

PACS numbers: 62.20.fk, 62.20.me, 62.20.Qp, 81.05.Bx, 81.40.Ef, 81.40.Np, 81.40.Pq

Повышение контактной прочности и износостойкости стали ШХ15 при качении путём применения интегральных технологий в тлеющем разряде

В. Г. Каплун, П. В. Каплун, В. А. Гончар, Т. В. Донченко

*Хмельницький національний університет,
ул. Інститутська, 11,
29016 Хмельницький, Україна*

Проведены сравнительные испытания на контактную выносливость при трении качения образцов стали ШХ15 без термической обработки, после закалки, с применением технологии ионного азотирования в безводородных насыщающих средах, интегральных технологий нитрозакалки и оксинитрозакалки. Испытания проводились при точечном и линейном контактах в масле И-20. Установлено, что долговечность образцов стали без термической обработки после ионного азотирования в 1,3 раза выше, чем для неазотированных образцов. Долговечность азотированных образцов после закалки от температуры 860°C более чем в 20 раз превышает её значение для азотированных образцов без термообработки за счёт более высокой твёрдости основы. Наивысшую долговечность при трении качения имеют образцы после нитрозакалки и оксинитрозакалки, для них она в 1,8–2 раза превышает соответствующее значение для закалённых образцов. Это обусловлено более высокой твёрдостью поверхности и основы, большей толщиной и меньшим градиентом твёрдости азотированного слоя, оптимальными остаточными напряжениями сжатия в поверхностном слое.

Ключевые слова: ионное азотирование, закалка, нитрозакалка, оксинит-

Corresponding author: Vitalii Grigorievich Kaplun
E-mail: vgkaplun@gmail.com

*Khmelnytskyi National University,
11 Instytutska Str., UA-29016 Khmelnytskyi, Ukraine*

Citation: V. G. Kaplun, P. V. Kaplun, V. A. Gonchar, and T. V. Donchenko, Increasing the Contact Strength and Wear Resistance of ShKh15 Steel at Rolling Motion by Using Integral Technologies in a Glow Discharge, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 10: 1331–1344 (2019) (in Russian), DOI: [10.15407/mfint.41.10.1331](https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1331).

розакалка, контактная прочность, износ.

Проведено порівняльні випробування на контактну витривалість при терті кочення зразків сталі ШХ15 без термічної обробки, після гартування із застосуванням технології іонного азотування в безводневих насичуючих середовищах, інтегральних технологій нітрогартування і оксинітрогартування. Випробування проводилися при точковому і лінійному контактах в мастилі И-20. Встановлено, що довговічність зразків сталі без термічної обробки після іонного азотування в 1,3 рази вища, ніж для неазотованих зразків. Довговічність азотованих зразків після гартування від температури 860°C більше ніж у 20 разів перевищує її значення для азотованих зразків без термообробки за рахунок більш високої твердості основи. Найвищу довговічність при терті кочення мають зразки після нітрогартування і оксинітрогартування, для них вона в 1,8–2 рази перевищує відповідне значення для азотованих після гартування зразків. Це обумовлено більш високою твердістю поверхні та основи, більшою товщиною і меншим градієнтом твердості азотованого шару, оптимальними залишковими напруженнями стиску в поверхневому шарі.

Ключові слова: іонне азотування, гартування, нітрогартування, оксинітрогартування, контактна міцність, знос.

The comparative tests of back-to-back endurance of steel ShKh15 in the process of rolling friction are carried out for different experimental conditions: without thermal processing, after hardening, with the use of ion nitriding technique in hydrogen-free saturating medium and integral techniques of nitrite hardening and oxinitrite hardening. The tests are conducted with point and linear contacts in the I-20 oil. As determined, the durability of steel samples without thermal processing after ion nitriding is 1.3 times higher than for non-nitrided samples. Durability of nitrided samples after quenching at temperature starting from 860°C is more than 20 times higher than for nitrided samples without thermal processing because of higher base hardness. After nitrite and oxinitrite hardening samples have the highest durability at the process of rolling friction, which is 1.8–2 times higher than the value of hardened samples. It is caused by the higher hardness of surface and base, a bigger thickness and a smaller gradient of the hardness of nitrided layer, and optimal residual compressive stress in a surface layer.

