

**Дворук В.І.,  
Кіндрачук М.В.**

Національний авіаційний університет,  
м. Київ, Україна

## АБРАЗИВНА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ХОЛОДНОДЕФОРМОВАНОЇ СТАЛІ

### Завдання дослідження

Одним з актуальних завдань науки і техніки є забезпечення абразивної зносостійкості конструкційних матеріалів. Впершу чергу воно стосується сталі – найрозповсюджененого сплаву, який за цим показником не задовольняє потреби інженерної практики. Протягом ХХ-століття абразивна зносостійкість вуглецевих та легованих сталей істотно підвищилась. Цей прогрес досягнуто завдяки ускладненню хімічного складу сталей, розробці нових методів їх зміцнення, а також створенню спеціальних багатокомпонентних залізобуглецевих сплавів на базі наукових відомостей про механізм абразивного зношування. За сучасними уявленнями [1-3 тощо] у механізмі абразивного зношування лежить міцнісне підґрунтя. Виходячи з цього, логічним виглядає припущення про підвищення зносостійкості та міцності як єдиній проблемі. У ракурсі вказаного припущення методи зміцнення сталі, що застосовують на сучасних підприємствах металургійної, машино- і приладобудівної галузі слід розглядати, як технології подвійного призначення і тому не існує потреби у створенні додаткової спеціалізованої інфраструктури для захисту сталевих виробів від абразивного зносу. Наукові і практичні перспективи, що відкриваються на шляху використання міцнісного підходу до підвищення зносостійкості були визначальними аргументами для прийняття його на озброєння у деяких провідних наукових школах з вивчення явища абразивного зношування, зокрема, Російського державного університету нафти і газу ім. І.М. Губкіна (В.М. Виноградов, Г.М. Сорокін) [2].

Позитивний вплив високих міцнісних характеристик на абразивну зносостійкість сталі відмічають також інші дослідники [4, 5 тощо]. Поряд із цим, відомі наукові праці, результати яких не підтверджують зазначений факт. Наприклад, у [6, 7] констатовано, що підвищення міцності сталі термічною обробкою не впливає на її абразивну зносостійкість. Вельми ефективним методом підвищення міцності сталі вважається холодна пластична деформація прокатуванням, волочінням, екструзією тощо. Зокрема, холоднотягнутий сталевий дріт – це один з найміцніших металевих виробів [8]. Однак така обробка практично не впливає на абразивну зносостійкість сталі [1, 6, 9 - 15].

Механізм абразивного зношування обумовлюється особливостями зовнішньо-силової дії абразивної частинки на поверхню, серед яких можна виділити два етапи: перший етап характеризується тиском частинки на поверхню і завершується її зануренням у метал; другий – поступальним рухом зануреної частинки поверхнею, який супроводжується складним деформуванням та руйнуванням останньої. У результаті на поверхні формується подряпина – канавка, по краях якої видавлено метал, що утворює навали. Така схема взаємодії абразивної частинки з поверхнею наближає процеси зношування до процесів, що супроводжують випробування поверхні на твердість дряпанням [15].

Експериментальним підтвердженням подібності вказаних процесів може бути той факт, що твердість дряпанням, так саме, як абразивна зносостійкість не залежить від попереднього зміцнення поверхні холодним деформуванням [17]. Пояснюється це існуванням для твердості дряпанням тісного кореляційного зв'язку з істинним опором руйнуванню металу.

Тому у багатьох сучасних теоріях [1, 12, 15 тощо] абразивна зносостійкість холоднодеформованої сталі інтерпретується на підґрунті аналізу процесу дряпання.

Існує думка [1], що у місцях взаємодії абразивної частинки з металом при зношуванні відбувається гранично можливе зміцнення останньою, яке більше за передуюче. Товщина зміцненого шару дуже незначна, тому що незначною є товщина частинок зносу. Ще меншою повинна бути товщина гранично зміцненого шару, твердість якого виміряти надто складно. Виходячи з цього зроблено висновок про необхідність розглядати відносну абразивну зносостійкість, як характеристики механічних властивостей, що відповідає граничній міцності даного металу.

