

УДК 539.3

ВПЛИВ НАВАНТАЖЕННЯ НА ДЕФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ СТАЛЕЙ З БОРОХРОМОВИМ ПОКРИВКОМ

Л. А. АРЕНДАР, Х. Б. ВАСИЛІВ, В. В. ШИРОКОВ

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Проаналізовано деформаційні процеси, які виникають між співдотичними поверхнями з різними фізико-механічними характеристиками під час статичного навантаження. Встановлено, що визначальний вплив на опір контактному навантаженню та еволюцію поверхні за інших рівних умов мають міцнісні властивості поверхневих шарів. Для борохромованої сталі, мікротвердість якої 18...22 GPa, зближення відбувається внаслідок крихкого руйнування мікровиступів та їх пружної взаємодії з матеріалом контртіла.

Ключові слова: *сталь, борохромовання, профілограма, мікровиступ, трибопара, зближення, притирання.*

Здебільш деталі машин під час тертя руйнуються на початкових етапах в умовах припрацювання, коли у межах номінальної площі контактують окремі вершини нерівностей співдотичних поверхонь. Тиск однієї поверхні на іншу зосереджується на мікроділянках, які сумарно складають фактичну площу контакту [1–5]. Через їх незначні розміри істинні напруження можуть бути настільки великі, що дотичні виступи профілів пластично деформуються аж до зрізання під час проковзування поверхонь. У результаті найвищі мікровиступи частково чи повністю руйнуються, утворюючи рельєф з новою спадковою топографією, для якої характерні інші, ніж у вихідному стані, відхилення від ідеальної форми.

Оцінити характер деформування поверхневого шару матеріалів, до якого призводить припрацювання чи тертя на перших його етапах, можна, аналізуючи зміни параметрів профілю контактних поверхонь після прикладання відповідного стаціонарного навантаження [5]. Такі залежності дають можливість враховувати деформації та знос на етапі припрацювання, прогнозувати його параметри, зокрема тривалість, щоб отримати експлуатаційний рельєф поверхонь, який забезпечував би мінімальне зношування під час усталеного тертя. Особливо доцільний такий метод, коли використовують нові конструкційні матеріали та з модифікованою поверхнею, у тому числі з покриттями, оскільки адекватні розрахункові методи практично відсутні [5].

Ефективним методом підвищення зносотривкості вуглецевих сталей є нанесення багатокомпонентних покриттів, зокрема, на основі бору і хрому [6, 7]. Тому нижче вивчали вплив питомого стиску на деформування поверхневого шару борохромованої Сталі 45.

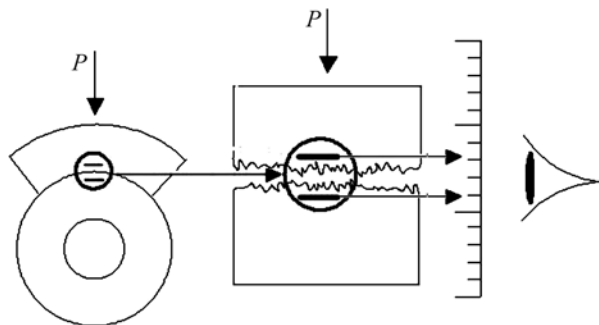
Методика експерименту. Вплив стиску оцінювали за зближеннями між поверхнями досліджуваної сталі (колодка) і контртіла (диск) зі сталі ШХ15 (рис. 1). Номінальна площа контакту 200 mm^2 . Навантаження прикладали програмовано двічі: від максимального до заданого з подальшим розвантаженням та після розвантаження за тією ж схемою. Нормальним навантаженням на контактну пару задавали номінальний тиск від 5 до 25 МПа. Швидкість прикладання навантаження 200 kg/min .

Контактна особа: Х. Б. ВАСИЛІВ, e-mail: chvasyliv@ipm.lviv.ua

Зближення між контактуючими поверхнями оцінювали катетометром КМ-5 з точністю 1 μm , фіксуючи зміну відстані між реперними точками, нанесеними на певній відстані від зони поділу між тілами (рис. 1). У результаті отримували параметри зближення, які кількісно характеризують деформацію шорсткого шару під заданим навантаженням.

Рис. 1. Схема визначення зближення матеріалів під стискальним навантаженням.

Fig. 1. Scheme for determining the materials approach under compressive load.



