

УДК 621.891

В. І. ДВОРУК, С. С. БЄЛИХ, С. Є. ГОРДА

Національний авіаційний університет, Україна

ВПЛИВ ВИХІДНОГО СТРУКТУРНОГО СТАНУ НА АБРАЗИВНУ ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ ПРИ ОБРОБЦІ ХОЛОДНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ

Підтверджено ефект відсутності впливу обробки холодним пластичним деформуванням на абразивну зносостійкість легованої сталі в різних структурних станах. Показано доцільність інтерпретації незмінності абразивної зносостійкості на підґрунті реолого-кінетичної концепції. Доведено, що міцнісною характеристикою, яка контролює зносостійкість є реологічний параметр.

Ключові слова: обробка холодним пластичним деформуванням, абразивна зносостійкість, міцність, реологічні властивості, реологічний параметр, реолого-кінетична концепція.

Завдання дослідження. Одним з важливих факторів субструктурного зміцнення металів і сплавів є холодне деформування (наклеп). В результаті наклепу підвищуються всі характеристики опору металу деформації, знижується його пластичність і збільшується твердість [1]. Зміцнення металу в незагартованій сталі відбувається за рахунок змін структури і дефектів кристалічної будови (густини, якості і взаємодії дислокацій, кількості вакансій та ін.), подрібнення блоків і наведення мікронапружень. При зміцненні загартованих сталей, окрім цього, відбувається часткове перетворення залишкового аустеніту в мартенсит, а також виділення дисперсних карбідних частинок.

Холодне деформування призводить до утворення зсувів в зернах, пружного викривлення кристалічної ґратки, зміни форми та розміру зерен. Зміцнення металу при наклепі пов'язано з масовим розвитком дислокацій і концентрацією їх поблизу ліній зсувів. Оскільки дислокації оточені полями пружних напружень, то для подальшої пластичної деформації необхідне значно більше напруження, ніж в незміцненому металі. Цьому сприяє сильна разорієнтація роздрібнених блоків, розподіл множини дислокацій в деформованому об'ємі металу, а також виділення дисперсних карбідів, які грають роль шипів, що перешкоджають розвитку зсувів площинами ковзання.

Поверхнева твердість оброблюваного металу і глибина пластичної деформації залежать від режимів зміцнення, фізико-механічних властивостей і хімічного складу металу.

Інтенсивність наклепу тим вище, чим м'якше сталь. На незагартованих сталях в результаті холодного деформування можна отримати збільшення твердості більш ніж на 100 %, а у загартованих лише на 10–50 %.

Приріст твердості зумовлюється структурою деформованої сталі. Найбільше підвищення твердості спостерігається в сталях зі структурою аустеніту, фериту і мартенситу, найменше – зі структурою перліту і сорбіту. Структурні складові сталі мають різну здатність до зміцнення. Для структури мартенситу глибина зміцненої зони більше, ніж за тих самих умов для інших структур. Структури сорбіту мають найменшу глибину зміцненого шару [2].

Із складових режимів зміцнення найбільший вплив на поверхневу твердість чинить питомий тиск деформованого елемента в контактi з оброблюваним металом.

Відомо [3; 4], що в основі механізму абразивного зношування лежить міцніше підґрунтя. Тому підвищення міцності і твердості сталей після обробки холодним пластичним деформуванням повинно було б супроводжуватись відповідним зростанням їх абразивної зносостійкості. Однак, досвід багаторічного вивчення цього питання для сталей, зміцнених різними способами деформування [5–9 та ін.] переконливо свідчить про відсутність істотного впливу вказаної обробки на абразивну зносостійкість. Для пояснення цього ефекту висунуто ряд гіпотез, аналіз яких проведено в роботі [10]. Незважаючи на розбіжності вказаних гіпотез, спільним в них є те, що абразивне руйнування вважається в'язким і розглядається на підґрунті класичних вчень про механіку та міцність матеріалів. Отже, за такого підходу ефект незмінності абразивної зносостійкості холоднодеформованих сталей може мати різну інтерпретацію, що вказує на необхідність пошуку інших теоретичних підходів для його пояснення. Ураховуючи особливості стану сталі після обробки холодним деформуванням, і, перш за все, наявність в ній великої кількості мікротріщин доцільною представляється реолого-кінетична концепція зносостійкості [11], згідно якої абразивне руйнування за фізичною класифікацією розглядається як квазікрихке. Доцільність такого підходу знайшла експериментальне підтвердження на прикладі сталі 40Х з ферито-перлітною структурою [10].

