

АБРАЗИВНА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТЕПЛОДЕФОРМОВАНОЇ СТАЛІ

Національний авіаційний університет

Встановлено ефект відсутності впливу обробки теплим деформуванням на абразивну зносостійкість сталі у порівнянні зі звичайною термічною обробкою. Проаналізовано причини цього ефекту. Показано доцільність його інтерпретації з позиції реолого-кінетичної концепції абразивної зносостійкості.

Завдання дослідження. В машинобудуванні широко застосовують спосіб зміцнення металів та сплавів шляхом суміщення операцій пластичної деформації та термічної обробки в єдиному процесі, який має назву термомеханічна обробка (ТМО).

Ефект зміцнення при термомеханічній обробці зумовлений сумарною дією зміцнення, що отримано в результаті наклепу високотемпературної фази та зміцнення, яке виникає при гартуванні.

Якщо пластичну деформацію аустеніту проводять в області відносної стійкості стабільного аустеніту, тобто, в інтервалі температур теплої деформації [1], то такий вид термічної обробки вважають низькотемпературним (НТМО). Температура деформації повинна бути вище мартенситної точки, але нижче температури рекристалізації, з подальшим фазовим перетворенням. Спосіб НТМО придатний лише для сталей з широкою зоною стійкості аустеніту.

Результати дослідження показали [2], що обробка НТМО підвищує міцність сталі і одночасно знижує її реологічні властивості.

Відомо [3], що між показником міцності та зносостійкості сталей різних структурних класів при терті ковзання об моноліт діє закон відповідності. Цей факт дає підстави очікувати підвищення абразивної зносостійкості сталей після НТМО [4]. Однак вивчення цього питання [5] показало протилежний результат – тенденцію до зниження зносостійкості легованої сталі.

Залежно від ступеня деформації та структурного стану зниження зносостійкості сталі не перевищувало 13 % у порівнянні зі зносостійкістю після звичайної термічної обробки. Таке зниження

зносостійкості знаходиться в межах похибки вимірювання і тому його слід було б визнати статистично незначущим. Однак автори роботи [5] не звернули уваги на цей факт. Відхилення вказаного результату від закону відповідності між показником міцності та зносостійкістю залишилось без належного пояснення, оскільки жодних міркувань щодо цього в роботі [5] не виявлено. Варто також відмітити малочисельність інформаційних джерел в питанні впливу НТМО на абразивну зносостійкість сталей. Все це вказує на необхідність подальшого вивчення зазначеного питання, і є метою даної роботи.

Методичне забезпечення дослідження. Об'єктом дослідження була сталь 40ХНМА. Хімічний склад сталі наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваної сталі

Марка сталі	Вміст, %							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
40ХНМА	0,40	0,68	0,27	0,03	0,021	0,76	1,50	0,18

Сталь піддавали низькотемпературній обробці (НТМО) за такою технологічною схемою: нагрівання вище верхньої критичної температури A_3 до аустенітного стану, переохолодження до температур 773-813 К в область відносної стійкості аустеніту (рис. 1) з тривалим інкубаційним періодом, прокатування на лабораторному стані ДУО-210 зі швидкістю 0,3 м/с і обтискуваннями 15, 30, 45 %, гартування та відпуск за температури 293 К. Режим НТМО представлено в табл. 2.

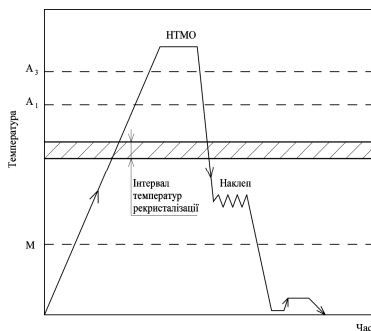


Рис. 1. Принципова схема НТМО: A_1 – перша критична точка; A_3 – третя критична точка; M – точка мартенситного перетворення

Таблиця 2

Режим НТМО досліджуваної сталі

Марка сталі	Температура критичної точки A_3 , К	Температура аустенізації, К	Тривалість аустенізації, с	Температура прокатування, К	Гартувальне середовище
40ХНМА	1038	1193	1800	1193	Масло

Для вивчення ефекту НТМО досліджувану сталь піддавали звичайному гартуванню з наступним відпуском за температури 493 К. Режим термічної обробки представлено в табл. 3.

