

Зміна твердості по глибині доріжки тертя деформованої сталі 20Х

Ю. М. Подрезов, К. Е. Грінкевич, М. Д. Рудик,
М. І. Даниленко, І. В. Ткаченко, Л. В. Козирєва

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
Київ, e-mail: podrezov@materials.keiv.ua

Досліджено вплив ступеня деформації на характеристики зношування сталі 20Х. Проаналізовано зміну параметрів твердості по глибині деформованого шару доріжки тертя. Встановлено, що в зоні інтенсивного локалізованого зсуву твердість знижується із зростанням ступеня деформації, тоді як у макрозразках ця залежність протилежна. Ефект обумовлений особливостями взаємодії існуючої дислокаційної структури з деформаційними дефектами, що формуються при локалізованому зсуві в приповерхневому шарі зони тертя. Отримані результати використані для пояснення експериментальних даних про вплив дислокаційної структури деформованого стану на інтенсивність зношування та коефіцієнт пластифікації.

Ключові слова: тертя, зношування, пластична деформація, твердість, доріжка тертя, градієнтний наношар.

Вступ

Використання сучасних методів інтенсивної пластичної деформації (ІПД) дозволяє зменшити розмір зерна до нанокристалічного рівня (100—200 нм) і, як наслідок, суттєво підвищити міцність матеріалу (до 700—1000 МПа) у випадку заліза, титану та малолегованих сплавів [1—4]. Подальше збільшення міцності матеріалів, отриманих за деформаційними технологіями, передбачає необхідність значного зменшення розміру структурних елементів. Спираючись на класичні залежності структурної чутливості границі плинності (модернізована залежність Холла—Петча), легко показати, що зменшення розміру зерна в залізі від 200 до 20 нм веде до збільшення міцності від 1000 до 4000 МПа. Сучасні теорії структуроутворення деформованого матеріалу вказують на існування обмеження щодо мінімально можливого розміру структурних елементів деформаційного походження. Його значення розраховується з умов рівноваги між силами відштовхування дислокаційних стінок і стримуючими силами тертя ґратки (сили Паєрлса—Набарро) і для більшості матеріалів знаходиться в межах 100—200 нм.

В роботах київської наукової школи теоретично обраховано та практично підтверджено концепцію корисних домішок [5, 6]. Згідно з цією концепцією, вільні домішки, що взаємодіють з дислокаціями, значно підвищують напруження тертя кристалічної ґратки, величина якого є відповідальною за рівноважний розмір деформаційної наноструктури. Критичний розмір комірки може бути значно зменшеним, якщо збільшити

силу тертя за рахунок вільних домішок, які гальмують рух дислокацій під час конструювання деформаційної субструктури.

Надміцні структурні стани в композиційних конструкційних матеріалах, зокрема в сплавах на основі заліза, можна створити, вдало поєднав термоактивовані дифузійні процеси та деформаційну обробку. Використання "домішкової" ідеології для отримання тримірних виробів методами ПД обмежено через складності введення великої кількості домішок в об'єм матеріалу. Але цю ідеологію надзвичайно плідно можна застосувати для зміцнення наноструктурованих поверхневих шарів деформаційного походження. В роботах [7, 8] показано особливості формування деформаційної наноструктури в приповерхневому шарі вуглецевої сталі 65Г, яка продеформована накаткою. Методами трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) виявлено, що в приповерхневому шарі товщиною приблизно 1 мкм утворюється деформаційна наноструктура з розміром комірок ~ 20 нм, в той час як на більшій відстані від поверхні зразка — структура з розміром комірок 200 нм. На кривих мікроіндентування деформованої поверхні зразка чітко виражений сплеск твердості в області малих навантажень (малих глибин занурювання індентора), зумовлений різким збільшенням твердості в тонкому поверхневому шарі. В приповерхневих шарах твердість сягала 12 ГПа, тоді як в недеформованому зразку — 3 ГПа.

Деформаційні процеси, що відбуваються в приповерхневих шарах при терті, є подібними до тих, що формують надмілку деформаційну наноструктуру при накочуванні. Тому мета роботи — встановити наявність градієнтного деформаційного шару в приповерхневій зоні доріжки тертя, дослідити вплив умов тертя та вихідної деформаційної структури на зміну твердості по глибині градієнтного шару та визначити зв'язок між параметрами тертя та властивостями приповерхневого шару доріжки тертя.

