

Кіндрачук М.В.,***Клімін В.В.,*****Диха О.В.,******Терентієв О.Ф.****** Національний авіаційний університет,
м. Київ, Україна** Хмельницький національний університет,
м. Хмельницький, Україна*** НТУУ "КПІ",
м. Київ, Україна**ВИПРОБУВАННЯ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ
ЗРАЗКІВ ПІСЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ГАРЯЧИМ
ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ**

В роботах [1 - 5] запропонована технологія відновлення зношених деталей типу «вал», «вал-шестерня» методом гарячого пластичного деформування, у відповідності з якою зношена деталь відновлюється з припуском на фінішну механічну обробку без використання додаткових ремонтних елементів і металу. Виконання операції радіального пластичного роздавання проводиться дорном через технологічний отвір до заповнення робочого об'єму матриці з гарантованим обтисненням. Проведене дослідження мікроструктури поверхневого шару відновлених деталей показало на можливість покращення їх триботехнічних характеристик порівняно навіть з новими деталями.

Метою даної роботи є порівняльні випробування зносостійкості зразків підданих відновленню гарячим роздаванням і отриманих за базовою технологією для обґрунтування ефективності запропонованої технології [1 - 5]. Для реалізації поставленої мети був використаний і удосконалений метод випробувань зразків із змінною площадкою зношування, раніше теоретично обґрунтований в роботах [6 - 7].

За базову геометричну схему лабораторних випробувань на зношування циліндричних зразків був прийнятий контакт двох циліндрів, вісі яких перетинаються під кутом 90° (рис. 1) [6].

Теоретичні основи методу випробувань

Умови випробувань за даною схемою приймалися наступними:

- 1) радіуси циліндрів R_1 і R_2 в загальному випадку різні: $R_1 \neq R_2$;
- 2) циліндри притискаються один до одного з постійним зусиллям Q ;
- 3) циліндр 1 – обертається та не зношується, циліндр 2 – не обертається і зношується;
- 4) в процесі випробувань формується еліптична площадка контакту, розміри якої a і b періодично вимірюються;
- 5) за результатами випробувань отримують експериментальні функції $a(S)$ і $b(S)$, де S – шлях тертя.

В даній роботі для випробувань зносостійкості за схемою перехресних циліндрів запропоновано застосувати двохфакторну залежність (контактний тиск, швидкість ковзання) інтенсивності I зношування у наступному вигляді:

$$I = u_w(S) / dS = K_w \sigma^m(S) V^n, \quad (1)$$

де σ – тиск в контактї;

V – відносна швидкість ковзання;

K_w, m, n – параметри зношування.

Зносостійкість досліджуваних зразків оцінювали шляхом порівняння значень інтенсивності їх зношування I , яка розраховується при відомих параметрах залежності (1). Задача полягала у визначенні виразів для параметрів зношування як функції від геометричних і кінетостатичних вихідних даних.

При розв'язку задачі обидва контактуючих циліндри приймалися такими, що не деформуються, а площадка зношування внаслідок малості за розміри контактуючих тіл вважалася плоскою.

Розглянемо геометрію контакту перехресних циліндрів. З перетину кола циліндра 1 та твірної циліндра 2, нормального до вісі циліндра 1, знайдемо залежність між лінійним зносом u_{w0} та напівширини площадки зносу a . Схема визначення цієї залежності показана на рис. 2.

З геометричної схеми максимальний знос u_{w0} в центрі площадки визначиться із наступних співвідношень:

$$u_{w0} = R_1 - \sqrt{R_1^2 - a^2} \Rightarrow (u_{w0} - R_1)^2 = R_1^2 - a^2 \Rightarrow u_{w0}^2 - 2u_{w0}R_1 + R_1^2 = R_1^2 - a^2.$$

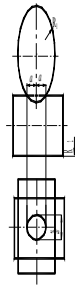


Рис. 1 – Схема випробувань циліндрів з перехресними осями

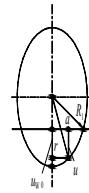


Рис. 2 – Геометрична схема контакту кола і площини

При $u_{w0} \ll R_1$ доданком u_{w0}^2 в лівій частині останнього виразу можна знехтувати. Тоді після перетворень отримаємо:

$$u_{w0} = \frac{a^2}{2R_1} = \frac{a^2}{2R_2}. \quad (2)$$

Звідки отримаємо співвідношення напіввісей еліпсу площадки контактування:

$$\frac{a}{b} = \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{0,5}; \quad b = a \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{0,5}. \quad (3)$$

