

УДК 821. 894+ 620.17

## КОНТАКТНА ВИТРИВАЛІСТЬ СТАЛІ 40Х У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ПІСЛЯ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ ТА НІТРОГАРТУВАННЯ

П. В. КАПЛУН, О. В. ДИХА, В. А. ГОНЧАР

*Хмельницький національний університет*

Наведено результати порівняльних експериментальних досліджень контактної витривалості сталі 40Х під час тертя кочення з точковим та лінійним контактами в різних середовищах після зміцнення поверхні іонним азотуванням та нітрогартуванням у безводневому насичувальному середовищі.

**Ключові слова:** *контактна витривалість, лінійний та точковий контакти, середовище, іонне азотування, нітрогартування.*

Велика кількість деталей і вузлів машин, а також механізмів працюють під час тертя кочення. Тут основним видом пошкоджень конструкційних елементів є викришування внаслідок контактної втоми матеріалу під циклічним зовнішнім навантаженням. Вплив середовища на фізико-механічні та втомно-корозійні характеристики, а також напружено-деформованого стану на електрохімічні та термомодифузійні явища під час тертя і контактного циклічного навантаження досліджувало багато вчених [1–14]. Виявили, що у поверхневих шарах твердих тіл під час тертя відбуваються достатньо складні молекулярні процеси, зокрема, адгезія, адсорбція і дифузія. Зі зниженням міцності твердих тіл під впливом адсорбції (ефект П. А. Ребіндера), яке залежить від активності адсорбованих молекул [1–6], полегшуються пластичні деформації в контакті і посилюється втомне викришування поверхонь.

Одним із перспективних напрямків підвищення контактної витривалості матеріалів за цих умов є нанесення на поверхню зміцнювальних покриттів [2, 5, 10–13]. У матеріалі під контактними навантаженнями виникають великі градієнти напружень, які локалізуються у відносно невеликих об'ємах поблизу поверхні [8, 11, 12]. Всі аналітичні і експериментальні дослідження нашоухують на думку, що за пружного контакту деталей найнапруженішими є дві зони: межового поверхневого шару і максимальних дотичних напружень, розташованих на деякій глибині [5, 7–9, 12]. Проте переважно під час тертя кочення руйнування починається з поверхні [8, 10].

Відомо [5, 7, 8, 10], що мастило суттєво впливає на контактну витривалість сталей. Зокрема, під розклинювальною його дією інтенсифікуються втомні пошкодження, а на контактуючій поверхні втомні поверхневі тріщини можуть вирости до значних розмірів і, відділяючи від поверхні частинки матеріалу, утворювати ямки викришування. У подальшому це може призвести до утворення глибших ямок – розміром від декількох сотих міліметра до 0,5 см і більше [8]. Проте можуть бути відхилення від цієї закономірності, пов'язані з неоднорідністю, вадами і залишковими напруженнями в матеріалі. Зародження пітинга уповільнюється за додавання абразиву в мастило та нагрівання, або взагалі не зароджується за відсутності мастила та інтенсивної пластичної деформації верхнього

---

*Контактна особа:* П. В. КАПЛУН, e-mail: kaplunpavel@gmail.com

шару, що зумовлює злипання мікротріщин [8, 9]. Вода в мастилі викликає насичення поверхні воднем і суттєве зниження контактної витривалості [9]. Під час роботи за контактних навантажень у воді поверхневий шар сталевих деталей насичується воднем, який викликає водневу крихкість [5]. Відомо, що інтенсивність руйнування високоазотних марганцевих сталей під час сухого тертя кочення з проковзуванням посилюється. Зафіксували також схоплювання матеріалу продуктами зношування. Інтенсивному зношуванню сплавів перешкоджає пасивувальна плівка, яка відновлюється під час тертя у присутності кисню [14].