Матеріали та методи випробування

Для вивчення процесів зношування деформованих матеріалів використано зразки сталі 20Х після деформування вальцюванням до різних ступенів деформації (%): 79 ($e = 1,51$), 71 ($e = 1,21$), 56 ($e = 0,82$), 36 ($e = 0,43$), 24 ($e = 0,28$), 19 ($e = 0,20$), 10 ($e = 0,1$). Вихідну структуру сталі отримано відпалом при температурі 950 °С. Розмір феритних зерен сягає 10 мкм. Перлітні зерна (приблизно 30%) складаються з цементиту та феритних прошарків. Цементит має товщину 250 нм, прошарки фериту — 300—500 нм. Цементит формується переважно у вигляді пластин, хоча подекуди зустрічаються кулясті виділення. Вихідні зразки деформували вальцюванням при кімнатній температурі. Логарифмічну деформацію прокатаних зразків визначали за формулою $e = \ln(h_n/h_k)$, де h_n та h_k — відповідно початкова та кінцева висота зразка. Деформаційну субструктуру досліджено методом ТЕМ на мікроскопі JSM-100 СХ фірми "Jeol". Результати структурних досліджень деформованих станів наведені в роботі [9]. Випробування на твердість деформованих зразків проводили на приладі ПМТ-3 в трьох взаємно перпендикулярних напрямках.

Триботехнічні дослідження виконували з використанням автоматизованого трибологічного комплексу з модулем динамічного навантаження (АТКД), який дозволяє змінювати зусилля та частоту навантаження в

широкому діапазоні, що, з одного боку, дає змогу встановити зв'язок між зміною умов тертя, характеристиками зношування та поведінкою приповерхневого шару, а з іншого — визначити залежність між зовнішніми параметрами навантаження та властивостями наноструктурованого градієнтного шару. Останнє особливо важливо для розвитку теорії поверхневого деформаційного зміцнення, оскільки існуючі промислові методи (накочування, протягування, ударна, поверхнева пневмо- та УЗ-обробки) дозволяють аналізувати вплив цих параметрів на структурування та зміцнення лише на якісному рівні.

При випробуванні на знос та тертя параметри АТКД вибирали, виходячи із вимог максимальної уніфікації та прискорення умов випробування за схемою сфера—площина. Контактна поверхня індентора являє собою півкулю з радіусом 4 мм з твердого сплаву ВК8. Зворотньо-поступальне ковзання індентора проводили по поверхні плоских зразків з локальним герцівським контактом і постійною складовою навантаження 30 Н (далі — квазістатичний режим навантаження (СР)). В динамічному режимі навантаження (ДР) при постійній складовій навантаження 30 Н динамічну складову сили нормального тиску задавали у вигляді цуга коливань, що модулює квазістаціонарне навантаження.

Амплітуда динамічної складової навантаження складала 5 Н, тривалість імпульсів — $5 \cdot 10^{-2}$ с, частота — 25 Гц. Навантаження 30 Н обрано з урахуванням умов забезпечення максимальної відтворюваності по зносу в обох режимах навантаження. Для забезпечення максимальної точності реєстрації сили тертя вибрано швидкість ковзання 0,013 м/с. Тривалість випробування складала 900 с, що відповідало часу припрацювання, та 2700 с, що відповідало стабілізації сили тертя для СР.

Лінійний знос визначали за допомогою профілографа-профілометра "Калібр" К-201. За отриманими профілограмами поверхні, яка зазнала зносу, обраховували значення показників: зносу (глибина доріжки тертя) і пластифікування та коефіцієнта варіації зносу, відповідно, на статичному та динамічному режимах. Силу тертя обчислювали за даними трибограм самописця.

Для схеми випробування сфера—площина розроблено спосіб визначення трибологічних властивостей матеріалів одночасно при квазістатичному та динамічному навантаженнях, запропоновано наступні критерії оцінки механізму руйнування поверхонь трибоконтакту.

Показник відносної інтенсивності динамічного зношування K_i :

$$K_i = \frac{I_d - I_c}{I_d}, \quad (1)$$

де I_d, I_c — показники зносу плоского зразка, відповідно, при динамічному і квазістатичному режимах навантаження, що, як показано на рис. 1, визначаються глибиною доріжки тертя h .

Показники пластифікування K^{mn}_c, K^{mn}_d , що розраховуються по відношенню сумарної площі витиснутого матеріалу S^b до площі доріжки тертя S :

$$K^{mn} = \frac{S^b}{S}. \quad (2)$$

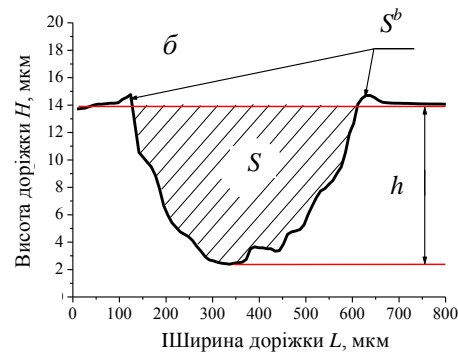
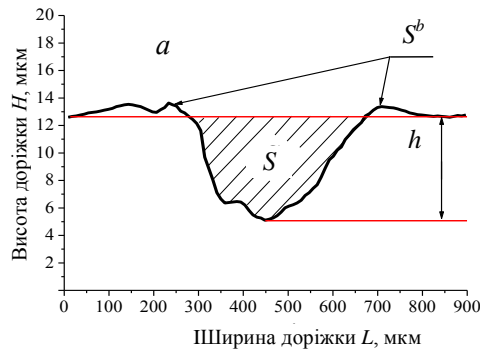