Площу еліпса $F = \pi ab$ можна представити через одну вісь та відношенні радіусів у вигляді:

$$F = \lambda a^2; \quad \lambda = \pi \cdot \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{0,5}. \quad (4)$$

При обробці експериментальних даних зручно користуватись середнім значенням розмірів площадки контакту, яке визначалось з умови рівності площ еліпса та приведеного кола радіуса \bar{a} :

$$F = \pi ab = \pi \bar{a}^2. \quad (5)$$

Звідки:

$$\bar{a} = (ab)^{0,5}. \quad (6)$$

Таким чином, залежність максимального зносу в центрі площадки контакту буде дорівнювати:

$$u_{w0} = \frac{\bar{a}^2}{2R}, \quad (7)$$

де $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ – приведений радіус циліндрів.

Контактний тиск з урахуванням рівномірного розподілу може бути визначений із співвідношення:

$$\sigma(S) = \frac{Q}{F} = \frac{Q}{\pi ab} = \frac{Q}{\pi \bar{a}^2(S)}. \quad (8)$$

Інтегруючи вираз для закономірності зношування (1), отримаємо її інтегральну форму:

$$u_w(S) = K_w \int_0^S \sigma^m(S) V^n dS. \quad (9)$$

Підставляючи в ліву частину цього виразу рівняння для зносу через розміри площадки контакту (7), а в праву вираз (8) для контактного тиску, отримаємо:

$$\frac{\bar{a}^2(S)}{2R} = K_W \int_0^S \left[\left(\frac{Q}{\pi \bar{a}^2(S)} \right) \right]^m V^n dS. \quad (10)$$

Це рівняння для визначення параметрів K_W, m, n при відомій з експерименту функції $\bar{a}(S)$.

Представимо експериментальну функцію $\bar{a}(S)$ у вигляді степеневі апроксимації:

$$\bar{a}(S) = cS^\beta. \quad (11)$$

З достатньою точністю з експериментальних даних параметри апроксимації c та β можна визначити за двома парами точок $(a_1, S_1); (a_2, S_2)$:

$$\beta = \frac{\lg(a_1/a_2)}{\lg(S_1/S_2)}; \quad c = \frac{a_1}{S_1^\beta}. \quad (12)$$

Підставляючи степеневу апроксимацію (11) в рівняння (10), після інтегрування отримаємо:

$$\frac{c^2 S^{2\beta}}{2R} = K_W \left(\frac{Q}{c^2 \pi} \right)^m V^n \frac{S^{1-2\beta m}}{1-2\beta m}. \quad (13)$$

З умови виконуваності рівняння (13) слідує: $2\beta = 1 - 2\beta m$, звідки:

$$m = \frac{1 - 2\beta}{2\beta}. \quad (14)$$

при $m = (0 \dots 10 \dots 100)$: $\beta = (0,5 \dots 0,045 \dots 0)$; при $m = 1$: $\beta = 0,25$.

Для знаходження параметра n проводяться випробування при двох значеннях швидкості V_1 і V_2 , звідки отримують дві групи даних з параметрами:

$$a = c_1 S^\beta; \quad a = c_2 S^\beta. \quad (15)$$

В даному випадку розглядається задача визначення параметрів зношування за наслідками випробувань зразків з площадкою контакту $a(S)$, що змінюється в процесі зношування. Зміна площадки зношування викликає зміну значень контактної тиску $\sigma(a)$. Показник степеня m характеризує швидкість зміни контактних тисків і пов'язаний з параметром β експериментальної залежності. Оскільки швидкість ковзання V не залежить від шляху тертя S , то вона не впливає на параметр m , а впливає тільки на масштабний коефіцієнт K_W .