Такий висновок обґрунтовується виявленою відповідністю між діаграмами «істинний опір руйнуванню – границя міцності» та «відносна абразивна зносостійкість – твердість» для деформаційно зміцнених металів. Однак щодо питання про вплив холодної пластичної деформації на істинний опір руйнуванню відомі різні точки зору [12]. Пояснюється це розмаїттям способів деформаційного зміцнення і характерів деформацій у матеріалах. Так, наприклад, збільшення істинного опору руйнуванню, зазвичай, відмічається у випадках прокатування або протягування, коли в матеріалах можливе утворення волокон у напрямі подальшого розтягу при механічних випробуваннях. Таке саме можна сказати щодо гіпотези про граничне зміцнення у місцях взаємодії абразивної частинки з металом (див. вище), яка за результатами роботи [15] не знайшла експериментального підтвердження. На думку автора основною причиною відсутності впливу холодної пластичної деформації може бути те, що абразивні частинки взаємодіють з металом, який зміцнений передуючими частинками під час зношування.

Прийнято вважати, що проявом деформаційного зміцнення металу при дряпанні є зменшення ширини подряпини після початку горизонтального руху індентора поверхнею. Однак такий саме ефект спостерігався як у матеріалах, що схильні до зміцнення (метали), так і не схильних до цього (свинець, пластилін тощо) [12]. Пояснюється він розвитком навалів по краях і попереду рухомого індентора, під дією яких останній виштовхується з подряпини. Тому причина нечутливості твердості дряпанням до деформаційного зміцнення складається у перерозподілі нормального навантаження між матеріалом навалів та сліду за рахунок зменшення виштовхування індентора.

Незважаючи на розбіжності запропонованих гіпотез [1, 12, 15], що висунуті для пояснення ефекту незмінності абразивної зносостійкості холоднодеформованої сталі, спільним у них є те, що абразивне руйнування вважається в'язким і розглядається на підґрунті класичних вчень про механіку та міцність матеріалів. Отже, за такого підходу вказаний ефект може мати різну інтерпретацію.

Холоднодеформованим сталям притаманна одна характерна особливість, яка у зв'язку з їх абразивною зносостійкістю досі не ураховувалась. Мова йде про зменшення густини сталі після холодної пластичної деформації [8].

Відомо, що дислокації та вакансії унаслідок ангармонізму силового поля міжатомної взаємодії збільшують об'єм холоднодеформованого металу. Однак елементарний розрахунок показує, що навіть граничні значення густини дефектів кристалічної будови невмозможливі збільшити об'єм більш ніж на 0,1 %, тоді як дослідні дані сягають 1 %. Аномальне збільшення об'єму пояснюється наявністю мікротріщин, що виникають і розвиваються у металі при пластичній деформації.

У зв'язку з цим для холоднодеформованої сталі розрахункову модель континууму матеріалу і відповідну їй класичну схему руйнування [18] слід визнати неадекватною. Прийнятними представляються моделі дисконтинууму і некласична схема руйнування, на яких побудовано реолого-кінетичну концепцію абразивної зносостійкості [19]. Згідно вказаної концепції абразивне руйнування за фізичною класифікацією розглядається як квазікрихке. Однак остаточний висновок про доцільність застосування реолого-кінетичного підходу до інтерпретації ефекту незмінності абразивної зносостійкості холоднодеформованої сталі можна зробити лише за результатами спеціального вивчення цього питання, що є метою даної роботи.

#### Методичне забезпечення дослідження

Деформаційному зміцненню підлягала нормалізована сталь 40X шляхом обтискування під гідравлічним пресом заготовок, з яких після цього виготовляли зразки для дослідження. Ступінь обтискування заготовок складала 20%, 40% і 60%.

Дослідження абразивної зносостійкості  $\epsilon$  та реологічних властивостей – критичного коефіцієнту інтенсивності напружень  $K_{IC}$ , розміру пластичної зони у вершині тріщини  $h_{pd}$  проводили за тими самими методиками, які були використані в роботі [18].