Рис. 1. Поперечна профілограма доріжки тертя при квазістатичному (а) та динамічному (б) режимах випробувань.

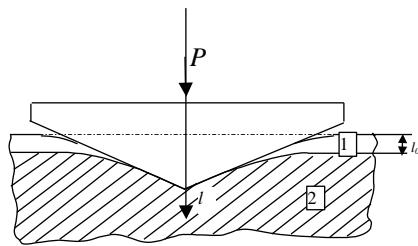


Рис. 2. Схема занурювання індентора в градієнтний матеріал: 1 — зміцнений шар; 2 — матриця.

Значення цих критеріїв визначали за допомогою розробленого пакету програм за даними, які одержували профілографуванням відповідних ділянок доріжки тертя.

Стосовно методу механічних випробувань слід зазначити, що, на відміну від запропонованої в роботах [7, 8] методики безперервного занурювання, в даній роботі досліджується дискретна зміна глибини занурювання індентора під дією різних зусиль. Це, по-перше, дозволяє проаналізувати зміну мікротвердості вздовж всього перетину доріжки тертя і, по-друге, — значно збільшити статистичну вибірку, зменшуючи, таким чином, вплив випадкових факторів. Якщо, враховуючи дані роботи [7], припустити, що твердість зразка, як і деформаційна структура, змінюється стрибком, тоді, знаючи розмір наночару і геометрію індентора, можна розрахувати зміну інтегральної твердості по глибині занурювання в припущенні адитивності внеску твердості кожного із шарів (рис. 2). Значення твердості по глибині занурювання можна розрахувати з виразу

$$H_v = H_{v1} - (H_{v1} - H_{v2}) \frac{l - l_0}{l}, \quad (3)$$

де H_{v1} — твердість приповерхневого шару; H_{v2} — твердість матриці; l_0 — глибина шару; l — глибина занурювання.

Результати експерименту

На рис. 3 наведено результати досліджень впливу ступеня деформації на характеристики зношування, на рис. 3, а — дані, отримані в квазістатичному та динамічному режимах за 15 та 45 хв. Результати, які визначають різницю зношування за 45 та 15 хв, важливі з огляду на те, що в початковому нестационарному режимі величина зносу I змінюється з часом нерівномірно, в той же час на стадії сталого зношування параметр I змінюється пропорційно часу. В практичному сенсі це важливо, оскільки

дозволяє екстраполювати результати на великі проміжки часу. Отримані дані свідчать про те, що в динамічному режимі зношування відбувається значно швидше, ніж в квазістатичному. Початковий нестационарний режим вносить значно більший внесок в зношування, ніж сталий (особливо в квазістатичному режимі), вихідні зразки зношуються сильніше за деформовані. Трохи більші складності спостерігаються на сталій стадії, якій відповідає різниця зношування ΔI за 45 та 15 хв. В статичному режимі вихідний стан також є найбільш вразливим для зношування. Інтенсивність зношування деформованих зразків достатньо низька, при цьому проявляється певна структурна чутливість: параметр ΔI менший для матеріалу зі структурою лісу дислокацій, потім збільшується для деформованих станів, що мають структуру слабкорозорієнтованих комірок, і, нарешті, знову різко зменшується в деформованому стані з нанозеренною структурою. В цьому випадку експериментальне значення зношування на 0,1 мкм за 0,5 год відповідає зношуванню деталей на 3 мм за два роки безперервної роботи. При сталому динамічному зношуванні ефект структурної чутливості подібний, але значно яскравіше виражений. Матеріал зі слабкорозорієнтованою структурою зношується швидше, ніж вихідний зразок. Сильнодеформовані зразки, що мають нанозеренну структуру, в динамічному режимі також зношуються надзвичайно мало.

