

УДК 621.891

В. І. ДВОРУК, С. С. БЄЛИХ

Національний авіаційний університет, Україна

ВПЛИВ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА АБРАЗИВНУ ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ

Встановлено ефект відсутності впливу високотемпературної термомеханічної обробки (ВТМО) на абразивну зносостійкість сталі за різних режимів. Показано можливість пояснення цього ефекту як з точки зору міцнісного, так і реолого-кінетичного підходу. Констатовано безпідставність ототожнення об'ємного і абразивного руйнування сталі.

Ключові слова: ВТМО, абразивна зносостійкість, міцнісний підхід, реолого-кінетичний підхід, границя міцності, реологічний параметр.

Завдання дослідження. Серед різних зміцнюючих обробок для підвищення механічних властивостей загартовуваних сталей в машинобудуванні широко застосовують ефективні способи суміщення операцій пластичної деформації та термічної обробки в єдиному процесі, до числа яких відноситься високотемпературна термомеханічна обробка (ВТМО) [1].

Принципову схему ВТМО сталей представлено на рис. 1.

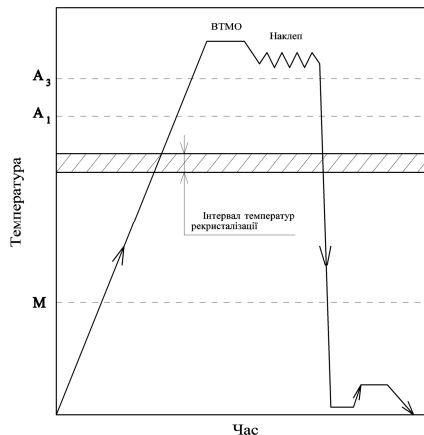


Рис. 1. Принципова схема ВТМО сталей: A_1 – перша критична точка; A_3 – третя критична точка; M – точка мартенситного перетворення.

Основною метою операції пластичної деформації при ВТМО є створення дрібноблокової будови у вихідній аустенітній структурі. Тому пластичну деформацію аустеніту проводять за температури його достатньої стійкості, однак при цьому швидкість рекристалізації повинна бути уповільненою.

Таким вимогам відповідає температура деформування, яка знаходиться дещо вище точки A_3 , причому після деформації метал негайно охолоджують з метою виключити рекристалізацію. Тим самим, подальшому фазовому перетворенню піддається метал з великою подрібненістю блоків і одержувана мартенситна структура сталі є дрібнодисперсною [2].

Найцінніша якість застосування ВТМО – це підвищення міцнісних властивостей сталі за одночасного істотного покращення сполучення міцності та пластичності. Останнє привертає увагу до ВТМО, як можливого способу підвищення абразивної зносостійкості сталі [3].

Відомо [4], що абразивне зношування має міцнісну природу, а критерієм зносостійкості може бути границя міцності. Однак практичний досвід вказує на те, що різні сталі однакової міцності при випробуванні на абразивне зношування показують різну зносостійкість: сталі з більшим запасом пластичності володіють більшою зносостійкістю. Ураховуючи цей факт, запропоновано [4] комплексний критерій зносостійкості, в якому суміщенні характеристики міцності та пластичності у вигляді добутку їх показників $y_b \psi$, де σ_b – границя міцності, ψ – відносне звуження.

На думку [3], вказаний критерій дозволяє трактувати природу абразивного зношування як звичайне об'ємне руйнування, яке відрізняється лише своїм масштабом. Слід відмітити, що суміщення характеристик міцності та пластичності у вигляді їх добутку змінило не лише вигляд критерію, але також його зміст, оскільки з показника міцності він перетворився на енергетичний показник. Це не відповідає міцнісному підходу до природи абразивного зношування і не може бути підставою для ототожнення об'ємного та абразивного руйнування. На неадекватність такого ототожнення прямо вказують результати вивчення впливу структурного стану на абразивну зносостійкість легованої сталі при обробці холодним деформуванням [5], згідно яких абразивна зносостійкість контролюється не границею міцності, а реологічним параметром – фундаментальною характеристикою механіки контактного руйнування.

