

УДК 620.178.162.42

## ВПЛИВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ НА ЗНОСОТРИВКІСТЬ ПОВЕРХНІ СТАЛІ 40Х ПІСЛЯ ДИСКРЕТНОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

В. А. ВИНАР<sup>1</sup>, М. О. ДИХА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>2</sup> Хмельницький національний університет

Проаналізовано методом скінченних елементів напружено-деформований стан поверхні після дискретної електромеханічної обробки за різних геометричних схем розташування локально зміцнених зон. Показано, що найоптимальнішою схемою за умови мінімізації напруженого стану поверхні під час тертя є варіант із перехресними треками зміцнення поверхневих шарів.

**Ключові слова:** дискретна електромеханічна обробка, напружено-деформований стан, зносотривкість, структура, білий шар.

Суцільні захисні структури на поверхні деталей не завжди дають можливість забезпечити необхідну надійність і довговічність трибоспряжень у реальних умовах експлуатації. Технологічні методи створення дискретних поверхонь шляхом заміни традиційного шару поверхні на переривисту дискретну структуру дають змогу досягти вищої адгезійної і когезійної міцності кожної ділянки покриття, знижують рівень залишкових напружень і поліпшують умови змащування контактних поверхонь [1].

Дискретна електромеханічна обробка (ЕМО) [2–3] формує на поверхні структуру зі заданим розподілом міцнісних властивостей по локальних об'ємах поверхні. Зміцнена поверхня представляє собою регулярну дискретну структуру, що складається з елементів білого шару. Дослідження показують [1], що змінюючи конструктивно-технологічні параметри електромеханічної обробки, на поверхні можна сформувати дискретні структури з необхідним розташуванням зміцнених фрагментів і задати площу зміцненої поверхні. Основною метою досліджень впливу рівня залишкових напружень на зносотривкість є прагнення досягнути такого напружено-деформованого стану, який забезпечував би оптимальні напруження під час тертя [4–5].

Мета цієї роботи – проаналізувати вплив взаємного розташування елементів білого шару й площі покриття поверхні на особливості поведінки зміцненого тіла в умовах тертя.

**Матеріали та методика досліджень.** Моделювали напружено-деформований стан неоднорідного матеріалу, поверхня якого армована елементами білого шару з вищими міцнісними характеристиками, порівняно з матеріалом матриці, в умовах тертя. Для цього використовували кінцево-елементну модель бруска розмірами 15×15×6 mm, кожна зі сторін якого подана у вигляді 30 елементів, загалом 27 000 елементів. Визначали характеристику напружено-деформованого стану поверхневого шару, використовуючи програмний комплекс ANSYS [3]. Умови тертя матеріалу моделювали додаванням до зміцненої поверхні нормальних і

дотичних навантажень, відповідно 1 МПа та 0,1 МПа. Тобто коефіцієнт тертя умовно дорівнював 0,1. Поверхню, протилежну зміцненій, закріплювали жорстко.

Експериментально досліджували вплив геометрії дискретної ЕМО на зносотривкість зразків зі сталі 40Х у вихідному стані та після електромеханічної обробки на токарно-гвинторізному верстаті [2] за підібраними режимами: швидкість переміщення твердосплавного ролика  $V = 2 \text{ m/min}$ ; подача  $S = 1,5...2 \text{ mm/rot}$ ; нормальна сила притискання  $P = 400 \text{ N}$ , охолоджували зону контакту інструмента з поверхнею зразка струменем води.

Зміни властивостей поверхні сталі вивчали на трьох типах зразків (рис. 1): зразок № 1 з твердістю поверхні 23 HRC не зміцнювали і використовували для порівняння; № 2 електромеханічно обточували роликком з кроком правої подачі 1,75 mm; № 3 – з таким самим кроком з правою та лівою подачами. Таким чином, на поверхнях 2-го і 3-го зразків формувалась різна топографія і щільність дискретно зміцнених зон, а, відповідно, і напруженого стану поверхні.