Залежність параметра пластифікування від умов зношування наведена на рис. 3, б. Якщо параметр I характеризує лінійне зношування, тобто зміну форми досліджуваного зразка, то параметр, зворотній до K (коефіцієнта пластифікування), визначає втрату маси. У випадку, коли $K = 1$, відбувається лише перерозподіл матеріалу між канавкою та навалами. Якщо $K = 0$, формування канавки відбувається лише за рахунок руйнування та наступного вилучення матеріалу з зони зношування. В квазістатичному режимі на початковій стадії процесу зразки в вихідному стані демонструють найбільший коефіцієнт пластифікування, який знижується до 0 при збільшенні деформації. На сталій стадії процесу зношування спостерігається пластифікація слабкорозорієнтованої структури. В наноструктурному стані зношування відбувається переважно за рахунок руйнування поверхневого шару. Дещо несподіваним є вплив динаміки на коефіцієнт пластифікування. При малих ступенях деформації

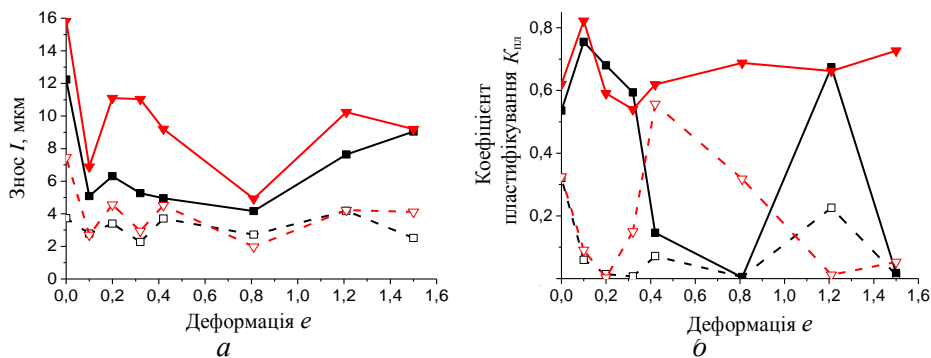


Рис. 3. Вплив ступеня деформації на характеристики зношування: знос (а) та коефіцієнт пластифікації (б): \square — квазістатичний режим, 15 хв; ∇ — квазістатичний режим, 45 хв; \blacksquare — динамічний режим, 15 хв; \blacktriangledown — динамічний режим, 45 хв.

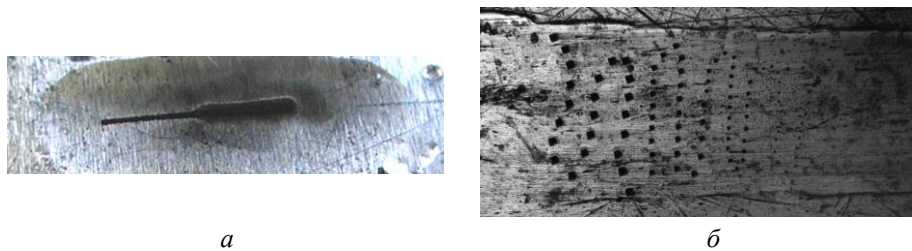


Рис. 4. Доріжка тертя сталі 20Х: *a* — загальний вигляд; *б* — металографічне зображення з відбитками твердості по перерізу.

зношування при динамічному навантаженні сприяє пластифікації значно більше, ніж при квазістатичному. При великих ступенях деформації схильність до руйнування проявляється лише в нестационарному режимі, тоді як в сталому режимі тертя коефіцієнт пластифікування збільшується зі зростанням ступеня деформації, наближаючись до одиниці.

На рис. 4, *a* наведено характерний вигляд доріжки тертя: вузька ділянка — квазістатичне навантаження; широка — динамічне, на рис. 4, *б* — оптична металографія зануреної області з відбитками, розташованими вздовж її перерізу.

Кожне експериментальне значення при визначенні твердості є результатом осереднення мінімум 15 вимірювань. Зазначимо, що розкид значень в переважній більшості експериментів не перебільшував 15% від середньої величини, що значно менше, ніж досліджені ефекти. Виходячи з існуючої інформації [7] про можливий розмір наноструктурованого шару, вибирали силові параметри навантаження на індентор. При зусиллях навантаження 10, 20 50, 100 та 200 г очікувана глибина занурювання складає 0,7; 1; 2; 3,5 та 5 мкм відповідно.

У таблиці наведено експериментальні значення твердості та розрахована глибина занурювання при індентуванні різними зусиллями квазістатичної ділянки доріжки тертя рекристалізованого зразка сталі 20Х. Отримана залежність твердості від глибини занурювання представлена у вигляді графіка (рис. 5, *a*). На тому ж рисунку наведено розрахункову криву, одержану з рівняння (3). Спостерігається задовільний збіг теорії з експериментом, що свідчить про коректність використання цієї методики для дослідження градієнтних шарів.

