

Вплив термічної обробки на зносостійкість сталі 15Х11МФ

М. А. Погрібний, кандидат технічних наук
О. Є. Вуєць

Національний технічний університет «ХПІ», Харків

Досліджено зносостійкість поверхневих шарів сталі 15Х11МФ після гартування та відпуску з різними швидкостями нагрівання (повільне пічне нагрівання та швидкісне нагрівання за допомогою струмів високої частоти). Розроблені методики швидкої термообробки та випробувань на зносостійкість дозволяють порівняти зносостійкість поверхневих шарів після різних видів термообробки на однакову твердість.

Відомі приклади, коли поверхня виробів, які піддаються термообробці на високу твердість, руйнуються вже на початкових стадіях тертя [1]. Водночас матеріали з меншими показниками твердості, які мають у структурі оптимальне співвідношення твердих та м'яких структурних складових характеризуються достатньо високою зносостійкістю. Саме таке співвідношення, а також поєднання високих показників міцності та пластичності можна отримати в сталях за рахунок швидкісного нагрівання ($V_{\text{нагр}} > 100 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$) під час відпуску [2, 3].

Метою дослідження є порівняння зносостійкості поверхневих шарів виробів після термічної обробки за умов швидкісного нагрівання струмом високої частоти (СВЧ) та повільного нагрівання в печі. Дослідження проводили на зразках зі сталі 15Х11МФ, що широко використовується у турбінобудуванні. Високочастотну обробку виконували за допомогою генератора струмів високої частоти ВЧГ6-60/0,44 при безперервно-поступовому русі зразків відносно прямого мідного індуктора діаметром 6 мм. Зразки піддавали гартуванню СВЧ з нагрівом до $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ і охолодженням у воді. Глибина зміцненого шару при цьому складала $\approx 1 \text{ мм}$. Методика проведення наступного відпуску за допомогою СВЧ включала вибір режимів швидкісного нагрівання шляхом регулювання зазору між індуктором і поверхнею деталі та вибором потужності високочастотного генератора. В залежності від температури відпуску робоча потужність коливалась в межах 15 – 25 % від нормативної потужності генератора при величині зазору 0,95 мм. Швидкість нагрівання під час гартування складала приблизно $1000 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, під час відпуску – $500 - 800 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ в залежності від температури. Методика підбору режимів термічної обробки зразків передбачала також отримання однакової твердості в межах гартованого шару після проведення різних видів відпуску. Використані режими термічної обробки наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Режими термічної обробки зразків зі сталі 15X11МФ з використанням пічного та СВЧ нагрівання для отримання однакової твердості поверхневого шару

Режими термічної обробки			Твердість HRC
Вихідний стан – пічне гартування 1050 °С + пічний відпуск 680 °С			26 – 27
Пічне гартування 1050 °С (масло)			47 – 48
Гартування СВЧ 1150 °С (вода)			50 – 51
Гартування СВЧ 1150 °С + відпуск СВЧ	Твердість HRC	Гартування СВЧ 1150 °С + пічний відпуск	Твердість HRC
450 °С	48 – 49	300 °С	48 – 49
600 °С	40 – 41	500 °С	40 – 41
800 °С	34 – 35	550 °С	34 – 35

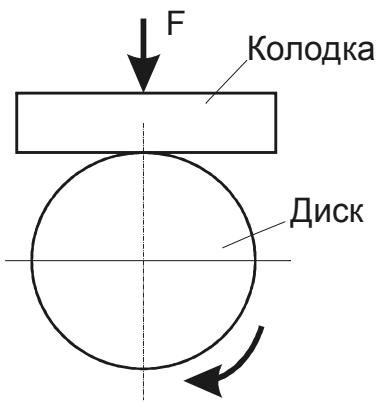


Рис.1. Схема випробування на зношування.

Порівняльні випробування на зносостійкість проводили в умовах тертя на установці СМЦ-2 за різновидом схеми «диск-колодка», в якому колодка була виконана у вигляді прямокутного зразка із дослідної сталі. Зношування проходило по лінії дотику, на якій попередньо були зроблені відбитки алмазним індентором твердоміра типу Віккерс. Схема випробування на зношування приведена на рис. 1.

