

УДК 621.891

КОНТАКТНА ВИТРИВАЛІСТЬ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ У БЕЗВОДНЕВИХ СЕРЕДОВИЩАХ

П. В. КАПЛУН, В. А. ГОНЧАР, Т. В. ДОНЧЕНКО

Хмельницький національний університет

Досліджено довговічність сталей 20, 40Х, ШХ15 та Х12М за тертя кочення в мастилі І-20. Випробувано на контактну витривалість: без термічної обробки, після гартування, зі застосуванням хіміко-термічної технології іонного азотування у безводневих насичувальних середовищах та комплексної технології нітрогартування, за точкового і лінійного контактів. Досліджено вплив навантаження та твердості основи на композицію “покрив–основа”. Порівняльними випробуваннями контактної витривалості зразків показано перспективність застосування технології безводневого іонного азотування для підвищення довговічності конструктивних елементів за тертя кочення. Встановлено, що контактна витривалість композиції “покрив–основа” зростає прямолінійно з підвищенням твердості основи та зменшується зі збільшенням навантаження за нелінійним законом.

Ключові слова: іонне азотування, довговічність, тертя кочення, твердість, покрив, основа.

Вступ. Велика кількість деталей машин і вузлів (підшипники кочення, колеса поїздів та кранів, зубчасті колеса, подавальні вальці, накатні ролики тощо) працюють під час тертя кочення. Підвищення їх довговічності є актуальною проблемою. Виходять з ладу більшість конструкційних елементів через викришування поверхні внаслідок втоми матеріалу. Раніше [1–15] досліджено контактну втому, розглянуто однорідні матеріали [1–5], що мають певні обмежені можливості з підвищення контактної витривалості під час тертя кочення.

Втомне викришування та відшаровування робочих поверхонь кілець і тіл кочення обумовлене розвитком мікротріщин, які утворюються через повторні мікропластичні зсуви перенапруженого матеріалу. Втомні пошкодження локалізуються в місцях концентрації напружень на поверхні і в підповерхневих шарах. Здебільшого руйнування починається з поверхні [8, 9]. Утворення підповерхневих тріщин спостерігаємо в матеріалах з неоднорідною структурою (азотованих, цементованих і з поверхневим гартуванням) внаслідок додаткового впливу залишкових напружень [10, 11]. Сильно впливає на втому матеріалів за змінного контактного навантаження середовище і водень [12, 13, 15, 16].

На сьогодні є велика кількість технологій нанесення покривів, кожна з яких має свої переваги і недоліки. Найпоширенішими на сьогодні для підвищення довговічності за змінного контактного навантаження є хіміко-термічні обробки – цементация та нітроцементация [6]. Але вони високотемпературні і застосовують воденьвмісні насичувальні середовища, що негативно впливає на характеристики міцності і довговічності матеріалів. Альтернативою цим технологіям для підвищення контактної витривалості деталей машин за тертя кочення є іонне азотування у безводневих насичувальних середовищах [14, 17].

Методика досліджень. Досліджували довговічність за циклічного контактного навантаження сталей на універсальній установці [18], випробовуючи зразки під час тертя кочення з точковим і лінійним контактами. Вивчали плоску поверхню зразків $\varnothing 40$ mm зі сталей 20, 40X, ШХ15 і Х12М з дифузійними покриттями та без них. Їх наносили іонним азотуванням у безводневих середовищах, а також за комплексною технологією нітрогартування. Іонне азотування здійснювали за режимом: температура дифузійного насичення $T = 570^\circ\text{C}$, тиск у вакуумній камері $P = 240$ Pa, середовище насичення 75 vol.% $\text{N}_2 + 25$ vol.% Ar, тривалість дифузійного насичення $\tau = 480$ min. Технологія нітрогартування: іонне азотування в безводневому середовищі; термоактивування за температури гартування (860°C для сталей 40X, ШХ15 і 930°C для сталі Х12М) упродовж 7 min; гартування в мастилі з подальшим відпуском за температури 160°C упродовж 90 min. Перед випробуваннями зразки шліфували ($R_a = 0,125$ μm). Тіла кочення – кульки $\varnothing 7,14$ mm за точкового контакту і ролик $\varnothing 4,5$ mm і довжиною 4,6 mm за лінійного з твердістю HRC 63 – рухалися по колу $\varnothing 30$ mm. Випробовували за максимального тиску 2140 МПа на ділянці контакту в мастилі I-20 до появи пітингу на доріжках кочення. Вплив тиску на ділянці контакту на довговічність композиції “покрив–основа” за тертя кочення досліджували на зразках зі сталі 20 після іонного азотування за навантажень на кульку 50; 100; 160 і 250 N (максимальний тиск відповідно 1485; 1872; 2188; 2355 МПа). Досліджували вплив твердості основи (2800... 6500 МПа) на довговічність за кочення на зразках зі сталі 40X після нітрогартування за відпуску при різних температурах. Методами металографії визначали структуру, товщину і мікротвердість за товщиною азотованого шару з використанням мікроскопів МІМ-9 і ПМТ-3. Фазовий склад на поверхні азотованих шарів встановлювали, використовуючи ДРОН-3М, а залишкові напруження стиску в азотованих шарах – за методикою [11]. Градієнт твердості ΔH за товщиною азотованого шару визначали за формулою