Відомо [4], що ефект незмінності абразивної зносостійкості після обробки холодним пластичним деформуванням проявляється в сталях з різною вихідною структурою: ферито-перлітною, сорбітною, трооститною, мартенситною. У зв'язку з цим, науковий і практичний інтерес представляє оцінка можливості та доцільності застосування реолого-кінетичної концепції зносостійкості до інтерпретації вказаного ефекту для сталі з різною вихідною структурою, що 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

Різний вихідний структурний стан сталі забезпечувався дотриманням спеціальних режимів термообробки (табл. 2).

Таблиця 2

Режим термічної обробки досліджуваної сталі

Марка сталі	Гартування			Відпуск	
	Температура нагрівання, К	Тривалість витримання, хв.	Гартувальне середовище	Температура нагрівання, К	Тривалість витримання, хв.
40ХНМА	1153	15	Масло	393	60
				493	
				693	
				893	

В результаті чого була отримана сталь з набором структур від мартенситної до сорбітної. Після термічної обробки досліджувану сталь зміцнювали холодним пластичним деформуванням шляхом прокатування на лабораторному стані ДУО-90 зі швидкістю 0,3 м/с та обтискуваннями 15 %, 30 %, 45 %.

Зразки випробувальної сталі піддавали випробуванням на твердість. Останню оцінювали в умовах тертя по моноліту відповідно з методикою та режимом, рекомендованими в роботі [12].

В процесі триботехнічних випробувань досліджували реологічні властивості сталі — критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} , розмір пластичної зони у вершині тріщини h_{II} і реологічний параметр $R = \frac{K_{IC}}{\sqrt{h_{II}}}$ за методиками роботи [12].

Абразивний знос зразків вимірювали 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 досліджуваної сталі після термічної обробки і зміцнення холодним пластичним деформуванням в різних структурних станах представлені в табл. 3.

Таблиця 3

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 $\epsilon \times 10^6, \text{г}^{-1}$	В'язкість руйнування $K_{IC} \times 10^6, \text{Па}\sqrt{\text{м}}$	Розміри пластичної зони $h_{II} \times 10^{-7}, \text{м}$	Реологічний параметр $R \times 10^{10}, \text{Па}$
40ХНМА	100	0	472	1700	6,21	10,33	0,68	3,97
		15	534	1923	6,12	9,71	0,6	3,96
		30	543	1956	6,05	9,66	0,598	3,95
		45	552	1990	6,05	9,56	0,586	3,95
	200	0	486	1750	5,74	10,14	0,77	3,66
		15	555	2000	5,7	9,53	0,68	3,66
		30	564	2033	5,66	9,46	0,67	3,65
		45	573	2066	5,61	9,42	0,664	3,65
	400	0	403	1370	4,95	11,43	1,32	3,15
		15	475	1616	4,91	10,55	1,12	3,15
		30	505	1716	4,9	10,27	1,06	3,15
		45	534	1816	4,85	9,97	1	3,15
	600	0	291	960	4,76	13,5	1,99	3,03
		15	304	1003	4,69	13,3	1,93	3,03
		30	344	1130	4,57	12,44	1,69	3,03
		45	425	1403	4,54	11,29	1,39	3,03

На рис. 1 приведено результати випробувань на абразивну зносостійкість зразків із сталі 40ХНМА в різних структурних станах. Як видно з графіку абразивна зносостійкість ϵ для різних структурних станів виявляється істотно різною.