Key words: ion nitriding, hardening, nitrite hardening, oxinitrite hardening, contact strength, wear.

(Получено 15 марта 2019 г.; окончат. вариант — 29 июня 2019 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Повышение контактной прочности трибосистем при качении является актуальной проблемой для техники. Выход из строя большинства конструктивных элементов при этом происходит от износа и образования лунок на поверхности вследствие усталости материа-

ла. Исследованию процессов износа и контактной усталости при трении качения посвящено много работ [1–7, 12–15]. В большом количестве исследований рассматривается работа однородных материалов [1–4], имеющих определенные ограниченные возможности по повышению износостойкости и контактной выносливости при качении. В настоящее время наиболее распространёнными для повышения долговечности при переменной контактной нагрузке являются технологии химико-термической обработки — цементация и нитроцементация [6]. Но они высокотемпературные и проводятся в водородосодержащих насыщающих средах, которые отрицательно влияют на характеристики прочности и долговечности конструкционных элементов. Альтернативой этим технологиям при повышении износостойкости и контактной выносливости деталей машин при трении качения является применение низкотемпературных технологий химико-термической обработки в безводородных насыщающих средах, в частности, ионного азотирования в безводородных насыщающих средах и интегральных технологий с использованием химико-термической обработки [5, 8, 11–14].

В подавляющем большинстве деталей машин и узлов при качении имеет место проскальзывание. В этом случае процесс износа состоит из пластического деформирования поверхности контакта и ее истирания в результате проскальзывания. Поэтому суммарный износ включает две составляющие. Процесс износа и контактной усталости однородных материалов при качении характеризуется наличием 3-х стадий — приработки, накопления повреждений и разрушения [1–3, 5], зависящих от ряда факторов, связанных со свойствами материалов, условиями эксплуатации и тому подобное. При наличии покрытий суммарный износ и его составляющие зависят от ряда дополнительных факторов: физико-механических свойств и фазового состава покрытий [8, 16], твердости основы [14], остаточных напряжений в поверхностных слоях [14, 16], среды [13, 15], водорода в технологическом процессе при нанесении покрытий и эксплуатации [10–12], величины нагрузки и напряжений в градиентном покрытии и т.д., которые влияют на все стадии процесса износа. Исследование влияния этих факторов на процесс износа и контактную прочность сталей с покрытиями при трении качения поможет лучше понять физику их влияния на величину суммарного износа, соотношение его составляющих и долговечность композиции «покрытие–основа».

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования износа и долговечности образцов из стали ШХ15 проводились на универсальной установке [18], которая позволяет испытывать образцы в условиях трения качения с

точечным и линейным контактами. Исследования проводились на плоской поверхности образцов диаметром 40 мм с диффузионными покрытиями и без покрытий с различной термической обработкой. Диффузионные покрытия наносили методами ионного азотирования в безводородных средах, а также с применением интегральных технологий нитрозакалки и оксинитрозакалки. Ионное азотирование проводилось по следующему режиму: температура диффузионного насыщения $T = 570^\circ\text{C}$, давление в вакуумной камере $P = 240$ Па, насыщающая среда 75% об. $\text{N}_2 + 25\%$ об. Ar, время диффузионного насыщения $\tau = 480$ мин. Технология нитрозакалки включала: ионное азотирование в безводородной среде; термоактивирование при температуре закалки 860°C в течение 7 минут; закалку в масле с последующим отпуском при температуре 160°C в течение 90 минут. Оксинитрозакалка проводилась после ионного оксиазотирования по аналогичному режиму. Перед испытаниями образцы шлифовались ($Ra = 0,125$ мкм). Телами качения были шарики диаметром 7,14 мм при точечном контакте и ролики диаметром 4,5 мм и длиной 4,6 мм при линейном контакте, которые имели твердость HRC 63 и двигались по кругу диаметром 30 мм. Испытания проводились при максимальном давлении на площадке контакта 2140 МПа в среде смазки И-20 к моменту появления питтинга на дорожках качения. Методами металлографии определялись микроструктура, толщина и микротвёрдость по толщине азотированного слоя с использованием микроскопов МИМ-9 и ПМТ-3. Фазовый состав на поверхности азотированных слоев определяли с использованием ДРОН-3М. Остаточные напряжения сжатия в азотированных слоях определялись по методике [14]. Градиент твердости по толщине азотированного слоя является переменной величиной, поэтому в исследованиях для сравнений применялась его величина, которая определялась по формуле (1):