Профілограми з поверхонь фіксували профілографом-профілометром “Калибр С-265” із записом на цифровий носій. За допомогою розробленого програмного забезпечення [8] визначали основні характеристики профілю поверхонь: висотні R_a , R_z , R_{max} , R_p , крокові S і S_m та опорні криві (ГОСТ 2789-73, ISO 4287). Мікроструктуру поверхонь аналізували металографічним методом, використовуючи оптичний мікроскоп “Neophot-2”, а також сканівний електронний EVO 40XVP зі системою мікрорентгеноспектрального аналізу на енергодисперсійному рентгенівському спектрометрі INCA ENERGY 350.

Борохромували Сталь 45 у реакційному середовищі (mass.%) 4 В + 7 Cr_2O_3 + 89 Li при 950°C упродовж 8 h згідно з методикою [7]. Отриманий покрив мав максимальну мікротвердість 22 GPa. Під видимим його шаром на глибині до 250...280 μm утворюється дифузійна зона з підвищеною, порівняно з матрицею, мікротвердістю. На межі з матрицею дифузійний шар має голчасту будову, властиву боридним фазам. Максимальна концентрація бору і хрому на покритій поверхні сталі досягає відповідно 13,8...16,6 і 10,4...16,6 mass.%. Шорсткість поверхні борохромованої сталі відповідала 5–6, а сталі ШХ15 – шостому квалітетам чистоти. Твердість контртіла з гартованої сталі ШХ15 була HRC 59, Сталі 45 без покриву після гартування HRC 44.

Експериментальні результати та їх обговорення. Отримано залежності зближення між металами від контактних тисків, розрахованих за номінальною площею (рис. 2). Для Сталі 45 без покриву воно суттєвіше залежить від контактного тиску, ніж для борохромованої, і за початкового навантаження в діапазоні 5...25 МПа збільшується від 1,2 до 4,5 μm . За повторного навантаження відстань між поверхнями зменшується у 3–4 рази. Після борохромовання зближення поверхонь матеріалів удвічі менше і становить 0,7... 2,5 μm за початкового навантаження і 0,25...0,75 μm – за повторного. Емпіричні залежності зближення поверхонь мають такий вигляд: для сталі без покриву під час початкового навантаження $a = -0,011 + 0,293P - 0,005P^2$, за повторного $a = 0,008 + 0,053P - 7,64 \cdot 10^{-4}P^2$; для борохромованої, відповідно, $a = -0,024 + 0,161P - 0,002P^2$ і $a = -0,008 + 0,047P - 5,86 \cdot 10^{-4}P^2$.

Оскільки за первинних навантажень відбулося попереднє пластичне деформування та руйнування поверхні на фактичній площі контакту, то за повторних зближень поверхонь ці процеси менш інтенсивні. Різниця між зближеннями a за обох навантажень для борохромованої сталі значно менша, ніж без покриву, що свідчить про його суттєву вищу несучу здатність.

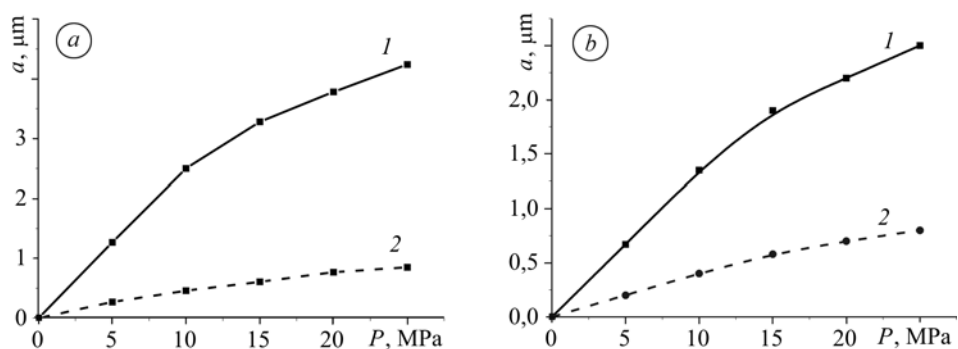


Рис. 2. Вплив номінального тиску на зближення для пар: Сталь 45–сталь ШХ15 (а); Сталь 45 з борохромовим покритвом–сталь ШХ15 (б). 1 – початкове навантаження; 2 – повторне.

Fig. 2. The influence of nominal pressure on the approach for couples: Steel 45–steel ШХ15 (а); Steel 45 with B–Cr coating–steel ШХ15 (б). 1 – initial load; 2 – repeated load.