**Метод досліджень.** Щоб визначити вплив середовища на витривалість сталі 40X після іонного азотування та нітрогартування в безводневому насичувальному середовищі, випробовувати зразки під час тертя кочення з точковим і лінійним контактами [15]. Досліджували також плоскі зразки  $\varnothing$  40 mm з дифузійними покриттями і без них у мастилі I-20, дистильованій воді, морській воді (3%-й розчин NaCl у дистильованій воді), абразивному середовищі (мастило I-20 з домішками 5%-ої алмазної пасти фракції 40) за сухого тертя. Іонно азотували за таким режимом: температура  $T = 853$  K, тиск у вакуумній камері  $P = 120$  Pa, насичувальне середовище – 75 vol.%  $N_2 + 25$  vol.% Ar, час дифузійного насичення  $\tau = 130$  min. Технологія нітрогартування охоплювала іонне азотування в безводневому середовищі за вказаним вище режимом; термоактивування при температурі гартування 1133 K упродовж 7 min; гартування в мастилі з подальшим відпуском при 433 K упродовж 1,5 h. Перед нанесенням дифузійних покриттів зразки шліфували ( $R_a = 0,125$  mm). Тілами кочення були кульки  $\varnothing$  7,14 mm за точкового контакту і ролики  $\varnothing$  4,5 mm і завдовжки 4,6 mm – за лінійного, які мали твердість HRC 63 і рухалися по колу  $\varnothing$  30 mm. Максимальний тиск на площадці контакту 2140 MPa. Коефіцієнти проковзування тіл кочення становить 5,4% за точкового контакту і 26% – за лінійного. Через певну кількість циклів навантажень вимірювали глибину рівчачка доріжки кочення спеціальним пристроєм з похибкою  $\pm 0,5$   $\mu$ m.

**Результати та їх обговорення.** Вивчали (рис. 1) кінетику зношування сталі 40X після гартування та іонного азотування з попереднім гартуванням під час тертя кочення з точковим контактом у різних середовищах. Виявили (табл. 1), що на поверхні зразків після іонного азотування в безводневому середовищі присутні  $\epsilon$ -фаза ( $Fe_{2-3}N$ ),  $\gamma'$ -фаза ( $Fe_4N$ ) і  $\alpha$ - $Fe_{[N]}$  – твердий розчин азоту в залізі, які забезпечують вищу пластичність азотованого шару, ніж за іонного азотування у водневих середовищах (аміаку або суміші азоту з воднем), в яких водень сприяє утворенню нітридного моношару з великим вмістом крихкої  $\epsilon$ -фази [12]. Під час нітрогартування, коли азотований шар термоактивується,  $\epsilon$ -фаза розпадається, зменшуючи мікротвердість поверхні, і вивільнений азот частково дифундує в глибину металу, збільшуючи товщину азотованого шару. При цьому знижується градієнт твердості по глибині поверхневого шару, через що зростає контактна витривалість композиції “покрив–основа”. Після іонного азотування гартованої сталі твердість основи зменшується, а отже, слабшає його ефект внаслідок відпуску з підвищенням контактної витривалості сталі у морській воді, мастилі I-20 і за сухого тертя (табл. 1). Кінетика зношування в різних середовищах різна (рис. 1). Зокрема, під час тертя кочення з проковзуванням спостерігали деформацію і знос, які залежать від тиску на площадці контакту, властивостей поверхневого шару, градієнта твердості по глибині матеріалу, залишкових напружень у поверхневому шарі, твердості основи і середовища. Виявили, що вже з перших циклів навантаження відбувається інтенсивна пластична деформація на поверхні матеріалу, яка поступово зменшується впродовж припрацювання і мінімізується під час накопичення пошкоджень аж до руйнування (утворення ямок, пітинга). На абсолютне значення деформаційного складника сумарного зносу суттєво

впливає твердість основи і середовище. Знос від проковзування більше залежить від властивостей поверхневого шару, а також корозійних та гідродинамічних характеристик середовища. За сумісної дії цих складників найбільше (в 1,8 та 1,7 рази) зразки сталі 40X зношуються в морській воді (рис. 1) проти зносу в мастилі І-20 та за сухого тертя. Іонне азотування зменшує знос зразків до появи пітинга в мастилі І-20 на 33%, за сухого тертя – на 29% і в морській воді – на 10% порівняно з гартованими зразками.

**Таблиця 1. Фізико-механічні характеристики та фазовий склад поверхні зразків сталі 40X перед випробуваннями на контактну витривалість і зносотривкість у різних середовищах**

Вид термообробки та технологія нанесення покриття	Товщина покриття, $\mu\text{m}$	Мікротвердість $H_{100}$ , МПа		Склад поверхні азотованого шару, %		
		поверхні	основи	$\epsilon$ -фаза	$\gamma$ -фаза	$\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$ -фаза
Без термообробки	–	3200	2560	–	–	–
Без термообробки + іонне азотування	285	7620	2560	20	60	20
Гартування	–	5600	5500	–	–	–
Гартування + іонне азотування	290	7800	4100	25	57	18
Нітрогартування	320	7590	5500	–	65	35