Така сама залежність отримана для сильнодеформованого зразка (рис. 5, *б*). Як видно, в обох випадках твердість змінюється так само, як

Значення твердості та розрахована глибина занурювання при індентуванні різними зусиллями квазістатичної ділянки доріжки тертя рекристалізованого зразка сталі 20Х

Зусилля, г	Твердість, ГПа	Занурювання, мкм
10	6,5	0,7
20	6,43	1,08
50	4,84	1,97
100	4,07	3,06
200	3,27	4,81

для градієнтної структури. Поверхневий деформований шар має розмір приблизно 1 мкм і його твердість співпадає з твердістю, що отримана при навантаженні на індентор 20 г. На глибині 5 мкм твердість, отримана при навантаженні 200 г, наближається до твердості матриці. Цей важливий результат в подальшому буде використано нами для

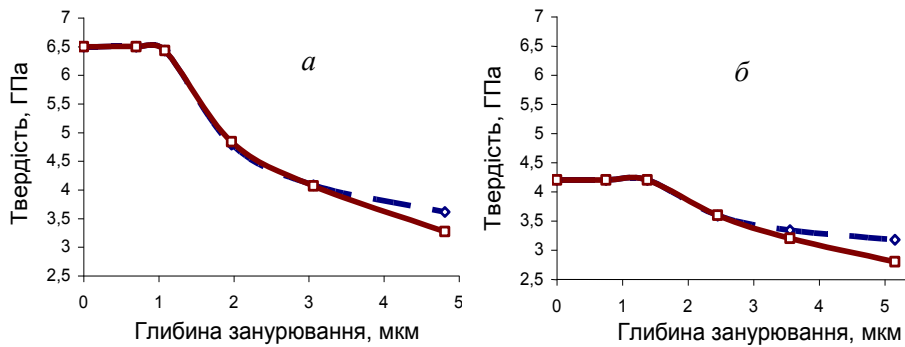


Рис. 5. Зміна твердості по глибині зразка за наявності зміцненого приповерхневого шару: сталь 20X в рекристалізованому (а) та сильнодеформованому ($e = 1,51$) станах (б): □ — експеримент; ◇ — розрахунок.

ілюстрації результатів експериментів. При проведенні експериментів використовувались всі зазначені раніше зусилля, але на графіках зафіксовано лише найбільш важливі дані для 20 та 200 г.

На рис. 6 наведено залежності впливу ступеня деформації на твердість в приповерхневому шарі зразків, випробуваних на опір зношуванню в квазістатичному та динамічному режимах, а також графік зміни твердості від ступеня деформації в вихідних макрозразках. Результати досліджень показали, що твердість приповерхневого шару доріжки тертя залежить від ступеня деформації протилежним чином, ніж в макрозразках: вона зменшується зі збільшенням ступеня деформації. Динамічна твердість виявляється меншою за квазістатичну при всіх ступенях деформації. Твердість деформованого матеріалу на глибині 5 мкм від поверхні доріжки тертя виявляється значно нижчою за твердість вихідного макрозразка.

На рис. 7 показано залежності параметрів тертя та твердості приповерхневого шару від зусилля нормального тиску на вузлі тертя для зразків сталі 20X, що знаходились в сильнодеформованому стані ($e = 1,5$). Перш за все звернемо увагу на те, що твердість поверхневого шару нелінійно змінюється з навантаженням, що корелює зі зміною коефіцієнта пластифікування при квазістатичному зношуванні, тоді як характеристика зношування лінійно збільшується із зростанням зусилля. Металографічні дослідження показали, що при великих навантаженнях (за точкою максимуму) спостерігається пошкодження на поверхні доріжки тертя.

Найбільш неоднозначними є результати вивчення впливу частоти динамічних коливань на характеристики зношування та твердість приповерхневого шару доріжки тертя (рис. 8). Немонотонну залежність

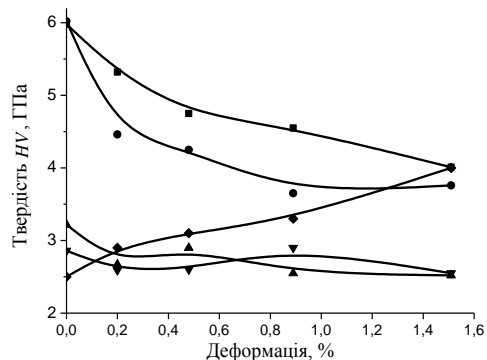


Рис. 6. Вплив ступеня деформації на твердість в приповерхневому шарі доріжки тертя: ■ — 20 г, статика; ● — 20 г, динаміка; ▲ — 200 г, статика; ▼ — 200 г, динаміка; ◆ — твердість макрозразка.