$$\Delta H = (H_{\text{max}} - H_b) / h,$$

де H_{max} – максимальна твердість азотованого шару, МПа; H_b – твердість основи, МПа; h – товщина азотованого шару, μm .

Результати досліджень та їх обговорення. Характеристики дифузійних покриттів після іонного азотування сталей у безводневому насичувальному середовищі наведено в табл. 1. Азотовані шари на всіх сталях після нітрогартування мають фазовий склад поверхні без ϵ -фази (Fe_{2-3}N), яка за термоактивування упродовж 7 min розпалася на нижчі фази – γ' (Fe_4N) і $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$. Це призвело до збільшення товщини азотованого шару внаслідок дифузії азоту та його сполук всередину металу і зменшення твердості поверхні та її градієнта за товщиною покриття порівняно з іонним азотуванням.

Порівняно (табл. 2) результати експериментальних випробувань на контактну витривалість різних сталей з різною термічною та хіміко-термічною обробками. Іонне азотування у безводневих насичувальних середовищах призводить до підвищення контактної витривалості на 53% порівняно зі сталями без термічної обробки. Сталі після гартування мають контактну витривалість в 20 разів більшу, ніж азотовані сталі без термічної обробки, що обумовлено значно вищою твердістю основи. Іонне азотування гартованих сталей призводить до зменшення твердості основи в результаті її високотемпературного відпуску, що обумовлює зменшення ефекту від азотованого шару, який при цьому не перевищує 10%. Найвищу довговічність показали сталі після нітрогартування, котра в 1,8–2 рази більша, ніж після гартування. Це зумовлено азотованим шаром з оптимальними властивостями та високою твердістю основи.

Таблиця 1. Характеристики дифузійних покриттів на сталях після іонного азотування та нітрогартування

Марка сталі	Твердість поверхні, H_{μ} , МПа	Товщина азотованого шару, μm	Гradient твердості, МПа/ μm	Фазовий склад поверхні	Залишкові напруження, МПа
Іонне азотування					
20	6410	280	13,89	20% ϵ + 55% γ' + + 25% $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$	415
40X	7620	285	17,44	20% ϵ + 60% γ' + + 20% $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$	510
ШХ15	9180	320	19,31	50% ϵ + 40% γ' + + 10% $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$	629
X12M	9560	310	20,83	60% ϵ + 35% γ' + + 5% $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$	640
Нітрогартування					
40X	7590	320	3,70	65% γ' + 35% $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$	315
ШХ15	8050	350	2,42	80% γ' + 20% $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$	382
X12M	9270	340	2,08	90% γ' + 10% $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$	396

Таблиця 2. Результати випробувань на контактну витривалість сталей під час тертя кочення в мастилі І-20 за максимального тиску 2140 МПа

Марка сталі	Вид термообробки та технології нанесення покриття	Мікротвердість H_{μ} , МПа		Товщина покриття, μm	Довговічність N , $\times 10^6$, cycles	
		Поверхні	Основи		лінійний контакт	точковий контакт
20	без термообробки	2800	2250	0	0,39	0,55
	без термообробки + + іонне азотування	6410	2250	280	0,60	0,85
40X	без термообробки	3200	2560	0	0,52	0,65
	без термообробки + + іонне азотування	7620	2560	285	0,85	1,00
	гартування	5600	6500	0	18,9	23,7
	гартування + іонне азотування	7800	4100	290	23,1	26,8
	нітрогартування	7940	6500	320	33,1	44,55
ШХ15	гартування	7210	7210	0	17,3	24,1
	гартування + іонне азотування	9180	4970	300	15,7	25,2
	нітрогартування	8300	7200	320	27,1	38,7
X12M	гартування	8560	8520	0	17,7	26,6
	гартування + іонне азотування	9560	5240	325	18,3	29,8
	нітрогартування	9270	9140	340	28,5	43,25

Наведено (табл. 3, рис. 1) результати досліджень впливу температури відпуску на твердість основи та довговічність нітрогартованої сталі 40X під час

тертя кочення в мастилі I-20 за точкового контакту та максимального тиску 2140 МПа. Як бачимо, твердість основи в композиції “покрив–основа” сильно впливає на довговічність сталі за тертя кочення. Збільшення твердості основи в 2,5 рази (з 2800 до 6450 МПа) призводить до зростання довговічності в 6 разів (з $7,15 \cdot 10^6$ до $43,2 \cdot 10^6$ cycles навантажень). При цьому спостерігаємо прямолінійну залежність довговічності від твердості основи за сталого контактного навантаження як для зразків з покриттями, так і без них.