Для визначення вмісту об'ємних дефектів кристалічної будови у металі залучали волюмометрію. При цьому об'ємні зміни зразків визначались за показником їх густини методом зважування на гідростатичних терезах марки ВЛО20г-1. Оцінку величини залишкових напружень розтягу на межі пластичної зони у вершині тріщини проводили розрахунковим методом за допомогою співвідношення запропонованого у роботі [20].

#### Експериментальна і аналітична частина дослідження

Дані щодо зміни трибомеханічних та реологічних властивостей досліджуваної сталі унаслідок зміцнення холодним деформуванням приведені у табл. 1, 2.

Таблиця 1

**Залежність трибомеханічних властивостей сталі 40X від режиму обтискування**

Марка сталі	Ступінь обтискування, %	Механічні властивості			Зносостійкість, $\epsilon \times 10^2, \text{ г}^{-1}$
		Твердість, НВ, МПа	Границя міцності, $\sigma_B$ , МПа	Відносне звуження, $\Psi$ , %	
40X	0	170	400	78,5	3,57
	20	234	680	65	3,47
	40	281	790	61	3,3
	60	286	880	46	3,22

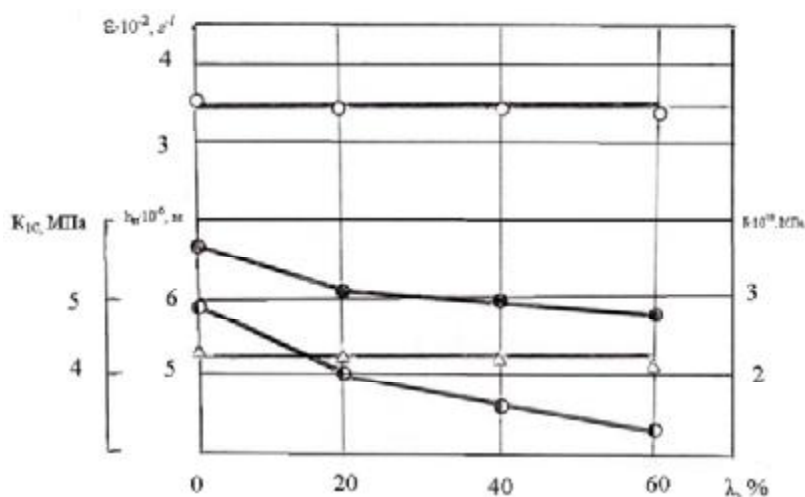
**Залежність реологічних властивостей сталі 40X  
від режиму обтискування**

Марка сталі	Ступінь обтискування, %	Реологічні властивості				
		В'язкість руйнування, $K_{IC} \times 10^6$ , Па $\sqrt{м}$	Розмір пластичної зони у вершині тріщини, $h_{nd} \times 10^{-6}$ , м	Реологічний параметр, $R_3 \times 10^{10}$ , Па	Інтенсивність зменшення $h_n$ , $h_{nn} / h_{nd}$	Інтенсивність зменшення $K_{IC}$ , $K_{ICn} / K_{ICCT}$
40X	0	58,9	6,73	2,27	1	1
	20	49,8	5,08	2,21	1,33	1,18
	40	46,6	4,93	2,1	1,37	1,26
	60	43,9	4,58	2,05	1,47	1,34

З рис. 1 видно, що після зміцнення холодним деформуванням, незважаючи на збільшення твердості НВ (табл.1), реологічний параметр  $R$  так само як і зносостійкість  $\epsilon$  істотно не змінюється. Тому для функції

$\epsilon = f(R)$  експериментальні дані, які відповідають зміцненому і незміцненому стану сталі укладаються в одну точку. Отже, при зміцненні холодним деформуванням реологічний параметр  $R$  зв'язаний з абразивною зносостійкістю  $\epsilon$  сталі.