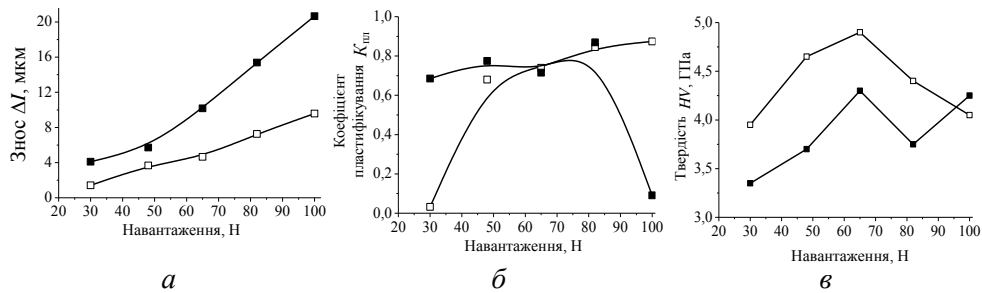


Рис. 7. Вплив зусилля нормального тиску на вузлі тертя на характеристики зношування сильнодеформованої сталі 20Х ($e = 1,5$): знос (*a*), коефіцієнт пластифікування (*б*) та твердість приповерхневого шару при навантаженні на індентор 20 г (*в*); □ — квазістатичний режим, 15 хв; ■ — динамічний режим, 15 хв.

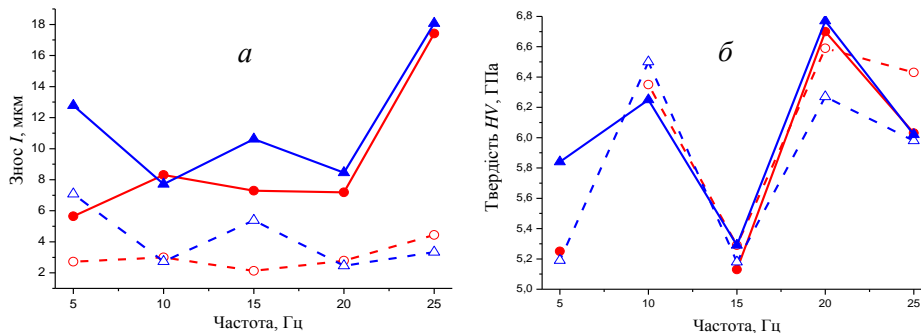


Рис. 8. Вплив частоти динамічних коливань на характеристики зношування рекристалізованого зразка сталі 20Х: знос (*a*) та твердість приповерхневого шару при навантаженні на індентор 20 г (*б*); □ — квазістатичний режим, 15 хв; ◇ — квазістатичний режим, 45 хв; ■ — динамічний режим, 15 хв; ▼ — динамічний режим, 45 хв.

параметрів зношування та приповерхневої твердості від частоти коливання навантажуючого пристрою можна пояснити різним внеском резонансних процесів, що виникають в зоні тертя під дією примусових коливань.

Обговорення результатів

Отримані результати можна пояснити, якщо представити зміну структурних станів в приповерхневому шарі доріжки тертя у вигляді схеми (рис. 9), яка ілюструє наявність кількох зон.

В приповерхневому шарі (зона 1) відбувається інтенсивний локалізований зсув, який супроводжується взаємодією утворених поверхневих дислокацій з домішками і переміщенням їх від поверхні в середину металу на глибину ~ 1 мкм, яка визначається дифузійною спроможністю атомів домішок. У вихідному матеріалі така деформація веде до утворення в поверхневому шарі надмілкої коміркової структури

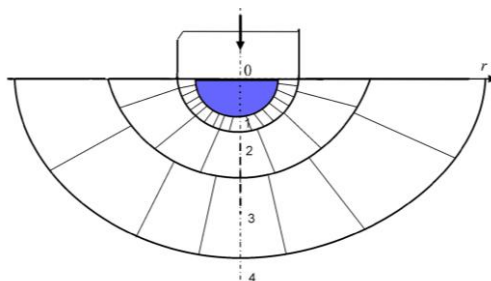


Рис. 9. Схема зміни структурних станів в приповерхневому шарі доріжки тертя.

з великою твердістю. Домішки в цьому випадку підвищують силу тертя, яка діє на дислокації, і, таким чином, перешкоджають їх ковзанню, що сприяє зменшенню розміру комірок. Якщо локалізований зсув відбувається в матеріалі, де вже існує деформаційна структура, яка попередньо створена прокаткою, інтенсивна деформація відбувається в межах існуючих границь розподілу і домішки дифундують вздовж цих границь. Розмір комірки в цьому випадку не змінюється. Це характерно для сильнодеформованого стану. В слабкорозорієнтованих комірках може відбуватися часткова перебудова структури. Очевидно, деформаційна наноструктура в приповерхневих шарах попередньо деформованого матеріалу практично не відрізняється за розміром від початкової. Тому твердість приповерхневого шару сильнодеформованого зразка практично співпадає з твердістю деформованого макрозразка і виявляється меншою за твердість приповерхневого шару вихідного зразка.