Вплив ВТМО на зносостійкість легованих сталей вивчався в [6], де показано, що залежно від хімічного складу, ступеня деформації та температури відпуску зносостійкість сталі при терті закріпленим абразивом може змінюватись по-різному: підвищуватись, знижуватись або залишатися незмінною. Причому, у випадках підвищення та зниження зміна зносостійкості складала 11–16 % порівняно зі зносостійкістю після звичайної термічної обробки, тобто фактично знаходилась в межах похибки вимірювання, а, отже, була статистично незначущою. Однак, автори [6] не звернули увагу на цей факт і тому він залишився без пояснення. З метою його перевірки та пояснення проведено додаткове вивчення легованої сталі зі структурою відпущеного мартенситу [7], результати якого підтвердили практичну відсутність впливу ВТМО на абразивну зносостійкість. Вказаний ефект знайшов пояснення з позицій реолого-кінетичної концепції зносостійкості [8].

Метою даної роботи є подальше вивчення впливу ВТМО на абразивну зносостійкість легованої сталі в різних структурних станах: мартенситному, тростинному, сорбінному та підходів до його пояснення.

Методичне забезпечення дослідження. Об'єктом дослідження була сталь 40ХНМА, хімічний склад якої 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 ВТМО: нагрівання до температури, яка перевищує верхню критичну точку, прокатування на лабораторному стані ДУО-210 за швидкості 0,3 м/с та обтиснення 15 %, 30 %, 45 %, гартування (рис. 1) з наступним відпуском за температур 393 К, 493 К, 693 К, 893 К.

Режим ВТМО наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Режим ВТМО 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	Олива

Для виявлення ефекту ВТМО сталь також піддавали звичайному гартуванню з відпуском за таких самих температур (табл. 3)

Таблиця 3

Режим термічної обробки досліджуваної сталі

Марка сталі	Температура нагрівання, К	Тривалість витримування, с	Гартувальне середовище
40ХНМА	1153	900	Олива

Після всіх варіантів обробки зразки сталі випробували на розтяг, твердість та абразивне зношування. Останнє проводили за методикою, що рекомендована в роботі [9].

В процесі випробувань на абразивне зношування досліджували реологічні властивості сталі — критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} , розмір пластичної зони у вершині тріщини h_{II} та реологічний параметр $R = \frac{K_{IC}}{\sqrt{h_{II}}}$ за ме-

тодиками, використаними в роботі [9].

Абразивний знос визначали методом зважування на електронних терезах «Nagema» з ціною поділки 0,001 г. Результати вимірювань трибомеханічних та реологічних властивостей сталі піддавали обробці методами математичної статистики.

Експериментальна і аналітична частина дослідження. Дані щодо зміни трибомеханічних та реологічних властивостей досліджуваної сталі після звичайної термічної обробки та ВТМО за різних режимів представлено в табл. 4.

На рис. 2 приведено результати випробувань на абразивну зносостійкість зразків із сталі 40ХНМА після ВТМО за різних режимів. Як видно з графіку, зносостійкість загартованої сталі істотно залежить від температури відпуску: найбільша зносостійкість спостерігається після відпуску за температури 393 К, а найменша – 893 К.

Вплив прокатування на зносостійкість сталі після відпуску за всіх температур в досліджуваному діапазоні обтиснень не перевищував 10% порівняно зі зносостійкістю після звичайної термічної обробки, тобто, знаходився в межах статистичної похибки. Тому його можна визнати незначущим.

Руйнування матеріалу при абразивному зношуванні складається з трьох етапів [4] (рис. 3). На першому етапі частинка абразиву занурюється в метал під дією нормального навантаження.