Поверхневий шар під навантаженням деформується на дискретних ділянках розміром 20...200 μm (рис. 3). На сталевій поверхні без покриття зафіксовано пошкоди, які свідчать про суттєву залишкову локальну деформацію, а на борохромовій після стиску підтверджують квазікрихке руйнування, внаслідок якого поверхневі мікровиступи частково диспергують.

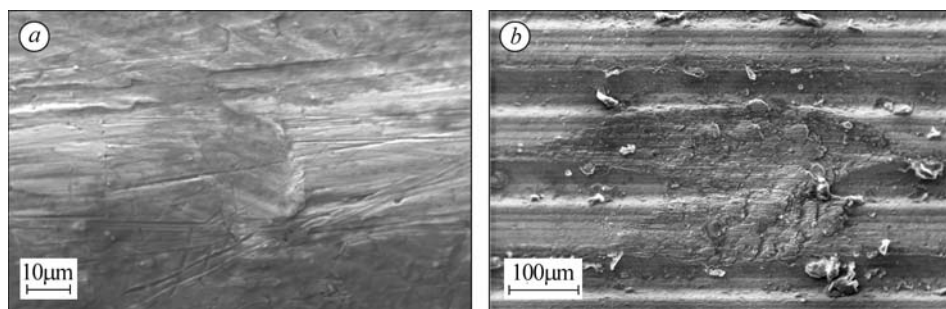


Рис. 3. Контактна поверхня Сталі 45 без покриття (а) і борохромована (б) після повторного навантаження та досягнення номінального тиску 25 МПа.

Fig. 3. Contact surface of Steel 45 without coating (а) and with B–Cr coating (б) after repeated loading and achieving the nominal pressure of 25 МПа.

Таблиця 1. Різниця між зближеннями за початкового і повторного навантажень Сталі 45 (μm)

| Контактний тиск, МПа | Без покриття | Борохромована | Різниця |
|----------------------|--------------|---------------|---------|
| 5 | 1 | 0,4 | 2,5 |
| 10 | 2,04 | 0,89 | 2,3 |
| 15 | 2,67 | 1,29 | 2,1 |
| 20 | 3,01 | 1,43 | 2,1 |
| 25 | 3,39 | 1,65 | 2,1 |

Тому аналізували параметри топографії поверхні (рис. 4) і за відповідними опорними кривими (рис. 5) оцінювали реальну площу контакту матеріалів за різного зближення та відповідних контактних тисків на мікровиступах.

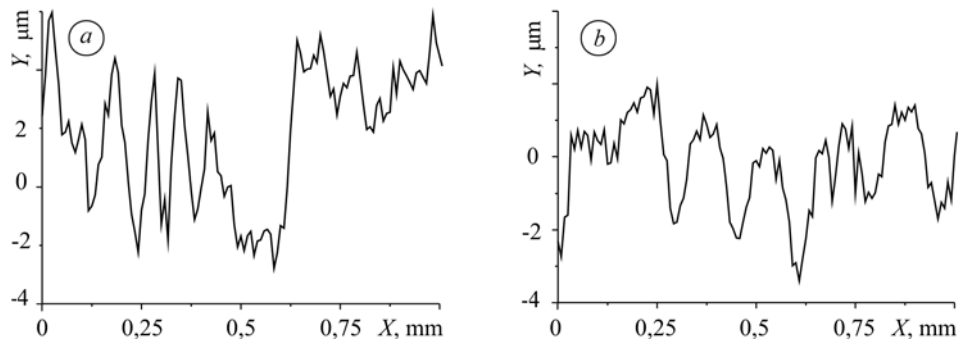


Рис. 4. Топографія поверхні Сталі 45 без покриття (а) та борохромованої (b).

Fig. 4. Surface topography of Steel 45 without coating (a) and with B–Cr coating (b).

Наведено профілограми (рис. 4) та параметри профілю поверхні Сталі 45 у вихідному стані та з покритвом на основі бору і хрому (табл. 2), за якими побудовано опорні криві розподілу матеріалу у шорсткому шарі [8]. Виявлено, що, борохромовання сприяє вигладжуванню поверхні, про що свідчить зменшення її висотних параметрів, збільшення радіусів закруглення мікровиступів та характер опорних кривих (рис. 5).