Усі зразки підлягали випробуванню на зношування за однакових умов: навантаження – 70 кг/см², матеріал диску – сірий чавун СЧ40, швидкість обертання диску – 300 хв⁻¹, час випробування – 30 хв, діаметр диску – 42 мм, шлях тертя для усіх зразків складав 1,2 км, змащування – індустріальне масло І-20. Режими підбирали таким чином, що усі зразки в кінці експерименту знаходились на стадії нормального зношування [1].

Лінійне зношування (U) вимірювали перпендикулярно поверхні, що зношується. Для вимірювання величини зносу використовувався метод «штучних баз» [4], що полягає у визначенні зміни глибини відбитку, тобто, відстані від поверхні тертя до дна відбитку, який штучно зроблений на цій поверхні. При цьому відбиток повинен мати глибину більшу, ніж очікувана величина лінійного зношування і не порушувати службових властивостей деталей.

Величину лінійного зношування U рахували за формулою:

$$U = \Delta h = h_1 - h_2 = (d_1 - d_2)/m \quad (1)$$

Структура, зношування, руйнування

де h_1 і h_2 – глибина відбитка до і після випробування, d_1 і d_2 – діагональ відбитка до і після випробування, m – коефіцієнт пропорційності (співвідношення між діагоналлю та глибиною відбитка, $m = 7$).

Для визначення мікроструктури проводили металографічний аналіз. Субструктурні характеристики оцінювали по розширенню дифракційних ліній на рентгенограмах, що були зняті у хромовому випромінюванні на установці ДРОН-3.

Результати впливу пічної та високочастотної термічної обробки на зносостійкість високолегованої сталі 15X11МФ наведено на рис. 2.

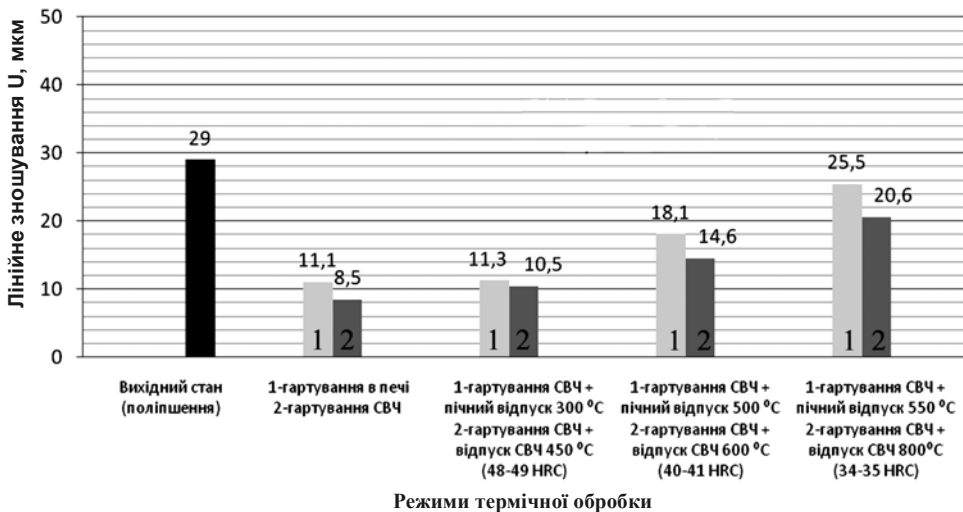


Рис. 2. Діаграма розподілу лінійного зношування U після різних режимів термічної обробки сталі 15X11МФ. ■ – пічне нагрівання, ■ – нагрівання СВЧ.

Як видно з рис. 2, гартування незалежно від способу нагрівання приблизно у 3 рази підвищує зносостійкість поверхневого шару у порівнянні з вихідним станом сталі 15X11МФ (після поліпшення). При цьому СВЧ гартування у порівнянні з пічним за рахунок високої швидкості нагрівання та короткочасної витримки приводить до помітного підвищення зносостійкості внаслідок утворення більш дисперсної структури та формування в поверхневому шарі напруг стиснення [2]. Подальший відпуск гартованого шару (як пічний так і СВЧ) на твердість 48 – 49 HRC призводить до незначного зростання лінійного зношування U , тобто зниження зносостійкості. Пояснити це можна, перш за все, падінням твердості, а незначну різницю показників в порівнянні із гартованим станом тим, що в структурі сталі при досить низьких температурах відпуску все ще зберігаються значні стискаючі залишкові напруження [2, 3].