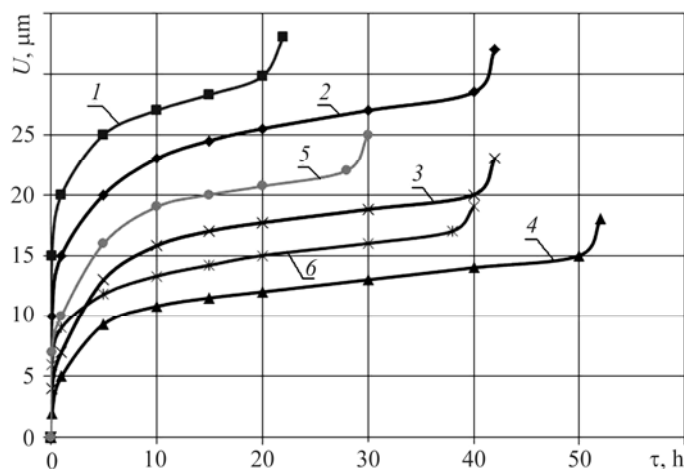


Рис. 1. Кінетика зношування сталі 40X: 1, 2 – в морській воді; 3, 4 – в мастилі І-20; 5, 6 – за сухого тертя; 1, 3, 5 – гартована сталь; 2, 4, 6 – гартована та іонно азотована.

Fig. 1. Kinetics of 40X steel wear: 1, 2 – in sea water; 3, 4 – in lubricant I-20; 5, 6 – under dry friction; 1, 3, 5 – quenched steel; 2, 4, 6 – quenched and ion nitrided.

Виявили (табл. 2), що середовище суттєво впливає на контактну витривалість зразків, зокрема, найвитривалішим в усіх досліджуваних середовищах виявились зразки після нітрогартування. За точкового контакту в мастилі І-20 вона збільшилась на 88%, в абразивному середовищі – на 60%, за сухого тертя – на 75%, в дистильованій воді – вдвічі і морській воді – в 2,5 рази проти гартованих. Подібні результати отримали за аналогічних випробувань нітрогартованих зразків під час лінійного контакту пар тертя. Зокрема, їх контактна витривалість зросла в мастилі І-20 на 75%, в абразивному середовищі – на 50%, за сухого тертя – на 60%, в дистильованій воді – в 1,9 рази і в морській воді – в 2,1 рази порівняно

з гартованими. Термічно необроблені зразки найменш витривалі через малу твердість. Після іонного азотування за точкового контакту вона збільшилася в мастилі I-20 на 53%, в дистильованій воді – на 66%, за сухого тертя – на 68%, в абразивному середовищі – на 74% і в морській воді – в 2,5 рази.

Виявили (табл. 2), що іонне азотування після гартування значно слабше впливає на контактну витривалість, ніж нітрогартування, зокрема, за лінійного контакту в мастилі I-20 вона підвищилась на 22%, морській воді – на 80%, за сухого тертя – на 22%, дистильованій воді – на 18% і в абразивному середовищі – на 21%; а за точкового контакту відповідно – на 13; 97; 24; 32 і 16% проти гартованих. Це пояснюють тим, що під час іонного азотування зменшується твердість основи в результаті високотемпературного відпуску гартованої сталі, а отже, падає контактна витривалість композиції “азотований покрив–основа”.

**Таблиця 2. Вплив середовища на контактну витривалість зразків зі сталі 40X під час тертя кочення за точкового і лінійного контактів після гартування, іонного азотування з попереднім гартуванням, нітрогартування (максимальний тиск на площадці контакту 2140 МПа)**

Вид термічної і хіміко-термічної обробки сталі	Контактна витривалість, $N \cdot 10^6$ cycles, у різних середовищах				
	мастило I-20	морська вода	сухе тертя	дистильована вода	абразивне середовище
Точковий контакт					
Без термообробки	0,65	0,33	0,45	0,53	0,31
Без термообробки + іонне азотування	1,00	0,82	0,76	0,88	0,54
Гартування	23,7	11,3	16,5	19,5	11,3
Гартування + іонне азотування	26,8	22,3	20,5	23,9	13,2
Нітрогартування	44,55	28,25	28,9	39,1	18,1
Лінійний контакт					
Без термообробки	0,52	0,28	0,41	0,38	0,23
Без термообробки + іонне азотування	0,85	0,64	0,72	0,59	0,47
Гартування	18,9	9,7	16,03	13,3	6,8
Гартування + іонне азотування	23,1	17,5	19,7	15,8	8,3
Нітрогартування	33,1	20,37	26,1	25,27	10,2

Встановили (табл. 2), що найбільше контактна витривалість підвищується після іонного азотування і нітрогартування в морській воді. Зокрема, внаслідок іонного азотування після гартування – в 1,8 рази за лінійного контакту і в 1,97 рази – за точкового, а після нітрогартування – відповідно в 2,1 та 2,5 рази порівняно з гартованою сталлю. Це викликано тим, що азотований шар, володіючи антикорозійними властивостями, сприяє зростанню контактної витривалості в агресивних середовищах.