Випробовували зносотривкість на багатофункціональній лабораторній установці для дослідження трибологічних властивостей конструкційних і мастильних матеріалів за схемою пари тертя “циліндр–кулька” [4]: циліндр – зразок, кулька зі сталі ШХ15. Нормальне навантаження на кульку становило 50 N, швидкість ковзання при частоті обертання зразка  $340 \text{ s}^{-1}$  дорівнювала 25,6 m/min, час випробування 3 h, що відповідає шляху тертя 4600 m. Змащували поверхню зразка оливою Castrol 10W-40. Інтенсивність зношування визначали за шириною доріжки тертя, що формується на поверхні зразка, кожні 30 min за допомогою мікроскопа МБС-10.

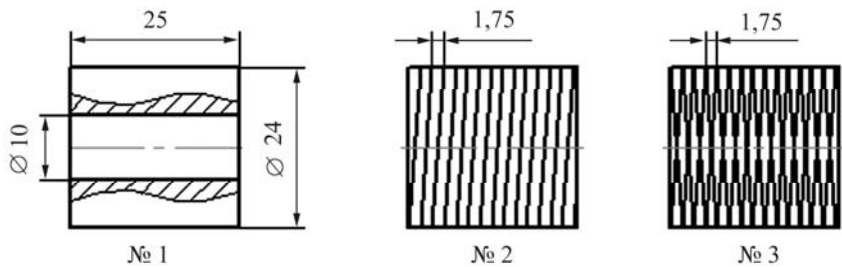


Рис. 1. Зразки № 1–3 для трибологічних випробувань.

Fig.1. Specimens № 1–3 for tribological tests.

Металографічний аналіз структури та поверхні здійснювали на сканівному електронному мікроскопі ZEISS EVO-40XVP.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Для порівняння спочатку проаналізували напружено-деформований стан поверхні незміцненого тіла. У зв'язку з тим, що на тіло впливають дотичні навантаження у площині XY (на поверхні), цікавим є характер їх розподілу у цій площині (рис. 2). Аналіз напружено-деформованого стану однорідного тіла під впливом нормальних і дотичних навантажень показав, що розподіл дотичних напружень має симетричний характер щодо площини дії дотичного навантаження. При цьому стискальні й розтягувальні напруження досягають абсолютних значень 0,02 МПа, а максимальні еквівалентні (за Мізесом) напруження – значень 3,8 МПа.

Зразки після електромеханічної обробки, з позиції механіки деформованого тіла, представляють собою тіла з неоднорідною поверхнею, армовані сторонніми локально зміцненими зонами (ЛЗЗ). Утворення у поверхневому шарі регулярної дискретної структури призводить до зміни напружено-деформованого стану

тіла під час навантаження. При цьому варто врахувати, що напружено-деформований стан тіла залежатиме як від характеру прикладених навантажень, так і від геометричних параметрів взаємного розташування ЛЗЗ. У кожному разі сторонні ЛЗЗ є концентраторами напружень.

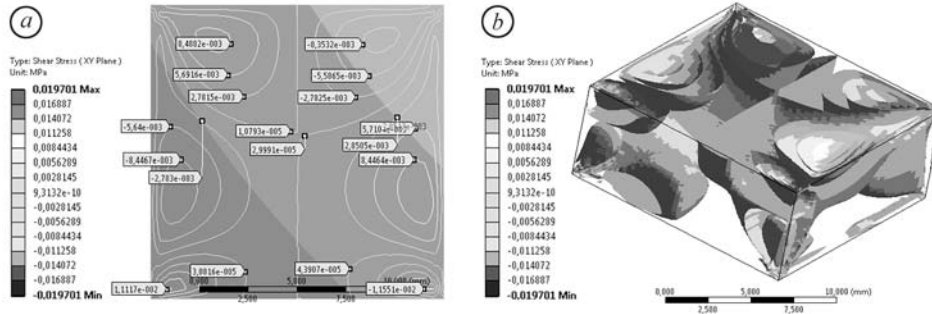


Рис. 2. Ізолінії (а) та ізоповерхні (б) розподілу дотичних напружень у площині  $XY$  незміцненого тіла.

Fig. 2. Isolines (a) and equiscalar surfaces (b) of tangent stresses distribution in plane  $XY$  of a softened body.

Аналіз різних геометричних схем електромеханічної обробки поверхні, яка працює в умовах нормального й дотичного напруження, показує, що взаємне розташування ЛЗЗ може істотно змінити напружено-деформований стан як у бік зменшення напружень, так й у бік їх суттєвого збільшення. В цьому дослідженні розглядалися два варіанти геометрії дискретного зміцнення: I-й – однонаправлені під кутом смуги (треки) зміцнення зі заданим кроком; II-й – двонаправлені (перехресні) смуги (треки) зміцнення зі заданим кроком.