Таблиця 4

**Залежність трибомеханічних і реологічних властивостей сталі
40ХНМА від режиму прокатування в різних структурних станах**

Марка сталі	Температура відпуску, °С	Ступінь деформації, %	Трибомеханічні властивості			Реологічні властивості		
			Твердість НВ, МПа	Границя міцності σ_B , МПа	Зносостійкість $\varepsilon \times 10^6$, z^{-1}	В'язкість руйнування $K_{IC} \times 10^6$, $Па\sqrt{м}$	Розміри пластичної зони $h_{II} \times 10^{-7}$, м	Реологічний параметр $R \times 10^{10}$, Па
40ХНМА	393	0	472	1700	6,21	10,33	0,63	3,97
		15	532	1920	6,71	9,73	0,51	4,32
		30	537	1940	6,85	9,69	0,495	4,36
		45	564	1970	6,41	9,62	0,56	4,08
	493	0	486	1750	5,74	10,14	0,77	3,66
		15	489	1765	5,38	10,14	0,88	3,41
		30	493	1780	5,62	10,07	0,79	3,57
		45	507	1830	5,46	9,97	0,82	3,47
	693	0	403	1370	4,95	11,43	1,32	3,15
		15	403	1370	4,69	11,43	1,47	2,98
		30	403	1370	4,42	11,43	1,65	2,82
		45	403	1370	4,57	11,43	1,55	2,9
	893	0	291	960	4,76	13,5	1,99	3,03
		15	291	960	4,63	13,5	2,1	2,95
		30	291	960	4,63	13,5	2,1	2,95
		45	291	960	4,29	13,5	2,45	2,73

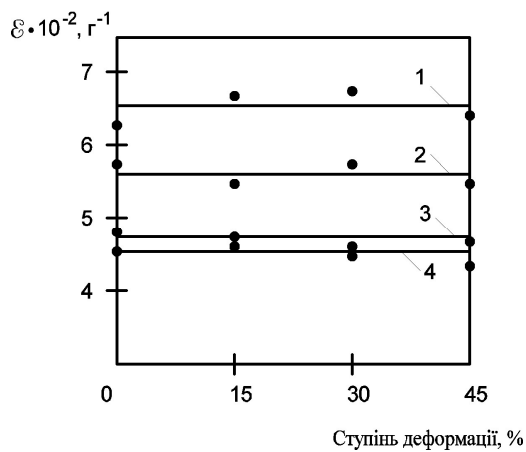


Рис. 2. Залежність зносостійкості ε від ступеня деформації після ВТМО сталі 40ХНМА за температури відпуску: 1 – 393 К, 2 – 493 К, 3 – 693 К, 4 – 893 К.

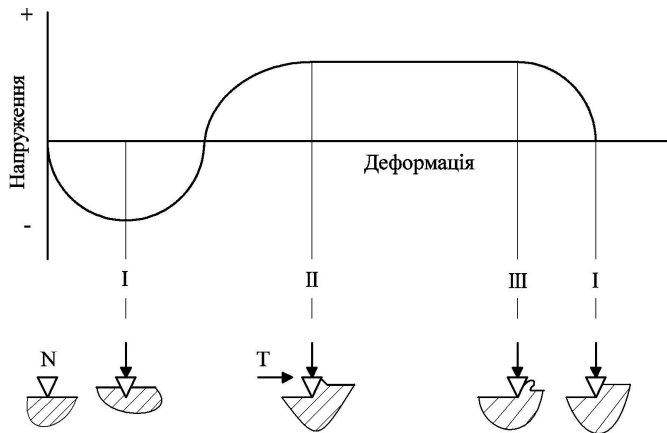


Рис. 3. Модель руйнування матеріалу при абразивному зношуванні [4].

Цей процес контролюється напруженнями стиску і супроводжується пружно-пластичним відтисненням поверхневого шару металу з утворенням навалів. На другому етапі занурена частинка абразиву поступально переміщується уздовж поверхні під контролем напружень розтягу. Цей процес супроводжується зародженням та розвитком мікро- і макротріщин, а також відривом поверхневого шару від основи металу. На третьому етапі відбувається утворення валика з деформованого металу, пластичне відтискання валика абразивною частинкою та формування частинки зносу. Діючі напруження при цьому знижуються до нуля і цикл руйнування повторюється.

Існує думка [4], що на другому етапі опір руйнуванню поверхні визначається границею міцності металу. У зв'язку з цим нами проведено дослідження границі міцності сталі після ВТМО за різних режимів, результати якого представлено на рис. 4. Звідки видно, що границя міцності загартованої сталі істотно залежить від температури відпуску: найбільша міцність спостерігається після відпуску за температур 393 К та 493 К, а найменша – 893 К.