Порівнюючи вплив середовища на контактну витривалість (табл. 2), виявили, що різниця в її значеннях за точкового та лінійного контактів становить: за сухого тертя – до 10%; в мастилі I-20 – до 34%; в дистильованій воді – до 54%; в морській воді – до 63% і абразивному середовищі до – 77%. Тобто зі збільшенням агресивності і абразивності середовища зростає. Зменшення витривалості за

лінійного контакту порівняно з точковим за ідентичних випробувань пояснюють різними умовами роботи матеріалу за плоского і об'ємного напружено-деформованого стану та більшим коефіцієнтом проковзування. Матеріал [8, 9] під час точкового контакту працює за всебічного стиску і має вищу несучу здатність, ніж за лінійного.

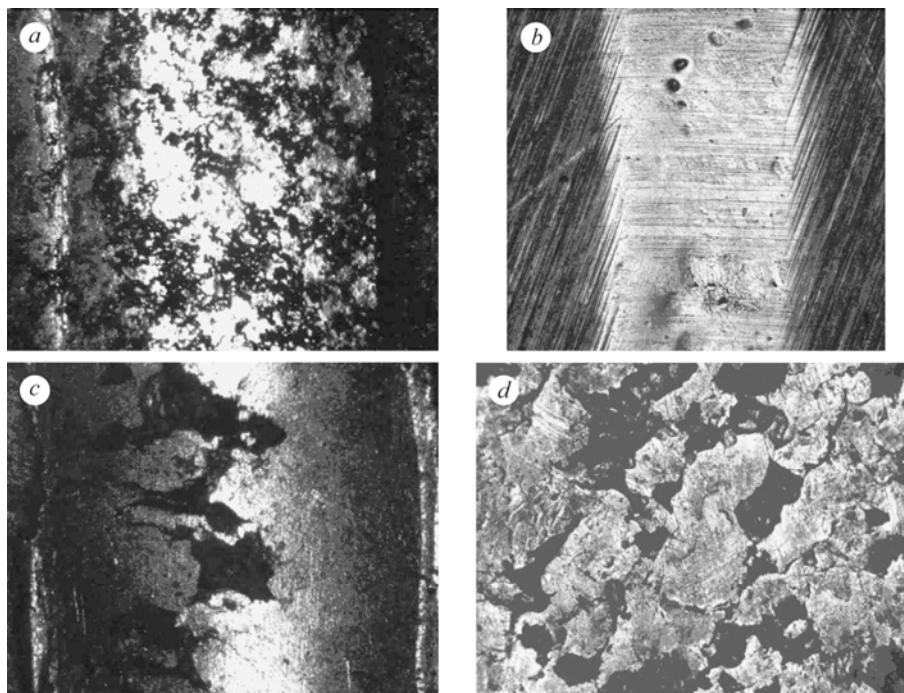


Рис. 2. Поверхня доріжки кочення після випробувань у різних середовищах: *a* – морська вода; *b* – абразивне середовище; *c* – сухе тертя; *d* – мастило I-20 + присадка XADO.

Fig. 2. Surface of rolling path after testing in different environments: *a* – sea water; *b* – abrasive environment; *c* – dry friction; *d* – lubricant I-20 + additive XADO.

Виявили (рис. 2), що в морській воді поверхня доріжки кочення вкрита великою кількістю плитких ямок і розмита корозивним середовищем. В абразивному середовищі добре видно сліди від абразиву, які зношують поверхневий шар з ямками від втомного викрихчування, а на поверхні – донні залишки ямок. Під час сухого тертя утворюються великі ямки від викрихчування, які агрегуються з сусідніми ямками, формуючи раковини. В мастилі I-20 ямки рівномірно розміщені на доріжці кочення і мають менший розмір, ніж за сухого та абразивного тертя.

Випробовували на контактну витривалість сталь 40X з дифузійними покриттями, які наносили методом іонного азотування в безводневих середовищах. Встановили, що після додавання до мастила I-20 присадки XADO контактна витривалість за кочення підвищується на 10...15%, а інтенсивність зношування в період припрацювання зменшується до 20% проти випроб у мастилі I-20 без присадки.

