки сталі 15X11MФ

Наявність у структурі твердих частинок (карбідів) дозволяє локалізувати захоплення на малих ділянках поверхні, уникнути заїдання та знизити інтенсивність зношування. Крім того, висока дисперсність мікроструктури після швидкісного нагрівання СВЧ приводить до того, що зерна мають більшу поверхню дотику одне до одного. Це також сприяє меншому викришуванню і підвищенню показників зносостійкості матеріалу в порівнянні з відпуском в печі [6].

Висновки

Швидкісне нагрівання під час відпуску дозволяє отримати краще співвідношення показників твердості та пластичності у сталі 15X11MФ, забезпечуючи тим самим високий запас стійкості сталі в умовах крихкого руйнування. Проведення відпуску СВЧ забезпечує також високі показники зносостійкості. Все це дозволяє рекомендувати використання відпуску з нагрівом СВЧ при термічній обробці виробів зі сталі 15X11MФ для підвищення їх конструкційної міцності в умовах інтенсивного зносу, в тому числі й ерозійного.

Література

1. Головин Г.Ф. Высокочастотная термическая обработка: Вопросы металлостроения и технологии / Г.Ф. Головин, М.М. Замятин. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 240 с.

2. Гриднев В.Н. Физические основы электро-термического упрочнения стали / В.Н. Гриднев. – К.: Наукова думка, 1973. – 336 с.

3. Металлы. Методы испытаний на растяжение: ГОСТ 1497-84. – Взамен ГОСТ 1497-73; введ. 1986-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 24 с.

4. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах: ГОСТ 9454-78. – Введ. 1979-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 12 с.

5. Погрібний М. А. Математичне моделювання температурних полів під час відпуску з нагріванням струмами високої частоти / М. А. Погрібний, О. Є. Вуець // Проблемы машиностроения. – 2013. – Т. 16, №2. – С. 11–18.

6. Погрібний М.А. Дослідження впливу термічної обробки з різними швидкостями нагрівання на зносостійкість сталі 15X11MФ / М.А. Погрібний, О.Є. Вуець // Металознавство та обробка металів. – 2014. – №4. [у друку]

7. Вуець О.Є. Вплив термообробки з різними швидкостями нагрівання на субструктурні характеристики сталі / Вуець О.Є. // Вестник ХНАДУ: зб. наук. пр. – 2014. – Вып. 64. – С. 37-40.

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

Стаття надійшла до редакції 1 грудня 2014 р.