Незмінність числових значень  $R$  і зміну реологічних характеристик, які входять до його складу можна спостерігати за результатами проведеного дослідження (табл. 2), які у графічній формі представлені на рис. 1. Звідки можна бачити, що деформаційне зміцнення сприяє одночасному зниженню в'язкості руйнування  $K_{IC}$  і розміру пластичної зони  $h_n$  у вершині тріщини, яке відбувається з майже однаковою інтенсивністю при всіх ступенях обтискування сталі (табл. 2). Отже, незмінність  $R$  зумовлена паралелізмом змін  $K_{IC}$  і  $h_n$ . Для порівняння доречно пригадати, що після зміцнення термічною обробкою  $K_{IC}$  і  $h_n$  також одночасно знижувались, але з різною інтенсивністю: зниження  $h_n$  відбувалось інтенсивніше, ніж  $K_{IC}$ , що сприяло зростанню  $R$ , а, разом з ним, зносостійкості  $\epsilon$  сталі [18].



**Рис. 1 – Зіставлення зносостійкості  $\epsilon$  з критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень  $K_{IC}$ , товщиною пластичного деформованого шару  $h_n$  і реологічним параметром  $R$  сталі 40X після обробки холодним деформуванням з різним ступенем обтискування  $\lambda$  ( $P = 1055$  МПа,  $V = 0,5$  м/с,  $L_{mp} = 30$  м, повітря)**

Реолого-кінетична концепція зносостійкості [19] розглядає абразивне руйнування як послідовність актів відокремлення частинок зносу металу, що утворюються у результаті перетину бокових горизонтальних тріщин з вертикальними клиноподібними тріщинами. Бокові тріщини зароджуються на межах пластичних зон у вершинах вертикальних тріщин під дією результуючих напружень, які одержуються суперпозицією полів головних та залишкових напружень. Критерієм опору зародженню бокових тріщин визначено реологічний параметр  $R$ .

Поширення вказаних тріщин відбувається у горизонтальній площині під дією поля залишкових напружень розтягу після розвантаження металу. Згідно теорії зносостійкості, що запропонована в роботі [1] значне підвищення твердості металевих матеріалів після наклепу повинно супроводжуватись підвищенням їх зносостійкості. Насправді ж у випадку, що розглядається цього не спостерігається і зносостійкість сталі з підвищенням твердості по мірі збільшення ступеня її обтискування не лише не підвищується, але навіть незначно знижується (табл.1). Для пояснення вказаного ефекту триботехнічним дослідженням передувала оцінка питомого об'єму і підповерхневих залишкових напружень після зміцнення холодним деформуванням. За результатами вимірювання (рис.2) встановлено зростання питомого об'єму сталі при всіх ступенях обтискування, що свідчить про інтенсивне розкриття вертикальних тріщин, а, отже збільшення їх довжини.

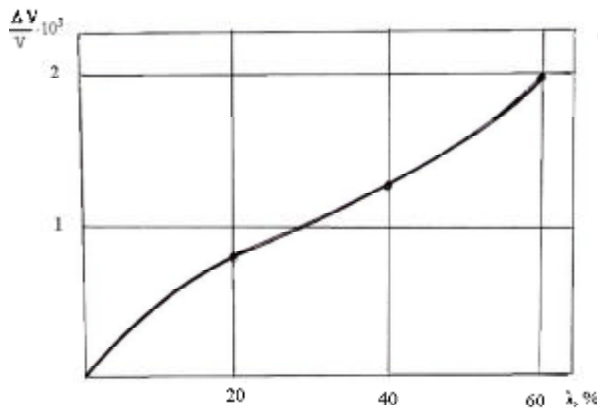


Рис. 2 – Залежність питомого об'єму  $\Delta V/V$  сталі 40X від ступеня обтискування l