### ВИСНОВКИ

Середовище суттєво впливає на контактну витривалість і зношування сталі 40X з дифузійними покриттями під час тертя кочення. Іонне азотування в безводневих насичувальних середовищах підвищує контактну витривалість сталі без термічної обробки і після гартування в усіх досліджуваних середовищах. Найбільше вона зростає в морській воді: в 2,3–2,5 рази – для сталі без термообробки і у 1,8–2,0 рази – для гартованої, що пов'язано з підвищеною твердістю та корозійною тривкістю азотованого шару порівняно з неазотованою сталлю. Нітрогарту-

вання збільшує контактну витривалість сталі в 1,5–1,6 рази в абразивному середовищі і в 2,1–2,5 рази – в морській воді порівняно з гартованою. Це зумовлено високою твердістю основи, відсутністю на поверхні крихкої ε-фази і малого градієнта твердості по товщині дифузійного покриття. Зменшення контактної витривалості за лінійного контакту проти точкового за ідентичних умов випробувань пояснюють різними умовами роботи матеріалу за плоского та об'ємного напружено-деформованого станів та більшим коефіцієнтом проковзування. Додавання до мастила I-20 присадки ХАДО сприяє підвищенню контактної витривалості під час кочення на 10...15% та зменшенню інтенсивності зношування в період припрацювання до 20% порівняно з мастилом I-20 без присадки.

*РЕЗЮМЕ.* Приведены результаты сравнительных экспериментальных исследований контактной выносливости стали 40X при трении качения с точечным и линейным контактами в различных средах после упрочнения поверхности ионным азотированием и нитрозакалкой в безводородной насыщающей среде.

*SUMMARY.* The results of comparative experimental researches on contact endurance of grade 40X steel under rolling friction with pinpoint and linear contacts in multiple media after surface strengthening with ion nitriding and nitroquenching in hydrogen-free saturated media were presented.

1. Карпенко Г. В. Избранные труды. Т. 2: Работоспособность конструкционных материалов в агрессивных средах. – К.: Наук. думка, 1985. – 240 с.
2. Похмурский В. И. Коррозионная усталость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 206 с.
3. Романив О. Н., Никифорчин Г. Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 294 с.
4. Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Партон В. З. Основы механики разрушения материалов. – К.: Наук. думка, 1988. – 488 с.
5. Похмурський В. І., Хома М. С. Корозійна втома металів і сплавів. – Львів: Сполом, 2008. – 304 с.
6. Харламов Ю. О., Будагьянц Н. А. Физика, химия и механика поверхности твердого тела. – Луганск: Изд-во ВУГУ, 2000. – 624 с.
7. Власов В. М. Работоспособность упрочненных трущихся поверхностей. – М.: Машиностроение, 1987. – 306 с.
8. Трубин Г. К. Контактная усталость материалов для зубчатых колес. – М.: Машгиз, 1962. – 403 с.
9. Пинегин С. В. Контактная прочность и сопротивление качению. – М.: Машиностроение, 1969. – 246 с.
10. Зинченко В. М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 304 с.
11. Федірко В. М., Погрелок І. М. Азотування титану та його сплавів. – К: Наук. думка, 1996. – 222 с.
12. Каплун В. Г., Каплун П. В. Ионное азотирование в безводородных средах. – Хмельницкий: ХНУ, 2015. – 344 с.
13. Каплун П. В., Гончар В. А. Малоциклова втома сталей після іонного азотування у зневоднених середовищах // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 3. – С. 95–98.  
(Kaplun P. V. and Gonchar V. A. Low-cycle fatigue of steels after ion nitriding in hydrogen-free atmospheres // Materials Science. – 2016. – **52**, № 3. – P. 402–406.)
14. Балицький О. І., Колесніков В. О., Еліаш Я. Дослідження зносотривкості високоазотних сталей за умов сухого тертя ковзання // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – **48**, № 5. – С. 78–82.  
(Balyts'kyi O. I., Kolesnikov V. O., and Elias J. Study of the wear resistance of high-nitrogen steels under dry sliding friction // Materials Science. – 2013. – **48**, № 5. – P. 642–646.)
15. Патент на корисну модель № 106181. Спосіб випробувань на контактну витривалість при коченні з проковзуванням / П. В. Каплун, В. А. Гончар, А. В. Паршенко. – Опубл. 25.04.2016; Бюл. № 8.

Одержано 25.07.2017