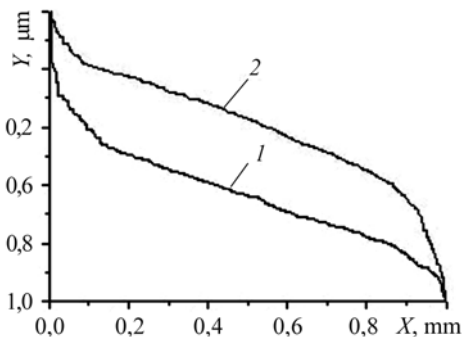
Таблиця 2. Параметри профілю для вихідної та борохромованої поверхонь Сталі 45 (μm)

| R_a | R_z | R_{max} | R_q | R_p | S | S_m |
|---------------|---------|-----------|--------|--------|---------|----------|
| Вихідний стан | | | | | | |
| 3,9355 | 6,62 | 15,8428 | 3,7649 | 9,9071 | 55,3182 | 229,52 |
| З покритвом | | | | | | |
| 2,1144 | 6,77482 | 9,195 | 2,4678 | 6,5387 | 69,9064 | 147,8197 |

За опорною кривою для кожного реального зближення a знаходили відносне $\varepsilon = a/R_{max}$ та відповідну відносну опорну довжину профілю η_s . Тобто для даного зближення відношення контактувальних мікровиступів до їх загальної кількості становить η_s . Вважаючи профіль поверхні ізотропним, для заданого зближення знаходили максимально можливу реальну площу поверхні контакту $S_c = S\eta_s^2$, де S – номінальна площа контакту. Відповідно реальний контактний тиск на мікровиступах визначали як відношення прикладеного навантаження до площі S_c .

Рис. 5 Опорні криві профілів поверхні Сталі 45 без покриття (1) та борохромованої (2).

Fig. 5. Supporting curves of surface profile of Steel 45 without coating (1) and with B–Cr coating (2).



Далі знаходили фактичний тиск P , який виникає за заданого зближення a на мікровиступах (рис. 6). На початковому етапі за зближення поверхонь 1...2 μm

контактує менше 10% від загальної кількості мікровиступів. Навантаження розподіляється на невелику площу контакту, створюючи тиски понад 1 GPa.

Згідно з побудованими залежностями (рис. 6), для Сталі 45 уже за зближення до 0,5 μm можлива не лише пластична деформація, оскільки за цих умов на мікровиступах зосереджуються контактні напруження, які перевищують границю міцності матеріалу, але й крихке їх руйнування у поверхневих шарах. За зближення понад 1,5 μm релаксація напружень внаслідок пружної деформації практично вичерпана. Для борохромованої сталі, мікротвердість якої доволі висока (18...22 GPa) (рис. 7), характер зміни зближення кількісно і якісно інший, оскільки суттєве деформування і руйнування борохромованого шару реалізується лише за досягнення напружень, близьких до тих, які спричиняють крихке руйнування мікровиступів і на порядок вищі, ніж у вихідного матеріалу.

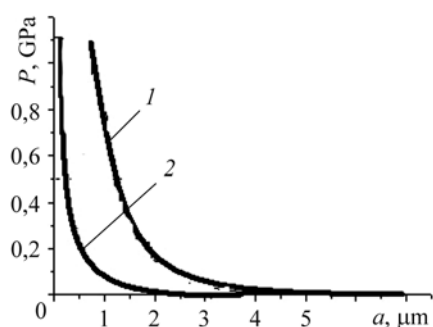


Рис. 6. Fig. 6.

Рис. 6. Залежність фактичного тиску P на мікровиступах Сталі 45 без покриття (1) і борохромованої (2) від зближення a (номінальний контактний тиск 5 МПа).

Fig. 6. Dependence of the real contact pressure, P , on microasperities of Steel 45 (1) and Steel 45 with B-Cr coating (2) on the approach, a , (nominal contact pressure 5 MPa).

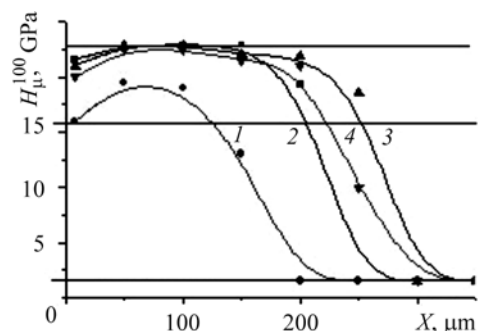


Рис. 7. Fig. 7.

Рис. 7. Мікротвердість борохромових покриттів на Сталі 45 за різних режимів нанесення: 1 – 850°C; 2 – 950; 3 – 1050°C; 1–3 – тривалість 8 h; 4 – 950°C, 10 h.