Таблиця 3

Режим термічної обробки досліджуваної сталі

Марка сталі	Температура нагрівання під гартування, К	Тривалість витримування, с	Гартувальне середовище
40ХНМА	1153	900	Масло

Зразки сталі після всіх варіантів обробки піддавали триботехнічним випробуванням в умовах тертя по моноліту відповідно з методикою та режимом, що рекомендовані в роботі [6].

В процесі триботехнічних випробувань досліджувались реологічні властивості сталі – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} , розмір пластичної зони у вершині тріщини h_n і реологічний параметр $R = K_{IC} / \sqrt{h_n}$ за методиками роботи [6].

Абразивний знос зразків визначали на електронних терезах «Nagema» з ціною поділки 0,001 г. Результати вимірювань триботехнічних та реологічних властивостей сталі піддавали обробці математичними методами.

Експериментальна і аналітична частина дослідження. Дані щодо зміни триботехнічних та реологічних властивостей сталі унаслідок зміцнення НТМО наведено в табл. 4, 5.

З табл. 4 видно, що після зміцнення НТМО величини σ_B і HV сталі 40ХНМА дещо зростають відповідно на 7,7 % та 4,6 %, а зно-

состійкість проявляє тенденцію до зниження, яка носить немонотонний характер і змінюється в межах $7,2 \div 22$ %. Отже, можна констатувати, що НТМО несуттєво впливає на трибомеханічні властивості сталі.

Таблиця 4

Залежність трибомеханічних властивостей сталі від степеню обтискування при НТМО

Марка сталі	Степінь обтискування λ , %	Твердість НВ, МПа	Границя міцності σ_e , МПа	Зносостійкість $\varepsilon \cdot 10^2$, ε^{-1}
40ХНМА	0	585	1750	5,76
	15	600	1765	5,36
	30	615	1780	4,71
	45	630	1830	5,29

Таблиця 5

Залежність реологічних властивостей сталі від степеню обтискування при НТМО

Марка сталі	Степінь обтискування λ , %	Реологічні властивості				
		В'язкість руйнування K_{IC} , МПа \sqrt{m}	Розмір пластичної зони $h_n \cdot 10^{-8}$, м	Реологічний параметр $R \cdot 10^4$, МПа	Інтенсивність зміни h_n , $\frac{h_n^*}{h_n}$	Інтенсивність зміни K_{IC} , $\frac{K_{IC}^{**}}{K_{IC}}$
40ХНМА	0	10,14	7,7	3,66	1	1
	15	9,9	8,39	3,43	0,917	1,02
	30	9,9	10,9	3	0,706	1,02
	45	9,9	8,66	3,36	0,889	1,02

* – h_n – товщина пластично деформованого шару після гартування та відпуску при 493 К;

** – K_{IC} – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень після гартування та відпуску при 493 К.

Дані табл. 5 вказують на практичну незмінність в'язкості руйнування K_{IC} сталі після НТМО (зменшення K_{IC} складає 2,14%). Щодо товщини деформованого шару h_n , то за загальної тенденції

до підвищення, зміна її відбувається немонотонно в межах $7,1 \div 9,2\%$, що не є значущим. Таким чином, інтенсивність зміни

$$h_n - \frac{h_n^*}{h_n} \text{ і } K_{IC} - \frac{K_{IC}^{**}}{K_{IC}}$$

ступенях обтискування. Тому можна стверджувати, що незначна зміна реологічного параметра R після НТМО зумовлена сталістю величин K_{IC} і h_n порівняно зі звичайною термічною обробкою.

На рис. 2 у графічній формі наведено зіставлення зносостійкості ε з реологічними властивостями K_{IC} , h_n та R сталі за даними табл. 4, 5. Звідки видно, що НТМО практично не впливає на зносостійкість та реологічний параметр R сталі. Тому для функції $\varepsilon = f(R)$ експериментальні данні, що відповідають загартованому стану і стану після НТМО укладаються в одну точку. Отже, при обробці теплим деформуванням реологічний параметр R зв'язаний зі зносостійкістю ε сталі, що є підґрунтям для інтерпретації ефекту впливу вказаної обробки на абразивну зносостійкість з точки зору реолого-кінетичної концепції [7].