Підставляючи вирази (15) в (13), отримаємо два рівняння:

$$\left. \begin{aligned} \frac{c_1^2 S^{2\beta}}{2R} &= K_W \left(\frac{Q}{c_1^2 \pi} \right)^m V_1^n \frac{S^{2\beta}}{2\beta}; \\ \frac{c_2^2 S^{2\beta}}{2R} &= K_W \left(\frac{Q}{c_2^2 \pi} \right)^m V_2^n \frac{S^{2\beta}}{2\beta}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Розділивши перше рівняння на друге, після перетворень маємо:

$$\left(\frac{c_1}{c_2} \right)^{2m+2} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n. \quad (17)$$

Звідки:

$$n = (2m + 2) \frac{\lg(c_1/c_2)}{\lg(V_1/V_2)}. \quad (18)$$

Для знаходження коефіцієнта K_W скористаємось одним з рівнянь (16):

$$K_W = \frac{\beta c_1^{2m+2}}{R^*} \left(\frac{\pi}{Q} \right)^m \left(\frac{1}{V_1} \right)^n. \quad (19)$$

Результати випробувань

Випробування проводилися на універсальній установці для випробувань на тертя і зношування зразків різної геометричної форми [8]. Установка налагоджувалась для реалізації розглянутої вище теоретичної схеми перехресних циліндрів (рис. 4).

Для дослідження зносостійкості зразків, відновлених шляхом гарячого об'ємного роздавання були проведені експериментальні випробування зразків із сталі 18ХГТ діаметром 20 мм.

Перший зразок (базовий) представляв собою циліндричний валик з розмірами $d_1 l: 20 \times 50 \times 50$ мм з твердістю поверхні HRC50 (поверхневе зміцнення хіміко термічною обробкою).

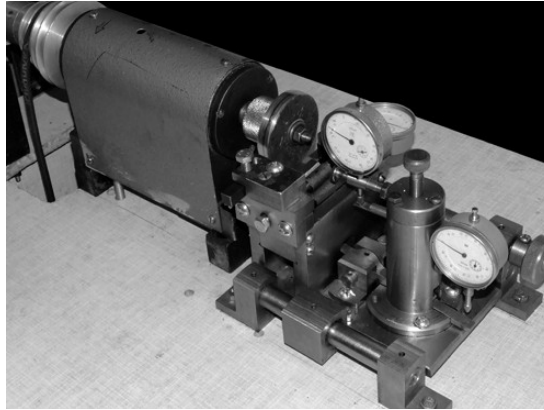


Рис. 3 – Загальний вигляд випробувальної установки

Другий зразок (модифікований) був отриманий після гарячого роздавання заготовки з технологічним отвором 10 мм (в подальшому заглушений) і розмірами $d_1 l: 20 \times 50 \times 50$ мм. Зразок був підданий індукційному нагріву і повному циклу хіміко-термічної обробки.

Для отримання залежностей розміру площадки контакту від шляху тертя були проведені випробування на зношування. Випробування проводилися за наступних умов:

- 1) частота обертання валу: $n_1: 265 \times 265$ об/хв; $n_2: 795 \times 795$ об/хв.; $V_1: 0,690,69$ м/с; $V_2: 2,08$ м/с.
- 2) діаметр контрзразка $d: 50 \times 50$ мм;
- 3) загальне вантаження на зразки $Q: 5 \times 5$ Н;
- 4) мастильна рідина: масло М10-Г2 ГОСТ 8581-73.

Під час випробувань через певний проміжок часу вимірювалися розміри осей еліптичної плями зношування $2a$ та $2b$ і розраховувався середній радіус площадки \bar{a} за (6).

Шлях тертя S розраховувався за формулою:

$$S = \pi d n t, \quad (20)$$

де d – діаметр контртіла;

n – кількість обертів за хвилину;

t – час.