Під час оброблення поверхні за I варіантом елементи ЛЗЗ, які відіграють роль концентраторів напружень, призводять до того, що еквівалентні напруження поверхневого шару досягають значень 740 МПа і близько 400 МПа в підповерхневому шарі. Якщо врахувати, що при цьому максимальні дотичні напруження становлять  $\sim 370$  МПа, то таке взаємне розташування зносотривких ЛЗЗ на поверхні призведе до виникнення й розвитку мікротріщин і руйнування поверхневого шару. Розрахунковий аналіз показує, що схема взаємного розташування ЛЗЗ за варіантом I призводить також до виникнення суттєвої різниці між розтягувальними (220 МПа) і стискальними (370 МПа) напруженнями на поверхні (рис. 3), що сприяє втомному руйнуванню шарів.

Отже, вибираючи конструктивні геометричні параметри електромеханічної обробки, варто виходити з умов мінімізації напружено-деформованого стану поверхневого шару з урахуванням режимів функціонування деталі.

Аналіз різних геометричних, технологічно реалізованих варіантів обробки поверхні показав, що найоптимальнішою схемою за умови мінімізації напруженого стану поверхні під час тертя є варіант із перехресними треками зміцнення (рис. 4), а оптимальна площа зміцнення поверхні за цим варіантом 54%. Збільшення або зменшення площі покриття призводило до збільшення всіх складових напружено-деформованого стану.

Порівняльний аналіз еквівалентних напружень (за Мізесом) однорідного тіла і зміцненого ЕМО за цією оптимальною схемою показав, що їх максимальні напруження однакові 3,77 МПа. Виявлено (рис. 4), що як розтягувальні, так і стискальні дотичні напруження, які виникають на поверхні, майже рівні за абсолютною величиною. Максимальні значення становлять 0,02 МПа, що практично дорівнює максимальним напруженням незміцненого тіла 0,019 МПа (див. рис. 2).

Таким чином, завдяки оптимальному взаємному розташуванню ЛЗЗ і площі покриву поверхні можна досягти мінімального впливу концентрації напружень за рахунок ЛЗЗ у поверхневому шарі.

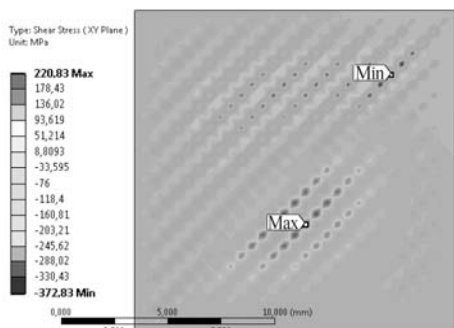


Fig. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Розподіл дотичних напружень тіла з однонаправленими треками зміцнення.

Fig. 3. Distribution of tangent stresses of a body with one-directed hardened tracks.

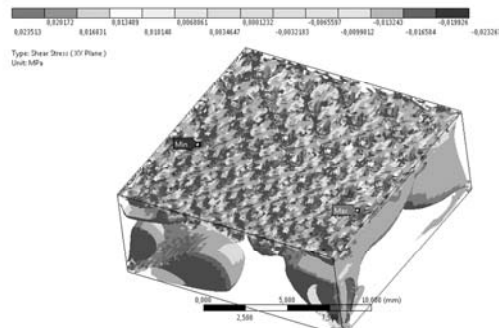


Fig. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Ізоповхні розподілу дотичних напружень тіла з перехресними треками зміцнення.

Fig. 4. Isosurfaces of distribution of tangent stresses of a body with cross hardened tracks.

Щоб експериментально перевірити вплив напружено-деформованого стану на зносотривкість дискретно зміцненої ЕМО поверхні за вказаними варіантами, провели трибологічні випробування циліндричних зразків зі сталі 40Х (див. рис. 1). Додатково здійснили металографічний аналіз обробленої поверхні цих зразків. Встановили, що будова поверхневого шару суттєво залежить від режимів ЕМО: швидкості контакту  $V$ , подачі  $S$  та швидкості охолодження. Виявили, що за вибраних режимів на поверхні формується тонкий шар безструктурного мартенситу з твердістю  $H_{\mu} = 560$  МПа та підшар значної глибини  $h = 0,6...0,8$  mm складної будови: мартенсит гартування, сорбіт гартування, троостит відпуску, що пов'язано з розпадом аустеніту у різних температурних зонах, які формуються під час ЕМО (рис. 5).