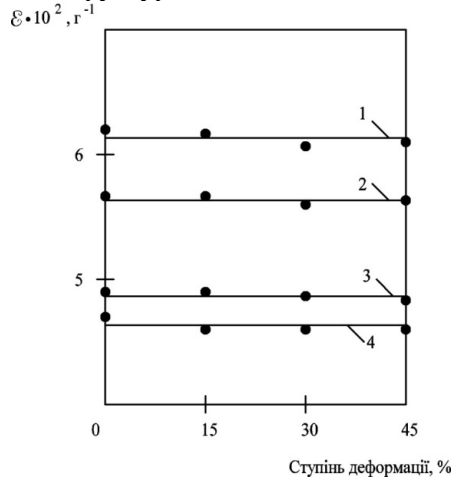


Рис. 1. Залежність зносостійкості ϵ від ступеня деформації при обробці холодним деформуванням загартованої та відпущеної сталі 40ХНМА за температури:

1 – 100 °C; 2 – 200 °C; 3 – 400 °C; 4 – 600 °C

Найбільша зносостійкість для загартованої та відпущеної за різних температур сталі спостерігалась у зразках зі структурою тетрагонального мартенситу, а найменша – з сорбітною структурою.

Прокатування сталі в усіх структурних станах практично не впливало на її зносостійкість незалежно від ступеня деформації. Отже, можна зробити висновок, що ефект незмінності зносостійкості після обробки холодним пластичним деформуванням не залежить від структурного стану сталі. Даний висновок узгоджується з результатами аналогічних досліджень сталі 40 [4].

Аналіз зносостійкості сталей різних структурних класів після гартування та відпуску за різних температур показав [3], що головна роль у забезпеченні зносостійкості належить границі міцності. Пояснюється це особливостями механізму зовнішньо-силової дії абразивної частинки на поверхню тертя при ковзанні, у якому можна виокремити два етапи. Перший етап характеризується тиском абразивної частинки на поверхню зношування і завершується її зануренням в метал поверхневого шару, при цьому твердість і міцність абразивної частинки повинна бути вище твердості металу зношуваної поверхні. На другому етапі абразивна частинка, що занурена в метал на певну глибину поступально переміщується поверхнею, здійснюючи при цьому складне полідеформаційне руйнування шляхом пластичного деформування, мікрорізання, пружного відтискання і т.д. Мірою опору зануренню частинки в поверхню є твердість, а опору її переміщенню поверхнею – границя міцності. Оскільки формування та відокремлення частинок зносу відбувається на етапі переміщення абразиву поверхнею, це стало вирішальним аргументом на користь припущення [3] щодо провідної ролі границі міцності у зносостійкості сталі. З урахуванням цього факту, нами проведено дослідження границі міцності сталі в різних структурних станах після обробки прокатуванням при різних структурних деформаціях, результати якого представлені на рис. 2.

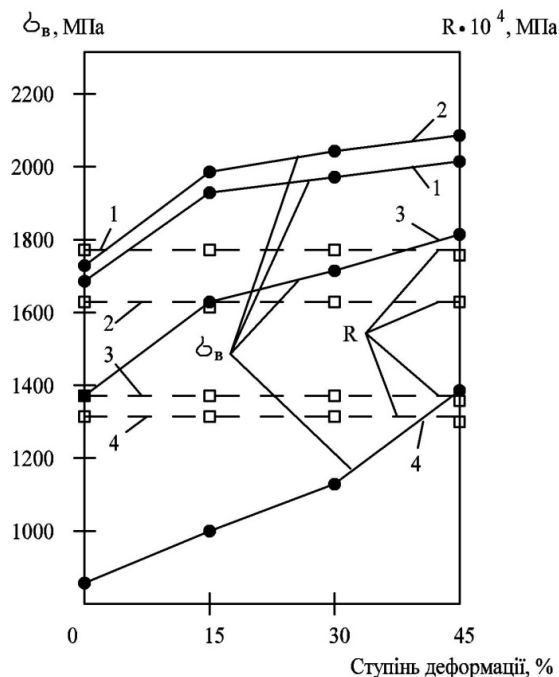


Рис. 2. Залежність границі міцності σ_B та реологічного параметру R від ступеня деформації при обробці холодним деформуванням загартованої та відпущеної сталі 40ХНМА за температури відпуску: 1 – 100 °С; 2 – 200 °С; 3 – 400 °С; 4 – 600 °С