Таблиця 3. Вплив температури відпуску гартованих та нітрогартованих зразків сталі 40X на твердість основи та їх контактну витривалість в мастилі I-20 за точкового контакту та максимального тиску 2140 МПа

Температура відпуску, °C	Твердість основи H_{μ} , МПа	Довговічність зразків N , $\times 10^6$, cycles	
		гартованих	нітрогартованих
200	6490	20,8	43,2
300	5660	17,2	35,3
400	4380	11,5	23,5
500	3260	6,0	12,0
600	2800	3,45	7,15

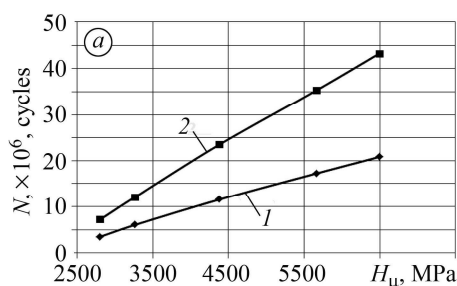


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Залежність контактної витривалості сталі 40X за тертя кочення від твердості основи: 1 – без покриття; 2 – після іонного азотування.

Fig. 1. Dependence of contact durability of 40X steel under rolling friction on the base hardness: 1 – without coating; 2 – after ion nitriding.

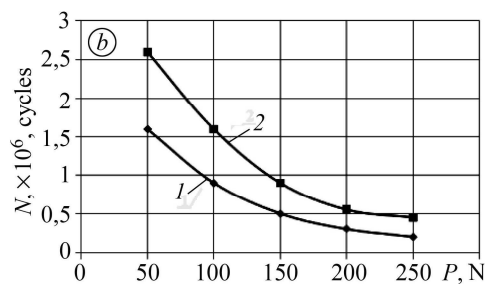


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Залежність контактної витривалості сталі 20 до (1) та після іонного азотування (2) за тертя кочення з навантаженням на кульку 50; 100; 160 і 250 N (максимальний тиск на ділянці контакту відповідно 1485; 1872; 2188 і 2355 МПа).

Fig. 2. Dependence of the contact resistance of the steel 20 to (1) and after ion nitriding (2) under rolling friction with load on the ball 50; 100; 160 and 250 N (maximum contact pressure is 1485; 1872; 2188 and 2355 MPa).

На рис. 2 наведені результати випробувань сталі 20 на контактну витривалість з точковим контактом в мастилі I-20 за різних навантажень на кульку до і після іонного азотування. Навантаження на кульку і, відповідно, максимальний тиск на ділянці контакту мають суттєвий вплив на довговічність сталі за тертя кочення. Він є нелінійним. Довговічність зростає зі зменшенням контактного тиску на ділянці контакту.

Іонне азотування у безводневому середовищі суттєво підвищує довговічність сталей (див. табл. 2) і тим більше, що сильніше навантаження. Наприклад, довговічність азотованої сталі 20 за навантаження на кульку 50 N збільшилася в

1,6 рази, а за навантаження 250 N – в 2,1 рази порівняно з неазотованою сталлю (рис. 2). Дослідженнями встановлено, що контактна витривалість зразків досліджуваних сталей за точкового контакту вища порівняно з лінійним. Це обумовлено тим, що несуча здатність матеріалу в умовах всебічного стиску за об'ємного напруженого стану вища, ніж за плоского [1, 2].

ВИСНОВКИ

Встановлено, що контактна витривалість сталей без термічної обробки після іонного азотування збільшується в 1,5 рази і лінійно зростає з підвищенням твердості основи. Довговічність азотованих сталей після гартування на порядок вища за таку без термообробки через збільшення твердості основи. Найбільшу довговічність сталей за тертя качення в мастилі отримано після нітрогартування, що перевищує в 1,8–2 рази її значення для гартованих сталей. Встановлено, що контактна витривалість сталей збільшується зі зменшенням контактного навантаження за нелінійним законом і залежить від виду напружено-деформованого стану на ділянці контакту.