Згідно описаній вище методиці були проведені випробування на зношування спочатку базового зразка зі сталі 18ХГТ. Дані, одержані в результаті експерименту, представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати випробувань базового зразка

№	t , хв	$2a$, мм	$2b$, мм	\bar{a} , мм	$S \cdot 10^6$, мм
1	4	0,839	0,564	0,344	0,1665
		0,947	0,643	0,390	0,4995
2	10	0,901	0,699	0,397	0,4164
		0,988	0,789	0,441	1,2492
3	20	0,979	0,802	0,443	0,8327
		1,129	0,919	0,509	2,498
4	40	1,012	0,867	0,468	1,665
		1,201	0,947	0,533	4,995

5	60	1,127	0,912	0,507	2,498
		1,345	1,01	0,582	7,494

В чисельнику наведені дані для швидкості ковзання V_1 , а в знаменнику для швидкості V_2 . Графічна інтерпретація результатів випробувань представлена на рис. 4.

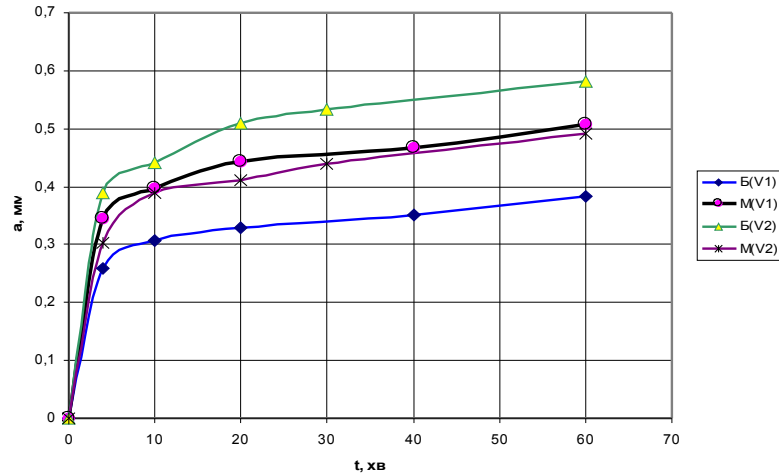


Рис. 4 – Графік залежності середнього розміру плями зношування від часу роботи:
Б – базовий зразок;
М – модифікований зразок

Для визначення параметрів степеневі апроксимації $\bar{a}(S)$ вибирались з масиву результатів випробувань дві пари точок:

$$\text{Для швидкості } V_1: T_1(a_1; S_1) = (0,443; 8,327 \cdot 10^5); T_2(a_2; S_2) = (0,507; 2,498 \cdot 10^6).$$

За виразами (12) отримаємо:

$$\beta_1 = \frac{\lg a_1 / a_2}{\lg S_1 / S_2} = \frac{\lg 0,443 / 0,507}{\lg 8,327 / 24,98} = 0,123; \quad c_1 = \frac{a_1}{S_1^\beta} = \frac{0,443}{(0,8327 \cdot 10^6)^{0,123}} = 0,082.$$

$$\text{Для швидкості } V_2: T_1(a_1; S_1) = (0,509; 2,498 \cdot 10^6); T_2(a_2; S_2) = (0,549; 7,494 \cdot 10^6).$$

$$\beta_2 = \frac{\lg a_1 / a_2}{\lg S_1 / S_2} = \frac{\lg 0,509 / 0,582}{\lg 2,498 / 7,494} = 0,122; \quad c_2 = \frac{a_1}{S_1^\beta} = \frac{0,509}{(2,498 \cdot 10^6)^{0,122}} = 0,084.$$

$$\text{Прийmemo } \beta = (\beta_1 + \beta_2) / 2 = 0,1225. \text{ Приведений радіус: } R = \frac{25 \cdot 10}{25 + 10} = 7,14 \text{ мм.}$$

Параметри моделі зношування для базового зразка із сталі 18ХГТ розрахуємо за (14) та (18-19):

$$m(B) = \frac{1 - 2\beta}{2\beta} = \frac{1 - 2 \cdot 0,1225}{2 \cdot 0,1225} = 3,079;$$

$$n = (2m + 2) \frac{\lg(c_1 / c_2)}{\lg(V_1 / V_2)} = (2 \cdot 3,079 + 2) \frac{\lg(0,082 / 0,084)}{\lg(265 / 795)} = 0,019;$$

$$K_w(B) = \frac{c_1^{2m+2}}{(2m+2)(Q/\pi)^m R V_1^n} = \frac{0,082^{2 \cdot 3,079 + 2}}{(2 \cdot 3,079 + 2)(0,5/3,14)^{3,079} \cdot 7,14 \cdot 0,69^{0,19}} = 6,737 \cdot 10^{-9}.$$