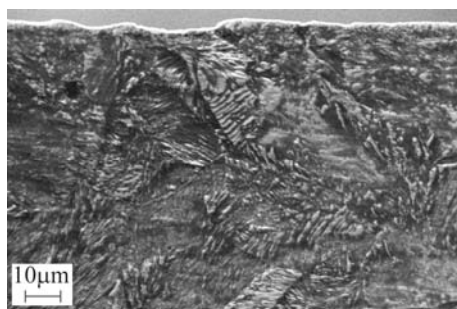


Рис. 5 Структура шару сталі 40Х після ЕМО.  $\times 1000$ .

Fig. 5. Structure of 40X steel layer after electrochemical treatment.  $\times 1000$ .

Безпосередньо під зміцненим шаром в окремих мікроб'ємах формується сорбіт гартування (температура розпаду  $600...700^{\circ}\text{C}$ ) і становить лише  $2...3\%$  об'єму. Структура трооститу відпуску формується за рахунок розпаду мартенситу гартування ( $380...450^{\circ}\text{C}$ ).

Дія контактного тиску сприяє подрібненню блоків і текстуванню поверхневих шарів, що є характерним для високотемпературної термомеханічної обробки. Сформована таким чином будова зміцненого шару має твердість  $H_{\mu} = 400...460$  МПа, що забезпечує як хорошу припрацьовуваність поверхні, так і підвищену зносотривкість під час тертя.

За ЕМО за технологією формування зміцнених дискретних поверхонь будова характеризується наявністю сегментноподібних об'ємів, межа контакту яких з

основним металом складається з трооститу відпуску, що сприяє релаксації внутрішніх напружень за дії контактних тисків під час тертя та збільшенню опору втомі. Мета подальших досліджень – виявити вплив однобічного і двобічного обкатування на трибологічні властивості обробленої поверхні. Перед випробуванням на зносотривкість зразки обточували до стану гладкої поверхні  $\varnothing 24$  mm, оскільки після обкатування виявили канавки втискання ролика глибиною до 0,5 mm і відповідні напливи витисненого з них металу. Твердість обточеної поверхні 2-го зразка становила 25 HRC, а 3-го – 28 HRC.

Електромеханічна обробка циліндричної поверхні твердосплавним роликом призводить до різного ступеня дискретного зміцнення поверхні зразка залежно від способу обкатування, що проявляється під час випробувань поверхні на її зносотривкість. За однобічного і двобічного обкатування за інших однакових умов зносотривкість дискретно зміцненої поверхні зразків зі сталі 40X відповідно в 1,26 і 3,62 рази збільшується порівняно зі зносотривкістю поверхні незміцненого зразка (рис. 6). Підвищення зносотривкості зумовлено як виникненням дискретних зон вищої твердості, ніж твердість основного металу, так і рівнем та характером внутрішніх напружень у поверхневому шарі, які з'являються під час утворення таких зон. Теоретичний аналіз напруженого стану дискретно зміцненої поверхні показав, що за однобічного обкатування в поверхневому шарі виникають значні дотичні невірноважені залишкові напруження розтягу матеріалу, які практично відсутні за двобічного обкатування. Оскільки дотичні розтягувальні напруження в поверхневому шарі негативно впливають на його зносотривкість [6, 7], то підвищення зносотривкості на 26% за однобічного обкатування, очевидно, зумовлено зміцненням дискретних зон і меншим впливом напруженого стану обробленої таким чином поверхні. Суттєве підвищення зносотривкості у 3,62 рази за двобічного обкатування можна обґрунтувати тим, що перехресне формування дискретних зон призводить до вагомішого їх зміцнення за умови врівноваженого напруженого стану поверхні порівняно з однобічним обкатуванням.