РЕЗЮМЕ. Исследовано долговечность сталей 20, 40X, ШХ15 и Х12М при трении качения в смазке I-20. Испытано на контактную выносливость: без термической обработки, после закалки, с применением химико-термической технологии ионного азотирования в безводородных насыщающих средах и комплексной технологии нитрозакалки, при точечном и линейном контактах. Исследовано влияние нагрузки и твердости основания на композицию “покрытие–основа”. Сравнительными испытаниями контактной выносливости образцов показано перспективность применения технологии безводородного ионного азотирования для повышения долговечности конструктивных элементов при трении качения. Установлено, что контактная выносливость композиции “покрытие–основа” возрастает прямолинейно с повышением твердости основы и уменьшается с увеличением нагрузки по нелинейному закону.

SUMMARY. Contact durability of steels 20, 40X, ШХ15, and Х12М under rolling friction in lubricant I-20 is investigated: specimens without heat treatment, after quenching with use of thermal ion nitriding in oxygen-free saturating media and complex technology of ion nitriding under point and linear contact. The influence of loading and substrate hardness on the “coating–substrate” composition is studied. The prospects of application of the technology of oxygen-free ion nitriding to increase the durability of structural elements under rolling friction are shown by the comparative tests. It is established that the contact durability of the “coating–substrate” composition increases in a linear relationship with the increase of the substrate hardness and decreases with the load growth by a linear law.

1. Ковальский Б. С. Расчет деталей на местное сжатие. – Харьков: ХВКИУ, 1967. – 222 с.
2. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / Пер. с англ. В. Э. Наумова, А. А. Спектора. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
3. Пинегин С. В. Работоспособность деталей подшипников. – М.: Машгиз, 1949. – 168 с.
4. Перель Л. Я. Подшипники качения: расчет, проектирование и обслуживание опор: справочник. – М.: Машиностроение, 1983. – 544 с.
5. Трубин Г. К. Контактная усталость материалов для зубчатых колес. – М.: Машгиз, 1962. – 404 с.
6. Зинченко В. М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 304 с.
7. Сосновский Л. А., Махутов Н. А., Троценко В. Т. О развитии представлений об усталости металлов при объемном нагружении и трении // Тр. VI-го Междунар. симп. по трибофатике (ISTF 2010). – Минск: БГУ, 2010. – Т. 1. – С. 77–84.
8. Грозин Б. Д., Костецкий Б. И. Износ в зубчатых передачах // Вестник машиностроения. – 1974. – № 12. – 236 с.
9. Осипян А. В. Экспериментальное исследование питтинговых разрушений в зубчатых передачах // Тр. НАТИ. – 1945. – Вып. 43. – 216 с.
10. Пинегин С. В. Контактная прочность и сопротивление качению. – М.: Машиностроение, 1969. – 246 с.

11. Каплун П. В., Ляшенко Б. А. Визначення залишкових напружень в азотованих шарах після іонного азотування за показниками мікротвердості // Проблеми міцності. – 2016. – № 6. – С. 56–63.
12. Каплун П. В., Духа О. В., Гончар В. А. Контактна витривалість сталі 40X у різних середовищах після іонного азотування та нітрогартування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 4. – С. 42–47.
(*Kaplun P. V., Dykha O. V., and Gonchar V. A. Contact durability of 40Kh steel in different media after ion nitriding and nitroquenching // Materials Science. – 2018. – 53, № 4. – P. 468–474.*)
13. Похмурський В. І., Хома М. С. Корозійна втома металів і сплавів. – Львів: СПОЛОМ, 2008. – 304 с.
14. Каплун П. В., Ляшенко Б. А. Підвищення зносостійкості та довговічності підшипників кочення іонним азотуванням // Проблеми трибології. – 2016. – № 2. – С. 15–20.
15. Каплун П. В. Вплив водню на іонне азотування сталей // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 6. – С. 68–72.
(*Kaplun P. V. Influence of hydrogen on the ion nitriding of steels // Materials Science. – 2018. – 53, № 6. – P. 818–822.*)
16. Балицький О. І., Мочульський В. М., Іваськевич Л. М. Оцінювання впливу водню на механічні характеристики складнолегованого нікелевого сплаву // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – **51**, № 4. – С. 91–100.
(*Balyts'kyi O. I., Mochul's'kyi V. M., and Ivas'kevych L. M. Evaluation of the influence of hydrogen on the mechanical characteristics of complexly alloyed nickel alloys // Materials Science. – 2016. – 51, № 4. – P. 538–547.*)
17. Федірко В. М., Погрелюк І. М. Азотування титану та його сплавів. – К.: Наук. думка, 1996. – 221 с.
18. Патент № 106181 UA. МПК (2006.01):G01L 1/00. 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 14.09.2018