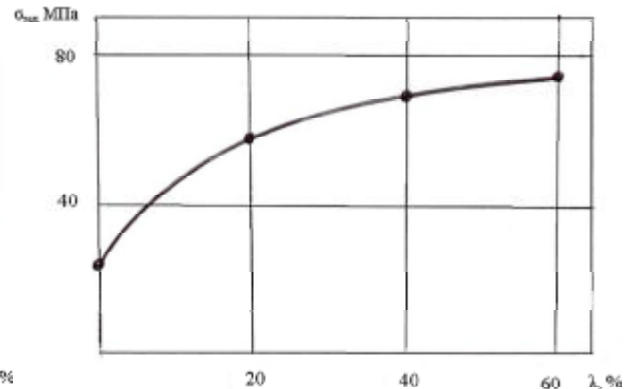


Рис. 3 – Залежність залишкових напружень  $\sigma_{\text{зал}}$  сталі 40X від ступеня обтискування l

Оцінка залишкових напружень розтягу біля деформованих зон показала (рис. 3) їх поступове зростання по мірі збільшення ступеню обтискування сталі.

На першому етапі контактної взаємодії (див. вище) відбувається занурення абразивних частинок у поверхню попередньо деформованої сталі. Оскільки міцність останньої при збільшенні ступеню обтискування зростає (табл. 1), то глибина занурення частинок у поверхневий шар повинна відповідно зменшуватись. Формування та відокремлення частинок зносу відбувається на другому етапі контактної взаємодії – поступального руху абразивних частинок робочою поверхнею. У зв'язку з цим висловлено припущення [2], щодо існування зв'язку між зносостійкістю та механічними характеристиками, які визначають міцність сталі на цьому етапі.

На підставі аналізу результатів дослідження сталей різних структурних класів попередньо зміцнених термічною обробкою дійшли висновку [2], що головна роль у забезпеченні зносостійкості належить границі міцності  $\sigma_b$ . Однак автори зазначеної праці чомусь не звернули увагу на той факт, що за їх власними даними аналогічно до границі міцності  $\sigma_b$  зміцнюється також границя текучості  $\sigma_m$  і твердість HRC сталей. На додаток до цього, результати нашого дослідження [18] показали, що, окрім усіх цих характеристик зі зносостійкістю тісно корелює реологічний параметр  $R$ . Отже, вивчення впливу лише одного фактору – термічної обробки не дозволяє однозначно встановити міцні сну характеристику, яка корелює абразивну зносостійкість сталі. Для обґрунтованої відповіді на це питання необхідно вивчити особливості впливу інших факторів, зокрема, фактору, обробки сталі холодним деформуванням, який залишився поза увагою авторів праці [2]. Результати вивчення впливу цього фактору, що представлені у даній роботі (табл. 1, 2) не підтверджують наявності кореляції зносостійкості  $\epsilon$  не лише з твердістю HB, але також з границею міцності  $\sigma_b$ , тоді, як з реологічним параметром  $R_z$  зазначений зв'язок простежується. Таким чином першою причиною відсутності впливу наклепу на абразивну зносостійкість може бути те, що вказана обробка не змінює опір зародженню бокових тріщин на межах пластичних зон, завдяки незмінності результуючих напружень. Друга причина – зміна структури результуючих напружень за рахунок перерозподілу внесків їх складових: зменшення внеску головних напружень і відповідного зростання внеску залишкових напружень (рис. 3), що спричинено зменшенням глибини занурення абразивних частинок у зміцнену поверхню. Унаслідок цього бокові тріщини зароджуються пізніше, ніж у незміцненій поверхні, але поширюються вони швидше. Тому час, що витрачається на відокремлення частинок зносу від зміцненої поверхні не повинен істотно відрізнятись у порівнянні з незміцненою поверхнею.

Третя причина складається у практично однаковій товщині частинок зносу зміцненої і незміцненої поверхні, оскільки після обробки холодним деформуванням збільшення довжини вихідних тріщин

(рис. 2) супроводжується одночасним зменшенням розмірів відповідних пластичних зон (табл.2), завдяки чому сумарні розміри тріщин і прилеглих до них деформованих зон залишаються практично однаковими.

### Висновки

У результаті цієї роботи встановлено таке:

1. Величина реологічного параметру  $R_3$  так саме як зносостійкість  $\epsilon$  сталі не залежить від зміцнення холодним деформуванням.
2. Ефект відсутності впливу холодного деформування на абразивну зносостійкість сталі доцільно інтерпретувати на підґрунті реолого-кінетичної концепції.
3. Після обробки холодним деформуванням зносостійкість сталі практично не змінюється унаслідок незмінності: а) опору зародженню бокових тріщин; б) часу відокремлення частинок зносу від поверхні; в) товщини частинок зносу.