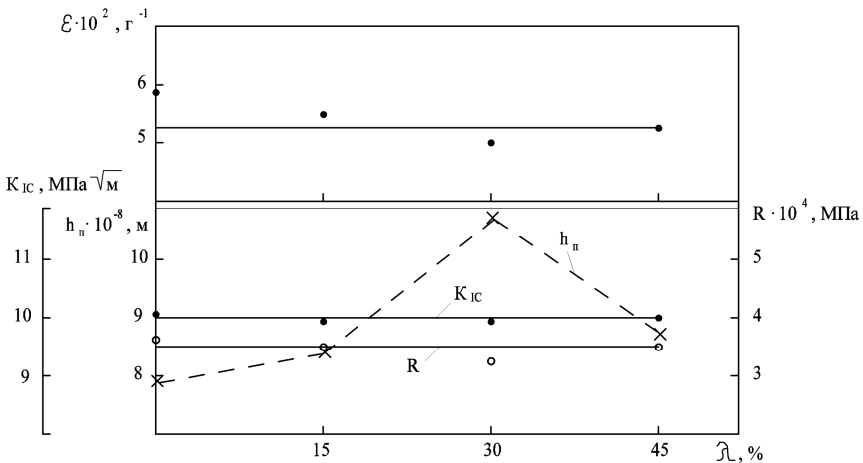


Рис. 2. Зіставлення зносостійкості ε з критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень K_{IC} , товщиною пластично-деформованого шару h_n і реологічним параметром R сталі 40ХНМА після НТМО з різним ступенем обтискування λ

Реолого-кінетична концепція розглядає абразивне зношування як послідовність актів пошарового відокремлення частинок зносу метала, що утворюються при перетині бокових горизонтальних тріщин з вертикальними клиноподібними тріщинами. Бокові тріщини зароджуються на межах пластичних зон у вершинах вертикальних тріщин під дією результуючих напружень при навантаженні металу. Критерієм опору зародженню бокових тріщин визначено реологічний параметр R . Розповсюдження вказаних тріщин відбувається у горизонтальній площині під дією поля залишкових напружень розтягу після розвантаження металу. В механізмі зовнішньо-силової дії абразивної частинки на зношувану поверхню при ковзанні можна виокремити два етапи. Перший етап характеризується тиском абразивної частинки на зношувану поверхню і завершується її зануренням в метал. На другому етапі занурена абразивна частинка здійснює поступальне переміщення уздовж зношеної поверхні, здійснюючи при цьому складне полідеформаційне руйнування останньої шляхом пластичного деформування, мікрорізання, відтискування тощо.

Після НТМО на першому етапі контактної взаємодії абразивні частинки занурюються в метал приблизно на таку ж саму глибину, як після звичайної термічної обробки, оскільки міцність σ_v і твердість НВ сталі практично не змінюється при всіх степенях обтискування. У зв'язку з цим однаковими будуть результуючі напруження на межі пластичної зони a , отже, величина реологічного параметру R .

Відомо [8], що залишкові напруження на межі пластичної зони після розвантаження індентора зв'язані з твердістю металу прямо пропорційною залежністю. Ураховуючи неістотну зміну твердості НВ після НТМО, сталою можна вважати також швидкість розповсюдження бокових тріщин на другому етапі контактної взаємодії.

Окрім цього, відомо [9], що після обробки пластичним деформуванням довжина тріщини і в'язкість руйнування сталі знаходяться у зворотному зв'язку один з одним. Після НТМО в'язкість руйнування K_{IC} практично не змінюється при всіх степенях обтискування, що може свідчити про сталу довжину вихідних тріщин. Зростання тріщин, скоріш за все, перешкоджає процесу їх часткового заліковування [10] в температурних умовах теплового деформування. Незмінність довжини вихідних тріщин разом з незмінністю товщини деформованого шару сприяє тому, що товщина частинок зносу

теплодеформованої сталі не відрізняється від їх товщини після звичайної термічної обробки. Таким чином, ефект незмінності зносостійкості сталі після НТМО у порівнянні зі звичайною термічною обробкою можна пояснити незмінністю опору зародження бокових тріщин на межах пластичних зон та їх розповсюдження в горизонтальній площині в сукупності з однаковою товщиною частинок зносу.