Тоді залежність для інтенсивності зношування для базового зразка матиме вигляд:

$$I_B = 6,737 \cdot 10^{-9} \sigma^{3,079} V^{0,019}.$$

Далі аналогічні експериментальні випробування проводились для модифікованого гарячим роздаванням зразка. Результати випробувань представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати випробувань на зношування модифікованого зразка

№	t , хв	$2a$, мм	$2b$, мм	\bar{a} , мм	$S \cdot 10^6$, мм
1	4	0,582	0,456	0,258	0,1665
		0,678	0,543	0,303	0,4995
2	10	0,789	0,477	0,307	0,4164
		0,888	0,682	0,389	1,2492
3	20	0,899	0,482	0,329	0,8327
		0,923	0,734	0,412	2,498
4	40	1,016	0,486	0,351	1,665
		0,978	0,794	0,440	4,995
5	60	1,193	0,492	0,383	2,498
		1,205	0,801	0,491	7,494

Графічно результати випробувань модифікованого зразка представлені на рис. 3.

Параметри закономірності зношування для модифікованого зразка визначалися аналогічно з попередніми викладками:

$$m(M) = 2,57; n = 0,018;$$

$$K_w(M) = 0,50843 \cdot 10^{-8}.$$

А вираз для визначення інтенсивності зношування для модифікованого зразка матиме вигляд:

$$I_M = 0,508 \cdot 10^{-8} \sigma^{2,57} V^{0,18}.$$

Таким чином, на базі проведених експериментальних випробувань зносостійкості базових та модифікованих гарячим роздаванням зразків, отримані залежності для інтенсивності зношування, які дозволяють кількісно порівняти зносостійкість трибоспрямижень в різних умовах експлуатації.

Визначимо як впливає величина контактного тиску на інтенсивність зношування для обох досліджуваних зразків. Для цього складемо табл. 3.

Таблиця 3

Залежність інтенсивності зношування від контактного тиску

№	σ , МПа	I_B	I_M
1	1	$6,690 \cdot 10^{-9}$	$5,046 \cdot 10^{-9}$
2	2	$5,653 \cdot 10^{-8}$	$2,996 \cdot 10^{-8}$
3	3	$1,97 \cdot 10^{-7}$	$8,495 \cdot 10^{-8}$
4	4	$4,777 \cdot 10^{-7}$	$1,779 \cdot 10^{-7}$
5	5	$9,496 \cdot 10^{-7}$	$3,157 \cdot 10^{-7}$

Графічна залежність інтенсивності зношування від контактного тиску представлена на рис. 5.

Отримані результати дають можливість порівнювати зносостійкість базового і модифікованого зразків при значеннях діючого робочого контактного тиску. Так, наприклад, при робочому контактному

тиску $\sigma_p = 3$ МПа маємо: $\frac{I_M}{I_B} = \frac{1,97 \cdot 10^{-7}}{8,495 \cdot 10^{-8}} = 2,3$ рази. Тобто, зразок, підданий відновленню гаря-

чим роздаванням буде мати зносостійкість при роботі з контактним тиском 3 МПа в 2,3 вищу ніж базовий зразок.