### Література

1. Исследование изнашивания металлов: (Монография)/ М.М. Хрущов, М.А. Бабичев. – М.: АН СССР, 1960. – 351 с. – Библиогр.: с. 337-342.
2. Сорокин Г.М. Трибология сталей и сплавов /М. Недра, 2000 – 316с. –Библиограф: с. 314-315
3. Кашеев В.Н. Абразивное разрушение твердых тел. / М.: Наука, 1970. – 247 с. – Библиогр.: С. 237-245.
4. Михайличенко Т.А., Синявский А.Ф. Структурные аспекты абразивной износостойкости изотермически закаленной стали // Изв. ВУЗов Черн. металлургия. – 1964 – № 4. – С. 23-25.
5. Eyre T.S. Wear resistans of metals // Treatise of Mater. Sci and Technol. – 1979. –V.13. – P. 363 - 442.
6. Misra A. Correlation between two – body and three – body abrasion and erosion of metals // Wear. – 1981. – V68, \$ 1 – P. 33-39.
7. Либерман Э.Н. Влияние структуры на износостойкость низколегированной стали // МиТОМ. – 1964. – № 11. – С. 37-39.
8. Гриднев В.Н. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали / В.Н. Гриднев, В.Г. Гаврилюк, Ю.Я. Мешков: – К.: Наукова думка, 1974. – 230 с.; ил., табл.. – Библиограф. – С. 210-222.
9. Батаев А.А., Батаев В.А., Тушинский Л.И. и др.. Влияние гетерофазной структуры на характер поверхностного разрушения сталей // Изв. ВУЗов Черн. Металургия – 1999. – № 7. – С. 47-50.
10. Савицкий К.В. Влияние наклепа на износ металлов // Труды Сиб. Физико-технич. ин-та. – 1947. Вып. 24. – С. 21-27.
11. Кашеев В.Н. Износ стали при трении о личной напильник и твердость по методу царапания в зависимости от наклепа // Труды Сиб. Физико-технич. ин-та. – 1948 – Вып. 26. – С. 40-48.
12. Лаврентьев А.И. К вопросу о независимости абразивного изнашивания от наклепа // Трение и износ. – 1986. Т.7. – № 4. – С. 654-660.
13. De Gee A.W.J. Verschleib und Verschleibprufung //Zeitschriftfur Werkstofftechnik. – 1972. – Bd.3, №2. – S. 58-64.
14. Richardson R.C.D. The wear of metals by relatively soft abrasive //Wear. – 1968. – Vol.11, №2. – P. 245-275.
15. Богомолов Н.И. Основные процессы при взаимодействии абразива и металла: Автореф. дис. доктора техн. наук / КИИГА. – К.: 1967. – 46 с.
16. Виноградов В.Н., Ливиниц Л.С., Левин С.М. и др. Критерий стойкости стали при абразивном и ударно-абразивном изнашивании // Трение и износ. – 1988. – Т 9, № 2. –С. 207-211.
17. Избранные труды: В 2-х т. – Т.1 Динамическая прочность и хрупкость металлов /Н.Н. Давиденков. – К.: Наукова думка. 1981. – 704 с.
18. Дворук В.І., Герасимова О.В. Вплив структурного стану на абразивне руйнування сталі // Проблеми тертя та зношування: Зб. наук праць. – К., 2007.- Вип. 47. – С. 82-94.
19. Дворук В.І. Реолого-кінетична концепція абразивної зносостійкості та її реалізація в керуванні працездатністю механічних трибосистем: Автореф. дис. доктора техн. наук / НАУ. – К., 2007 – 40 с.
20. Swain M.V. A note the residual stress about a pointed indentation impression in a brittle solid // J. Mater. Sci. – 1976. V.11, N12. – P. 2345-2348.

Надійшла 10.05.2011