Дослідженнями встановлено, що прокатування сприяло зростанню границі міцності у всіх структурних станах сталі. При підвищенні ступеня деформації границя міцності нелінійно зростала. Найбільшу міцність мала сталь зі структурою відпущеного мартенситу, а найменшу – сорбіту. Зіставлення режимних залежностей границі міцності (рис. 2) та зносостійкості (див. рис. 1) показало відсутність кореляції між ними, як в якісному так і в кількісному плані. Якісні відмінності проявлялись в характері вказаних залежностей: зростаючому – для границі міцності і стабільному – для зносостійкості, кількісні – у відхиленні від прямого зв'язку між границею міцності та зносостійкістю у сталі з мартенситною структурою (рис. 1, 2, криві 1, 2), для якої зносостійкість тетрагонального мартенситу виявилась вищою ніж у відпущеного мартенситу, незважаючи на те, що його границя міцності була нижчою. Таким чином, наведені результати не підтверджують гіпотезу [3] щодо провідної ролі границі міцності у забезпеченні абразивної зносостійкості сталі. Вказану гіпотезу висунуто за результатами вивчення впливу термічної обробки на зносостійкість сталей різних структурних класів. Результати даної роботи вказують на те, що для встановлення міцнісної характеристики, яка контролює зносостійкість, окрім фактору термічної обробки, необхідно урахувати інші фактори, зокрема, обробку холодним пластичним деформуванням.

Як зазначалось вище, для пояснення ефекту незмінності зносостійкості холоднодеформованої сталі з ферито-перлітною структурою доцільним виявився реолого-кінетичний підхід [10]. З метою подальшого вивчення цього питання було проведено оцінку реологічного параметру досліджуваної сталі в різних структурних станах після обробки прокатуванням, результати якої представлені на рис. 2. Звідки видно відсутність впливу вказаної обробки на реологічний параметр, що якісно і кількісно узгоджується зі зміною зносостійкості (див. рис. 1).

Це дає підстави стверджувати, що міцнісною характеристикою, яка контролює зносостійкість є реологічний параметр – характеристика опору зародженню бокових горизонтальних тріщин на межах пластичних зон у вершинах вертикальних клиноподібних тріщин.

Таким чином, сучасні уявлення щодо міцнісного підґрунтя механізму абразивного зношування [3] практично ототожнюють його з опором об'ємному руйнуванню. Результати даної роботи вказують на те, що їх слід визнати неадекватними, оскільки вони не ураховують фізичні особливості зношування і оперують умовним показником – границею міцності. Вказаних недоліків позбавлений реолого-кінетичний підхід, згідно якого міцнісне підґрунтя механізму абразивного зношування слід розглядати в сенсі опору зародженню бокових горизонтальних тріщин на межах пластичних зон у вершинах вертикальних клиноподібних тріщин – фундаментального показника опору абразивного руйнування металу.

Висновки. В результаті даної роботи встановлено:

1. Обробка холодним пластичним деформуванням призводить до істотного підвищення границі міцності сталі і практично не впливає на її абразивну зносостійкість. Тому вказана обробка є непридатною для підвищення абразивної зносостійкості сталі.

2. Ефект відсутності впливу холодного деформування на абразивну зносостійкість сталі незалежно від її структурного стану доцільно інтерпретувати з позиції реолого-кінетичного підходу.