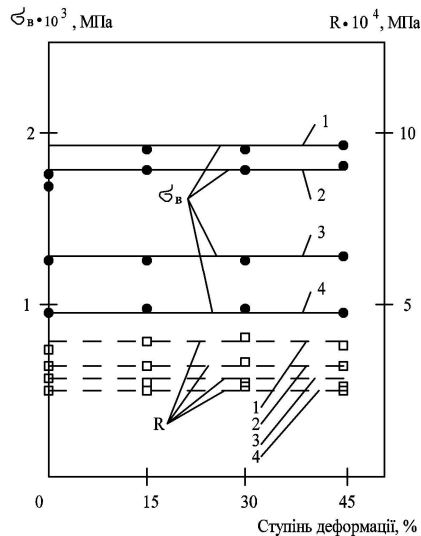


Рис. 4. Залежність границі міцності σ_b та реологічного параметру R від ступеня деформації після ВТМО сталі 40ХНМА за температури відпуску: 1 – 393 К, 2 – 493 К, 3 – 693 К, 4 – 893 К.

З підвищенням ступеня деформації при ВТМО границя міцності залишається практично незмінною за всіх температур відпуску. Вказана закономірність принципово відрізняється від аналогічної закономірності після обробки холодним деформуванням [5], яка мала зростаючий характер. Пояснюється це тим, що при холодному деформуванні порівняно з ВТМО повніше реалізуються процеси релаксації локальних пікових напружень, зменшення неоднорідності мікрОВикривлень та перерозподілу вуглецю в гратці мартенситу [10]. Завдяки чому, при накладанні двох конкуруючих процесів – наклепу та розупорядкування, превалюючим є перший процес, в той час як при ВТМО ефекти обох процесів зрівноважуються.

Зіставлення режимних залежностей границі міцності (рис. 4) та зносостійкості (рис. 2) показало наявність тісної кореляції між ними. Таким чином, наведені результати узгоджуються з гіпотезою [4] щодо провідної ролі границі міцності в абразивній зносостійкості сталі.

З іншого боку [7] відсутність впливу гарячого деформування на абразивну зносостійкість сталі з мартенситною структурою добре пояснюється з позиції реологокінетичного підходу. Для подальшого вивчення цього питання проведено оцінку реологічного параметру досліджуваної сталі після ВТМО за різних режимів. З отриманих результатів (рис. 4) видно, що ВТМО не чинить впливу на реологічний параметр порівняно з реологічним параметром після звичайної термічної обробки. Пояснюється це відсутністю після ВТМО додаткової кількості мікротріщин в поверхневому шарі порівняно зі звичайною термообробкою. Справа в тому, що вказані тріщини, які неминуче утворюються під час гарячого деформування сталі, скоріш за все, заліковуються [11]. Тому джерело походження вихідних мікротріщин після ВТМО і термічної обробки одне і теж саме – мартенситне перетворення [12]. Практично однаковою буде також кількість вихідних мікротріщин.

Зіставлення режимних залежностей реологічного параметру (рис. 4) та зносостійкості (рис. 2) показало наявність тісної кореляції між ними.

Отже, гіпотеза [7] щодо провідної ролі реологічного параметру в абразивній зносостійкості також знайшла експериментальне підтвердження.

Таким чином, вивчення впливу фактора ВТМО не дає однозначної відповіді щодо міцнісного показника, який контролює зносостійкість, а це, в свою чергу, вказує на безпідставність ототожнення об'ємного та абразивного руйнування.

Висновки. На підставі результатів проведеного дослідження можна констатувати наступне:

1. ВТМО незалежно від ступеня деформації не впливає на трибомеханічні властивості сталі при всіх температурах відпуску порівняно зі звичайною термічною обробкою. Тому вказана обробка є непридатною для підвищення абразивної зносостійкості сталі.

2. При ВТМО зносостійкість сталі повною мірою визначається операцією термічної обробки, тоді як операція пластичного деформування практично не впливає на неї.

3. Дрібнодисперсний мартенсит незалежно від ступеня деформації не впливає на абразивну зносостійкість сталі при всіх температурах відпуску.

4. Вплив ВТМО на абразивну зносостійкість можна пояснити як з точки зору міцнісного так і реолого-кінетичного підходу.