З діаграми також видно, що зносостійкість сталі 15X11МФ, що відпущена на однакову твердість із використанням різних способів нагрівання, після швидкісного нагрівання СВЧ у всіх випадках більша,

Структура, зношування, руйнування

ніж після відпуску з нагріванням в печі. Крім того, чим менше значення твердості, тим більшою є різниця між показниками зносостійкості після швидкісного та пічного відпуску.

На рис. 3 показані мікроструктури поверхневого шару сталі 15X11МФ після відпуску з різними швидкостями нагрівання на однакову твердість 34 – 35 HRC.

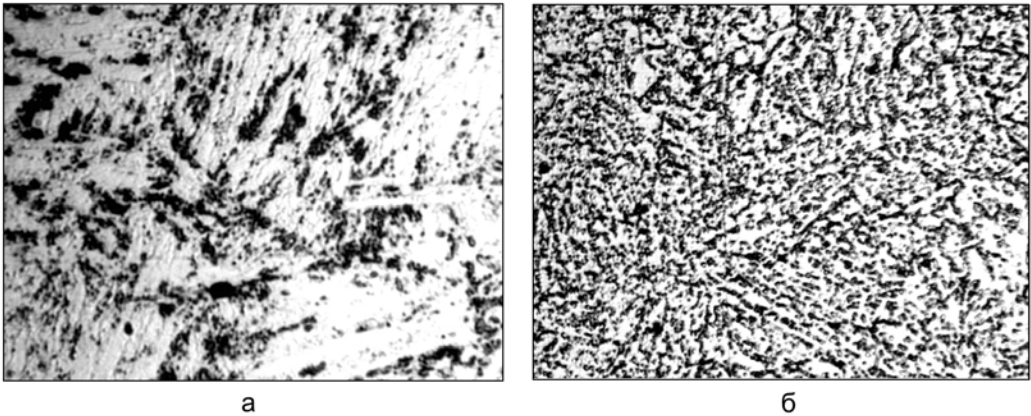


Рис. 3. Мікроструктура сталі 15X11МФ після гартування СВЧ та подальшого відпуску на твердість 34 – 35 HRC. а – пічний відпуск 550 °С, б – відпуск СВЧ 800 °С. х2000.

З рис. 3 видно, що після пічного відпуску структура має більш грубі виділення карбідної фази (рис. 3 а) на відміну від структури після відпуску СВЧ (рис. 3 б). Щодо останнього це є позитивним фактором, адже відомо [1], що достатньо високу зносостійкість мають матеріали, в яких є сприятливе поєднання в'язкої матриці та дисперсної зміцнюючої фази (в нашому випадку – феритна складова та карбіди заліза і легуючих елементів). Крім того, через особливості швидкісного нагрівання СВЧ підвищення температури під час відпуску до 800 °С приводить до виділення карбідів з відсутністю їх коалесценції, оскільки процес виділення зародків превалує над процесом їх росту [2, 3, 5].

Наявність у структурі твердих частинок (карбідів) дозволяє локалізувати захоплення на малих ділянках поверхні, уникнути заїдання та знизити інтенсивність зношування [6]. 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.

Ще одним фактором, що впливає на здатність сталі опиратися зношуванню, є субструктурний стан матеріалу [1]. Дослідження показали, що при однаковій твердості поверхні зразки, які піддавали відпуску за допомогою нагрівання СВЧ і, відповідно, характеризуються більш високою зносостійкістю, мають також більш дисперсну блочну структуру, вищі показники мікрореформації та щільності дислокацій (табл. 2).