3. Величина реологічного параметру не залежить від обробки холодним деформуванням і є міцнісною характеристикою яка контролює зносостійкість.

4. Міцнісне підґрунтя механізму абразивного зношування необхідно розглядати у сенсі опору зародженню бокових горизонтальних тріщин на межах пластичних зон у вершинах вертикальних клиноподібних тріщин, який є фундаментальним показником опору абразивного руйнування металу.

Список літератури

1. Каледин В.А. Повышение долговечности деталей поверхностным деформированием монография / В.А. Каледин, П.А. Чапа. – Минск: Наука и техника, 1974. – С. 219–230.
2. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка поверхностным пластическим деформированием: справочник / Л. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1987. – С. 218–320.
3. Сорокин Г.М. Трибология сталей и сплавов / Г. Сорокин. – М.: Недра, 2000. – С. 314–315.
4. Хрущов М.М. Исследование изнашивание металлов / М. Хрущов, М. Бабичев. —М.: АН СССР, 1960. – С. 337–342.
5. Кашеев В.Н. Абразивное разрушение твердых тел / В. Кашеев. –М.: Наука, 1970. – С. 237–245.
6. Кашеев В.Н. Износ стали при трении о личной напильник и твердость по методу царапания в зависимости от наклепа / В. Кашеев // Труды Сиб. Физ.-тех. ин-та. – 1948. – Вып. 26. – С. 40–48.
7. Савицкий К.В. Влияние наклепа на износ металлов / К. Савицкий // Труды Сиб. Физ.-тех. ин-та. – 1947. – Вып. 24. – С. 21–27.
8. Лаврентьев А.И. К вопросу о независимости абразивного изнашивания от наклепа. 7.1 / А. Лаврентьев // Трение и износ. – 1986. – С. 654–660.
9. Богомоллов Н.И. Основные процессы при взаимодействии абразива и метала: автореф. дис. доктора техн. наук / Н. Богомоллов. – К. : КИИГА, 1967. – 46 с.
10. Дворук В.І. Абразивна зносостійкість холоднодеформованої сталі / В. Дворук, М. Кіндрачук // Проблеми трибології. – 2011. – № 3. – С. 24–28.

11. Дворук В.І. Реолого-кінетична концепція абразивної зносостійкості та її реалізація в керуванні працездатності механічних трибо систем: автореф. дисертації доктора техн. наук / В. Дворук. – К. : НАУ, 2007. – 40 с.

12. Дворук В.І. Вплив структурного стану на абразивне руйнування сталі / В. Дворук, О. Герасимова // Проблеми тертя та зношування. – К. : НАУ, 2007. – Вип. 47. – С. 82–94.

Стаття надійшла до редакції 24.02.2013.

V. I. DVORUK, S. S. BELUKH, S. E. GORDA

**THE INFLUENCE OF THE STRUCTURAL STATE ON ABRASIVE WEAR
RESISTANCE OF THE ORIGINAL STAINLESS STEEL OF THE PROCESSING
OF COLD DEFORMATION.**

Results of this work indicate that they should recognize inadequate because they do not take into account physical features of wear and operate conventional indicator – limit strength. These drawbacks deprived reoloho-kinetic approach, whereby a strength foundation abrasive wear mechanism should be considered in terms of the emergence of resistance to lateral horizontal cracks within the plastic zones in the tops of the vertical wedge cracks – a fundamental indicator of abrasion resistance of metal destruction. Evidence is the lack of treatment effect cold plastic deformation on the abrasive wear resistance of stainless steel in different structural states. The expediency of its interpretation by reologihal-kinetic concept wearability. Proved that the strength properties, which controls the wear resistance is the rheological parameters.

Keywords: treatment of cold plastic deformation, abrasive wear resistance, strength, rheology, rheological parameters, reoloho-kinetic concept.

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

Бєлїх Сергїї Сергїїович – аспїрант Національного авіаційного університету, sagamor@bigmir.net.

Горда Сергїї Євгєнович – студент Національного авіаційного університету.