На наявність зони 2, так званої зони процесу, вказує аномальна поведінка твердості деформованого матеріалу на глибині 5 мкм. Згідно з запропонованою схемою розподілу твердості в матеріалі з градієнтною структурою (рис. 2), на цій глибині твердість системи поверхневий шар—матриця повинна наближатися до твердості матриці. Проте, як показує експеримент, отримані значення твердості на глибині 5 мкм в деформованих станах виявляються значно нижчі за твердість макрозразків. Більш того, ця приповерхнева твердість практично не залежить від ступеня деформації. Причиною цього можуть бути процеси розпаду цементитних колоній з утворенням вільного вуглецю та його переміщення за механізмом вихідної дифузії в область локалізованого зсуву. Наявність такої області експериментально спостерігалася методом трансмісійної мікроскопії [7]. Завдяки релаксації напружень в цій області може відбуватися не тільки перерозподіл вуглецю, але й частковий розпад коміркової структури.

Зона 3 — найбільша серед деформованих зон. Вона починається від зони процесу і закінчується на пружнопластичній границі, де локальне напруження тертя знижується до межі плинності. Пластична деформація в цій зоні не супроводжується структурними перебудовами і твердість в цьому шарі матеріалу близька до твердості макрозразка. Саме через великий розмір цієї зони величина опору зношування виявляється пропорційною твердості деформованого зразка. В сильнодеформованих зразках, де твердість найбільша, параметри зношування найменші.

При аналізі коефіцієнта пластифікування особлива увага повинна бути зосереджена на першій зоні, оскільки саме з поверхні відбувається руйнування матеріалу. У випадку руйнування матеріалів з розорієнтованою комірковою структурою основним механізмом руйнування є розшарування по границях між комірками. В цьому випадку важливим є забруднення границь комірок домішками, які різко знижують енергію руйнування. Виникнення тріщин зумовлене конкуренцією процесів, що сприяють адгезії на границі між комірками та релаксації напружень за рахунок пластичної деформації. Враховуючи, що перший фактор стає переважаючим при збільшенні навантаження, коефіцієнт пластифікування спочатку зростає при збільшенні зусилля, але за наявності пошкодження на поверхні доріжки тертя цей параметр починає знижуватися (рис. 6, б).

Таким чином, отримані результати розширюють існуючу інформацію про процеси, які відбуваються в приповерхневому шарі при терті, та дозволяють встановити зв'язок між параметрами твердості, що відображують ці процеси, та характеристиками тертя.

Висновки

Характеристики зношування демонструють чутливість до ступеня деформації попередньо деформованої сталі 20Х. В стаціонарному режимі зношення проявляється структурна чутливість: найбільший знос, характерний для вихідного зразка, суттєво зменшується для матеріалу зі структурою лісу дислокацій, потім збільшується для деформованих станів, що мають структуру слабкорозорієнтованих комірок, і, нарешті, знову різко зменшується в деформованому стані з нанозерненою структурою.

В процесі тертя сталі 20Х формується зміцнений приповерхневий шар, наявність якого фіксується за допомогою вимірювання твердості при занурюванні індентора на різну глибину. Встановлено, що твердість, яка визначена при навантаженні на індентор 20 г, відповідає твердості зміцненого нанощару, а твердість, визначена при 200 г, наближається до твердості матриці.

Твердість в поверхневому шарі доріжки тертя залежить від ступеня деформації протилежним чином, ніж в макрозразках: вона зменшується зі збільшенням ступеня деформації. Твердість поверхневого шару у зоні динамічного навантаження виявляється меншою, ніж у зоні квазістатичного навантаження при всіх ступенях деформації. Твердість деформованого матеріалу на глибині 5 мкм від поверхні доріжки тертя є значно нижчою за твердість макрозразка.

Твердість поверхневого шару нелінійно залежить від сили нормального навантаження в трибосполученні, що корелює зі зміною коефіцієнта пластифікування при квазістатичному зношуванні. Металографічні дослідження показали, що при великих навантаженнях (за точкою максимуму) спостерігається пошкодження на поверхні доріжки тертя.

Немонотонна залежність параметрів зношування та приповерхневої твердості від частоти коливання динамічної складової навантаження пояснюється різним внеском резонансних процесів, що виникають в зоні тертя під дією примусових коливань.