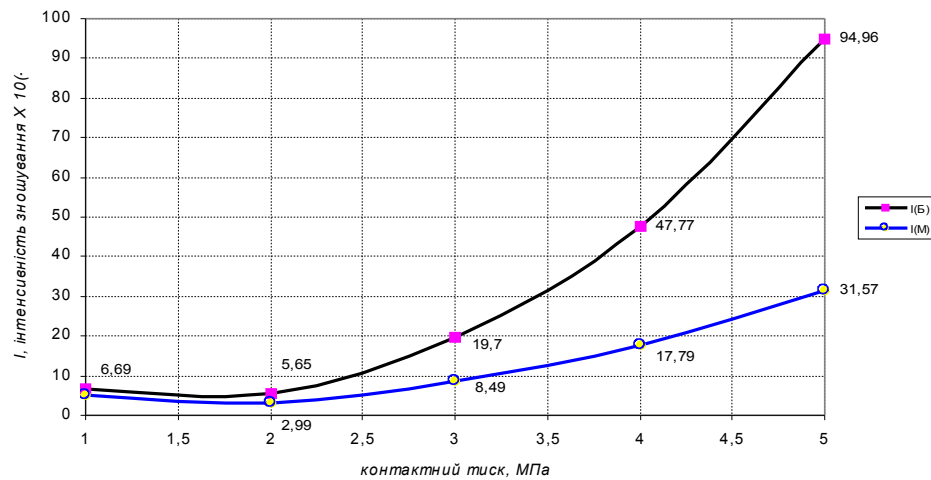


Рис. 5 – Графіки залежностей інтенсивності зношування від контактної тиску:
Б– базовий зразок;
М– модифікований зразок

З графіків, представлених на рис. 5, видно що інтенсивність зношування базового зразка вища для всього розглянутого діапазону контактної тиску, що кількісно підтверджує кращу зносостійкість зразків, відновлених гарячим пластичним деформуванням.

Для вирішення проблеми підвищення зносостійкості розглянутих деталей типу вал-шестерня може бути також рекомендований метод зміцнення робочих поверхонь з використанням концентрованих потоків теплоти [9-10].

Висновки

1. Розроблені теоретичні основи методу випробувань за схемою циліндрів з перехресними осями для двохфакторної закономірності зношування: контактний тиск - швидкість ковзання.
2. Метод випробувань реалізований для дослідження зносостійкості циліндричних зразків після відновлення гарячим пластичним деформуванням.
3. Встановлено, що для діапазону контактної тиску від 1 МПа до 5 МПа зносостійкість відновлених зразків вища в 1,5...3 рази порівняно з базовими зразками.

Література

1. А.с. №1290607 Установка для восстановления деталей типа вал-шестерня / Климин В.В. и др. Заявл. от 15.10.1986.
2. А.с. №1706829 Способ ремонта шестеренных гидронасосов / Климин В.В. и др. Заявл. от 22.09.1991.
3. Климин В.В. Применение метода горячей пластической деформации для восстановления конструктивных параметров и повышения износостойкости тяжело нагруженных деталей / В.В. Климин, Ю.М.Билык // Проблемы тертя та зношування. – К. – 2006. – Вип.46. – С. 76-83.
4. Климин В.В. Применение специальной термомеханической обработки для компенсации износа деталей узлов трения // Проблемы тертя та зношування. – К. – 2007. – Вип. 47. – С. 58-66.
5. Климин В.В. Установка для восстановления и повышения износостойкости деталей методом горячей пластической деформации / Климин В.В., Киндрачук М.В. // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2009. – № 4. – С. 75-79.
6. Кузьменко А.Г. Методи розрахунків та випробувань на зношування та надійність. – Хмельницький, ТУ Поділля – 2002. – 150 с.
7. Дыха А. В. Закономерности изнашивания и испытания образцов со смазочными материалами / А. В. Дыха // Проблемы тертя та зношування: науково-технічний збірник. – К. : НАУ, 2007. – вип. 47. – С. 228–241.
8. Вельбой В.П. Багатофункціональна лабораторна установка для дослідження трибологічних властивостей конструкційних і мастильних матеріалів / В.П. Вельбой, А.Г. Кузьменко, О.В. Дыха, М.О. Дыха // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2008. – № 1. – С. 94-98.
9. Mróz M., Orłowicz A., Tupaj M.: Wpływ parametru strukturalnego λ_{2D} dendrytów fazy α na intensywność zużycia ściernego odlewów ze stopu C355 uszlachetnionych skoncentrowanym strumieniem ciepła. Tribologia / Teoria i praktyka, t.39. z.1, s. 101-110, 2008.

10. Orłowicz A., Mróz M., Tupaj M.: Wpływ wydzielenia krzemu na intensywność zużycia ściernego odlewów ze stopu C355 uszlachetnionych powierzchniowo skoncentrowanym strumieniem ciepła. Rudy i Metale Nieżelazne, t.53, z.8, s. 488-492, 2008.

Надійшла 25.01.2010