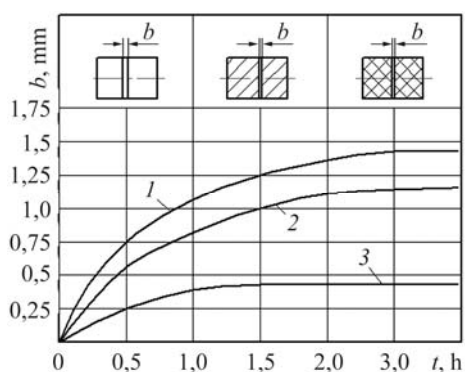


Рис. 6. Зміна зносу за шириною доріжки тертя зразків зі сталі 40X: 1 – зразок № 1; 2 – № 2; 3 – № 3.

Fig. 6. Wear variation by the width of the friction track of 40X steel specimens: 1 – specimen № 1; 2 – № 2; 3 – № 3.

Під час аналізу доріжок тертя встановлено, що поверхня стирання незміцненого зразка має чітко видимі безперервні лінії в напрямі тертя, а на поверхні слідів стирання дискретно зміцнених зразків проявляються лише невеликі локальні кратери, зумовлені зношуванням окремих зон, що обумовлюється механічними властивостями і напруженим станом поверхонь зразків зміцнених ЕМО.

## ВИСНОВКИ

Шляхом правильного вибору схеми обробки, взаємного розташування зносотривких елементів білого шару можна досягти мінімальної концентрації напружень у поверхневому шарі під час експлуатації при цьому істотно збільшити зносотривкість поверхні.

Електромеханічна обробка призводить до різного ступеня дискретного зміцнення поверхні зразка залежно від способу обкатування, що проявляється під час

випробувань поверхні на її зносотривкість. За однобічного і двобічного обкатування за інших однакових умов зносотривкість дискретно зміцненої поверхні зразків зі сталі 40Х відповідно в 1,26 і 3,62 рази збільшується порівняно зі зносотривкістю поверхні незміцненого зразка.

Підвищення зносотривкості зумовлено як виникненням дискретних зон вищої твердості, ніж твердість основного металу, так і рівнем та характером внутрішніх напружень у поверхневому шарі, які з'являються під час утворення таких зон. Теоретичний аналіз напруженого стану дискретно зміцненої поверхні показав, що за однобічного обкатування в поверхневому шарі виникають значні дотичні невірноважені залишкові напруження розтягу матеріалу, які практично відсутні за двобічного обкатування.

*РЕЗЮМЕ.* Проаналізовано методом конечных элементов напряженно-деформированное состояние поверхности после дискретной электромеханической обработки при различных геометрических схемах расположения локально упрочненных зон. Показано, что оптимальной схемой при условии минимизации напряженного состояния поверхности при трении является вариант с перекрестными треками упрочнения поверхностных слоев.

*SUMMARY.* The method of finite element analysis of the stress-strain state of the surface after discrete electromechanical treatment at various geometrical arrangement schemes of locally hardened zones is analyzed. The analysis of theoretical studies showed that the optimal scheme in terms of minimizing the stress state of the surface under friction is the option with cross tracks hardening of surface layers.

1. Аскинази Б. М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. – М.: Машиностроение, 1989. – 200 с.
2. Диха О. В., Чумаков О. П. Технологія і зносостійкість дискретно-зміцнених маслоутримувальних циліндричних поверхонь // Тези допов. міжнар. наук. конф. “Сучасні проблеми трибології”. – К.: НАУ, 2010. – С. 141.
3. Сорокатий Р. В., Диха М. О. Геометричні параметри дискретної електромеханічної обробки і напружений поверхневий стан // Проблеми трибології. – 2012. – № 4. – С. 123–126.
4. Диха О. В., Вельбой В. П., Диха М. В. Теорія та експеримент методу трибологічних випробувань за схемою “циліндр–куля” // Там же. – 2012. – № 2. – С. 135–138.
5. Ляшенко Б. А., Сорока Е. Б., Рутковский А. В. Определение параметров дискретной структуры покрытий с учетом остаточных напряжений // Проблемы прочности. – 2002. – № 4. – С. 119–125.
6. Кіндрачук М. В., Яхья М. С., Луцк Н. В. Напружено-деформований стан дискретно оброблених лазером сталей під час контактної взаємодії // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. Нац. авіа. ун-т. – 2006. – Вип. 46. – С. 29–39.
7. Вельбой В. П. Дослідження впливу попереднього напруження контактної поверхні тертя на її зношування // Проблеми трибології. – 2012. – № 2. – С. 78–83.

Одержано 27.02.2013