Структура, зношування, руйнування

Таблиця 2

Характеристики субструктури сталі 15X11МФ у вихідному стані, після гартування СВЧ та відпуску з різними швидкостями нагрівання

Характеристики субструктури	Режим термічної обробки	
	Вихідний стан (Пічне гартування + пічний відпуск 680 °С)	Гартування СВЧ
Розмір ОКР D, Å	820	310
Мікродеформація ϵ , %	0,09	0,35
Щільність дислокацій ρ , см ⁻²	$0,49 \cdot 10^{11}$	$1,6 \cdot 10^{11}$
	Гартування СВЧ + пічний відпуск 550 °С	Гартування СВЧ + відпуск СВЧ 800 °С
Розмір ОКР D, Å	720	570
Мікродеформація ϵ , %	0,13	0,22
Щільність дислокацій ρ , см ⁻²	$0,71 \cdot 10^{11}$	$0,75 \cdot 10^{11}$

Наведені характеристики тонкої кристалічної будови і в першу чергу більша щільність дислокацій в зразках, що піддавали відпуску за допомогою СВЧ, свідчить про більший ступінь наклепування поверхневого шару.

Аналіз отриманих даних дозволяє зробити висновок, що при випробуваннях в умовах тертя зносостійкість поверхневих шарів зразків, які піддавали відпуску за допомогою швидкого нагрівання СВЧ вища, ніж після пічного відпуску на аналогічну твердість. Це пов'язано з високою дисперсністю структурних складових, які сформувались завдяки впливу високої швидкості нагрівання при відпуску. Можна очікувати, що отримання після відпуску СВЧ в'язкої матриці фериту, яка пронизана більш дисперсними карбідами, приведе до більшої стійкості поверхні щодо викришування в умовах інших видів зношування (наприклад кавітаційного, ерозійного тощо).

Література

1. Любарский И.М., Палатник Л.С. Металлофизика трения. – М.: Металлургия, 1976. – 176 с.
2. Головин Г.Ф., Замятин М. М. Высокочастотная термическая обработка. Вопросы металловедения и технологии. – Ленинград: Машиностроение, 1990. – 240 с.
3. Гриднев В.Н., Мешков Ю.Я., Ошкадеров С.П. Физические основы электротермического упрочнения стали. – Киев: Наук. думка, 1973. – 335 с.
4. Золотаревский В.С. Механические испытания и свойства металлов. – М.: Металлургия, 1974. – 303 с.
5. Смирнов М.А., Счастливцев В.М., Журавлев Л.Г. Основы термической обработки стали. – Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – 494 с.
6. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.

Одержано 26.05.14

Н. А. Погребной, А. Е. Вуец

**Влияние термической обработки на износостойкость
стали 15X11МФ**

Резюме

Работа посвящена сравнительному исследованию износостойкости поверхностных слоев конструкционных сталей в исходном состоянии, после закалки и отпуска с разными скоростями нагрева (медленный печной нагрев и скоростной нагрев с помощью токов высокой частоты). Разработанные методики скоростной термообработки и испытаний на износ позволяют сравнить износостойкость поверхностных слоев после различных видов термообработки на одинаковую твердость.

N. A. Pogrebnoy, A. E. Vuets

Heat treatment influence on the steel 15X11MF wear resistance

Summary

The paper presents to the comparative study of wear resistance of the surface layers of structural steels after hardening and tempering with different heating speed (slow oven heating and high speed heating with the help of high-frequency currents). The developed techniques of the high-speed heat treatment and tests for wear allow you to compare the wear resistance of the surface layers after various kinds of heat treatment, but at the same hardness.

Шановні колеги!

**Триває передплата на науково-технічний журнал
«Металознавство та обробка металів» на 2015 р.**

Для регулярного одержання журналу потрібно перерахувати вартість заказаних номерів на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України.
Вартість одного номера журналу – 30 грн., передплата на рік – 120 грн.

Ціна архівних номерів 1995 – 2014 рр. – 10 грн.

**Розрахунковий рахунок для передплатників,
спонсорів і рекламодавців:**

банк ГУДКСУ в м. Києві, р/р 31257201112215, код банку 820019.

Отримувач – ФТІМС НАН України, ЗКПО 05417153,

з посиланням на журнал "ММ".

Копію документа передплати та відомості про передплатника
просимо надсилати до редакції,
вказавши номер і дату платіжного документа.