Fig. 7. Microhardness of B-Cr coating on Steel 45 under different conditions of application: 1 – 850°C; 2 – 950; 3 – 1050°C; 1–3 – time 8 h; 4 – 950°C, 10 h.

За повторного навантаження деформація поверхні переважно пружна і подальше зближення матеріалів на порядок менше, оскільки фактична площа контакту після початкового навантаження суттєво зростає. Цим пояснюють також відсутність характеристичних відмінностей у топографії поверхні та її структурі. Тому надалі можна вважати несуттєвим вплив повторного статичного навантаження і на інші параметри.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано деформаційні процеси, які виникають між співдотичними поверхнями з різними фізико-механічними характеристиками під статичним навантаженням. Встановлено, що за зближення поверхонь на 1...1,5 μm контактує менше 10% мікровиступів від загальної їх кількості. Це створює напруження, за яких можливе крихке їх руйнування у поверхневих шарах Сталі 45. За зближення понад 1,5 μm релаксація напружень внаслідок пружної деформації практично вичерпана. Для борохромованої сталі, мікротвердість якої 18...22 GPa, зближення відбувається як внаслідок крихкого руйнування мікровиступів, так і пружної взаємодії з матеріалом контргіла. Борохромований шар суттєво деформується і руйнується лише за досягнення напружень, близьких до тих, які зумовлюють

крихке руйнування мікроступів і на порядок вищі, ніж у сталі без покриву. Наведені експериментальні та розрахункові результати можуть бути корисні для аналізу механізмів зношування, вибору трибоматеріалів, обґрунтування режимів припрацювання.

РЕЗЮМЕ. Проанализированы деформационные процессы, возникающие между соприкасающимися поверхностями с различными физико-механическими характеристиками при статической нагрузке. Установлено, что на сопротивление контактной нагрузке и эволюцию поверхности при прочих равных условиях в основном влияют свойства поверхностных слоев. Для борхромированной стали с микротвердостью 18...22 ГПа сближение происходит вследствие хрупкого разрушения микроступов и упругого взаимодействия с материалом контртела.

SUMMARY. The deformation processes on contact surfaces with different physical and mechanical characteristics under the influence of static load are analyzed. The strength properties of the surface determine its resistance to contact load and the surface evolution. The approach of steel with B-Cr coating (microhardness 18...22 GPa) occurs due to brittle fracture of microasperities and elastic interaction with the material of counterbody. The experimental data and calculation results can be useful to analyze the mechanisms of wear, selection of tribomaterials.

1. *Справочник по триботехнике. Теоретические основы / Под ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе.* – М.; Варшава: Машиностроение, 1989. – Т. 1. – 397 с.
2. *Широков В. В., Василів Х. Б., Арендар Л. А.* Оцінка зближення і фактичної площі контакту фрикційних гетерогенних поверхонь // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 2. – С. 88–90.
3. *Костецкий Б. И.* Поверхностная прочность материалов при трении. – К.: Техніка, 1976. – 294 с.
4. *Бакли Д.* Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. – М.: Машиностроение, 1986. – 359 с.
5. *Демкин Н. Б., Рыжов Э. В.* Качество поверхности и контакт деталей машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
6. *Особливості формування та властивості борхромових покривів, отриманих на сталях у розплаві літію / В. В. Широков, Х. Б. Василів, Л. А. Арендар, Є. М. Рудковський // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2010. – **46**, № 4. – С. 13–20.
(*Shyrokov V. V., Vasylyiv Kh. B., Arendar L. A., and Rudkovs'kyi E. M.* Specific Features of Formation and Properties of Boron-Chromium Coatings Obtained on Steels in Lithium Melts // *Materials Science.* – 2010. – **46**, № 4. – P. 440–447.)
7. *G01N13/00.* Патент на корисну модель №44185. Спосіб нанесення дифузійних борхромових покривів / В. В. Широков, Л. А. Арендар, Є. М. Рудковський, Х. Б. Василів, Н. Б. Рацька. – Бюл. №18; опубл. 25.09.2009.
8. *Комп'ютерний обробіток профілограм фрикційних поверхонь / В. В. Широков, Ю. І. Ковальчик, Х. Б. Василів, О. М. Василів // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2005. – **41**, № 1. – С. 93–96.
(*Shyrokov V. V., Arendar L. A., Koval'chik Yu. I., Vasylyiv Kh. B., and Vasylyiv O. M.* Computer Processing of Profilograms of Friction Surfaces // *Materials Science.* – 2005. – **41**, № 1. – P. 107–112.)

Одержано 23.06.2011