Висновки. В результаті цієї роботи встановлено:

1. Тепле деформування практично не має впливу на трибомеханічні властивості сталі у порівнянні зі звичайною термічною обробкою. Тому НТМО виявляється непридатною для підвищення зносостійкості сталі.

2. Ефект відсутності впливу теплого деформування на абразивну зносостійкість доцільно інтерпретувати з позиції реологокінетичної концепції.

3. Величина реологічного параметру R не залежить від обробки теплим деформуванням.

4. Незмінність абразивної зносостійкості ϵ після обробки теплим деформуванням зумовлюється незмінністю опору зародження та розповсюдження бокових горизонтальних, а також товщини частинок зносу.

Список літератури

1. *Бернштейн М.Л.* Структура деформированных металлов: учеб. пособ. / М.Л. Бернштейн – М.: Металлургия, 1976. – 431 с.
2. *Бернштейн М.М.* Прочность стали / М.М. Бернштейн – М.: Металлургия, 1974. – 199 с. – Библиогр.: С. 196–199.
3. *Сорокин Г.М.* Трибология сталей и сплавов / Г.М. Сорокин – М.: Недра, 2000. – 316 с. – Библиогр.: С. 237–245.
4. *Сорокин Г.М.* Новые критерии повышения долговечности машин / Г.М. Сорокин // Вестник машиностроения. – 2008 - №5. – С. 19–23.
5. *Жарков В.Я., Кантор М.М.* Абразивная износостойкость конструкционных сталей в зависимости от термомеханической обработки (ВТМО и НТМО) // Износ и антифрикционные свойства материалов (Трение и износ в машинах): Сб. науч. тр. – М.: Наука, 1968. – Вып. 20. – С. 65–71.
6. *Дворук В.І., Герасимова О.В.* Вплив структурного стану на абразивне руйнування сталі // Проблеми тертя та зношування: наук. техн. зб. – К.: НАУ, 2007. – Вип. 47. – С. 82–94.

7. Дворук В.І. Реолого-кінетична концепція абразивної зносостійкості та її реалізація в керуванні працездатністю механічних трибосистем: Автореф. дисертації доктора техн. наук / – К.: НАУ, 2007. – 40 с.

8. Swain M.V. A note the residual stress about a pointed indentation impression in a brittle solid // J. Mater. Sci. – 1976. V. 11, № 12. – P. 2345–2348.

9. Дворук В.І. Абразивна зносостійкість холоднодеформованої сталі / В. І. Дворук, М. В. Кіндрачук // Проблеми трибології (Problems of tribology). – 2011. – № 3. – С.24–28.

10. Лариков Л.Н. Залечивание дефектов в металлах / Л.Н. Лариков. – К.: Наук. думка, 1980. – 279 с.

Дворук В. И., Белых С. С. Абразивная износостойкость теплодеформированной стали // Проблеми тертя та зношування: наук. техн. зб. – К.: НАУ, 2012. – Вип 58. – С. 41–48.

Установлен эффект отсутствия влияния обработки теплым деформированием на абразивную износостойкость стали по сравнению с обычной термической обработкой. Проанализирована причина этого эффекта. Показана целесообразность его интерпретации с позиции реолого-кинетической концепции абразивной износостойкости.

Рис. 2, табл. 5, список лит.: 10 наим.

Dvoruk V.I., Belukh S.S. Abrasive wearability of the warm deformation alloy steels.

Setup effect of the lack of effect of treatment with warm deformation on the abrasive wearability of alloy steels in comparison with conventional heat treatment. The reasons for this effect. The expediency of its interpretation from the perspective of reologikal-kinetic concept wearability.

Ключеві слова: термомеханічна обробка (ТМО), низькотемпературна термомеханічна обробка (НТМО), міцність, гартування, відпуск, пластичне деформування, в'язкість руйнування, реологічні властивості, абразивний знос, зносостійкість.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2012