5. Показником абразивної зносостійкості після ВТМО може бути як границя міцності, так і реологічний параметр, що вказує на безпідставність ототожнення об'ємного і абразивного руйнування.

Список літератури

1. Бернштейн М.Л. Прочность стали / М.Л. Бернштейн. – М.: Metallurgiya, 1974. – 199 с. – Библиогр.: – С. 196–199.
2. Новые пути повышения прочности металлов (Монография) / В.С. Иванова, Л.К. Гордиенко. – М.: Наука, 1964. – 118 с.: ил., табл. – Библиогр.: С. 111–117.
3. Сорокин Г.М. Новые критерии повышения долговечности машин / Г.М. Сорокин // Вестник машиностроения. – 2008. – №5. – С.19–23.
4. Сорокин Г.М. Трибология сталей и сплавов / Г.М. Сорокин– М.: Недра, 2000. – 316 с. – Библиогр.: С. 237–245.
5. Дворук В.І. Вплив вихідного структурного стану на абразивну зносостійкість сталі при обробці холодним деформуванням / В.І. Дворук, С.С. Белих, С.Є. Горда // Проблеми тертя та зношування: наук. техн. зб. – К.: НАУ, 2013. – Вип. 59. – С. 82–94.
6. Жарков В.Я. Абразивная износостойкость конструкционных сталей в зависимости от термомеханической обработки (ВТМО и НТМО) / В.Я. Жарков, М.М. Кантор // Износ и антифрикционные свойства материалов (Трения и износ в машинах): Сб. науч. тр. – М.: Наука, 1968. – Вып. 20, – С. 65–71.
7. Дворук В.І. Абразивна зносостійкість гарячедеформованих легованих сталей / В.І. Дворук, С.С. Белих // Проблеми тертя та зношування: наук. техн. зб. – К.: НАУ, 2013. – Вип. 57. – С. 108–116.
8. Дворук В.І. Реолого-кінетична концепція абразивної зносостійкості та її реалізація в керуванні працездатності механічних трибосистем: Автореф. дисертації доктора техн. наук / – К.: НАУ, 2007. – 40 с.
9. Дворук В.І., Герасимова О.В. Вплив структурного стану на абразивне руйнування сталі / В.І. Дворук, О.В. Герасимова // Проблеми тертя та зношування: наук. техн. зб. – К.: НАУ, 2007. – Вип. 47. – С. 82–94.
10. Балтер М.А. Упрочнение деталей машин / М.А. Балтер. – М.: Машиностроение, 1978. – 184 с. – Библиогр.: – С. 174–182.
11. Лариков Л.Н. Залечивание дефектов в металлах / Л.Н. Лариков. – К.: Наукова думка, 1980. – 279 с. – Библиогр.: – С. 260–277.
12. Петров Ю.Н. Дефекты и диффузионные превращения в сталях / Ю.Н. Петров. – К.: Наукова думка, 1978. – 262 с. – Библиогр.: – С. 246–261.

Стаття надійшла до редакції 10.06.2013.

V. I. DVORUK, S. S. BELYKH

EFFECT OF HIGH-TEMPERATURE THERMOMECHANICAL TREATMENT ON THE STEEL ALLOY ABRASIVE WEAR RESISTANCE

Chosen high-temperature thermomechanical treatment (HTMT) effect no effect on abrasive wear resistance of steel under regimes. The possibility interpretation this effect both in terms of strength and reological-kinetic approach. Ascentained unfounded identification of bulk abrasive and fracture of steel. Thus, the hypothesis about the leading role of rheological parameters in abrasive wear resistance is also found experimental confirmation. Thus, the study of the impact factor HTMT not give a clear answer as to the strength parameter, which controls the wear resistance, which, in turn, points to the hollowness identification of bulk and abrasion damage.

Keywords: HTMT, abrasive wear resistance, strength of approach, reological-kinetic approach, reological parameters.

Дворук Володимир Іванович – д-р техн. наук, професор Національного авіаційного університету, dvoruk@voliacable.com.

Белих Сергій Сергійович – аспірант Національного авіаційного університету, sagamor@bigmir.net.