Запропоновано схему зміни структурних станів в приповерхневому шарі доріжки тертя: 1 — зона локалізованого зсуву, 2 — зона дифузійно-зсувних процесів, 3 — зона пружнопластичної деформації, 4 — зона пружної деформації.

1. *Фирстов С. А.* Структурная чувствительность механических свойств армо-железа, подвергнутого равноканальному угловому прессованию / [С. А. Фирстов, Ю. Н. Подрезов, Н. И. Даниленко, В. И. Копылов] // *Металлы.* — 2004. — № 1. — С. 96—103.
2. *Подрезов Ю. Н.* Анализ влияния повторной деформации на механическое поведение образцов титана, продеформированных методом винтовой экструзии / Ю. Н. Подрезов, В. И. Даниленко // *Электронная микроскопия и прочность материалов.* — К. Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2009. — Вып. 16. — С. 68—79.
3. *Борисовская Е. М.* Влияние параметров дислокационной структуры на скорость деформационного упрочнения железа и титана / [Е. М. Борисовская,

- Д. Г. Вербило, В. И. Даниленко и др.] // Наноструктурное материаловедение. — 2007. — № 1 (январь-март). — С. 52—65.
4. Борисовская Е. М. Особенности структурообразования и механические свойства деформированного титана / [Е. М. Борисовская, Д. Г. Вербило, В. А. Писаренко и др.] // Физика и техника высоких давлений. — 2007. — 17, № 2. — С. 110—118.
 5. Firstov S. A. Grain boundary engineering of nanostructured chromium films / S. A. Firstov, T. G. Rogul, S. N. Dub // Innovative Superhard Mater. and Sustainable Coat. for Advanced Manufacturing, Springer. — 2005. — P. 225—232.
 6. Фирстов С. О. Концепція "корисних" домішок і механічні властивості наноструктурованих плівок хрому та молібдену / С. О. Фирстов, Т. Г. Рогоуль, В. Л. Свечніков, С. М. Дуб // Физика металлов и металловедение. — 2006. — 42, № 1. — С. 113—119.
 7. Danylenko M. Gradient structure formation by severe plastic deformation / [M. Danylenko, V. Gorban et al.] // Mater. Sci. Forum. — 2006. — 503—504. — P. 787—792.
 8. Борисовская Е. М. Динамика структурных перестроек с учетом процесса зарождения дислокаций / Е. М. Борисовская, Ю. Н. Подрезов, С. А. Фирстов // Электронная микроскопия и прочность материалов. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2007. — Вып. 14. — С. 3—11.
 9. Даниленко М. І. Вплив ступеня деформації на структурні перебудови та механічні властивості маловуглецевої сталі 20X / М. І. Даниленко, Ю. М. Подрезов, С. О. Фирстов // Наукові нотатки ЛНТУ. — 2015. — Вип. 44, ч. 1. — С. 121—128.

Изменение твердости по глубине дорожки трения деформированной стали 20X

Ю. Н. Подрезов, К. Э. Гринкевич, Н. Д. Рудык, Н. И. Даниленко,
И. В. Ткаченко, Л. В. Козырева

Исследовано влияние степени деформации на характеристики износа стали 20X. Проанализировано изменение параметров твердости по глубине деформированного слоя дорожки трения. Установлено, что в зоне интенсивного локализованного сдвига твердость снижается с увеличением степени деформации, тогда как у макрообразцов эта зависимость противоположная. Эффект объясняется особенностями взаимодействия существующей дислокационной структуры с деформационными дефектами, которые формируются при локализованном сдвиге в приповерхностном слое зоны трения. Полученные результаты использованы для объяснения экспериментальных данных о влиянии дислокационной структуры деформированного состояния на интенсивность износа и коэффициент пластификации.

Ключевые слова: трение, износ, пластическая деформация, твердость, дорожка трения, градиентный нанослой.

Measurement of hardness on the depth of friction track of the deformed steel 20X

Yu. N. Podrezov, K. E. Grinkevych, N. D. Rudyk, M. I. Danylenko,
I. V. Tkachenko, L. V. Kozyrieva

The effect of deformation rate on wear characteristics of 20X steel is investigated. The change of hardness across the deformation layer of wear track is analyzed. It is shown that hardness decreases with increasing of deformation rate in the region of severe localized shift deformation while macro sample has shown the opposite dependence. This effect is explained by peculiarities of interaction between dislocation structure and deformation defects forming into subsurface wear layer during shift deformation. The obtained results are used for explanation of experimental results about effect of dislocation structure of deformed material on wear intensity and on coefficient of plasification.

Keywords: wear, friction, plastic deformation, hardness, wear track, gradient nanolayer.