$$\text{Grad} = \frac{H_{\max} - H_o}{h}, \quad (1)$$

где $H_{\max}$ — максимальная твёрдость в азотированном слое [МПа], H_o — твёрдость основы [МПа], h — толщина азотированного слоя [мкм].

Суммарный износ образцов до появления питтинга определялся по формуле:

$$U = U_d + U_c, \quad (2)$$

где U_d — деформационная составляющая суммарного износа, а U_c — его составляющая, связанная с износом от трения скольжения

$$U_c = L_n I_n + (L_c - L_n) I_y. \quad (3)$$

Здесь L_c и L_n — пути скольжения и приработки тел качения соответственно, I_n и I_y — средние интенсивности износа в период приработки и в период установившегося износа соответственно.

Значения величин L_n , I_n и I_y выбирались на основании исследований [8], а

$$L_c = 3,14d_k NK, \quad (4)$$

где d_k — диаметр тела качения, N — долговечность образца при качении, K — коэффициент проскальзывания, который в условиях экспериментов определялся для точечного контакта согласно [5] ($K_{т.к} = 0,054$) и для линейного контакта согласно [2] ($K_{л.к} = 0,26$).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 1 приведены результаты исследований физико-механических свойств и фазового состава образцов из стали ШХ15 после термической и химико-термической обработок перед испытаниями на контактную усталость и износостойкость при трении качения.

ТАБЛИЦА 1. Свойства образцов из стали ШХ15 после термической и химико-термической обработки перед испытаниями на контактную усталость и износостойкость при трении качения.

TABLE 1. Properties of the samples from ShKh15 steel after hardening and nitrite hardening before testing for contact fatigue and wear resistance during rolling friction.

№	Вид термической и химико-термической обработки	Микротвёрдость H_{100} , МПа		Толщина покрытия h_n , мкм	Фазовый состав поверхности	Градиент твёрдости, МПа/мкм	Остаточные напряжения σ_o , МПа
		Поверхности	Основы				
1	Сталь без т/о + азотирование	9580	2800	350	55% $Fe_{2.3}N$ + 45% Fe_4N	19,65	629
2	Закалка + азотирование	9580	5670	357	55% $Fe_{2.3}N$ + 45% Fe_4N	11,23	615
3	Нитрозакалка от 860°C	9250	7760	367	80% Fe_4N + 20% α - $Fe_{[N]}$	3,13	380
4	Оксинитрозакалка от 860°C	9340	7860	375	90% Fe_4N + 10% α - $Fe_{[N]}$	3,90	430
5	Закалка от 860°C	7860	7860	—	—	—	—

Результаты свидетельствуют, что азотированные образцы без термической обработки имеют самые высокие параметры: микротвёрдость поверхности, градиент твёрдости по глубине азотированного слоя и остаточные напряжения сжатия. При этом, микротвёрдость основы в 2,8 раза меньше, чем у закалённой стали. Микротвёрдость основы азотированных образцов после закалки меньше, чем у закалённых образцов в связи с высокотемпературным отпуском стали, но всё же она в 2 раза выше по сравнению с основой азотированных образцов без предварительной термообработки. Фазовый состав поверхности азотированных образцов имеет в своём составе 55% ε -фазы ($\text{Fe}_{2.3}\text{N}$), которая обеспечивает её высокую твердость.

Микротвёрдость образцов после нитрозакалки и оксинитрозакалки ниже по сравнению с азотированными образцами в связи с распадом ε -фазы при термоактивировании и диффузией азота вглубь металла, что приводит к увеличению толщины азотированного слоя и значительному (в 5–6,3 раза) уменьшению градиента твёрдости по его глубине по сравнению с азотированными образцами без термообработки. Фазовый состав поверхности образцов после нитрозакалки и оксинитрозакалки имеет преимущественно γ' -

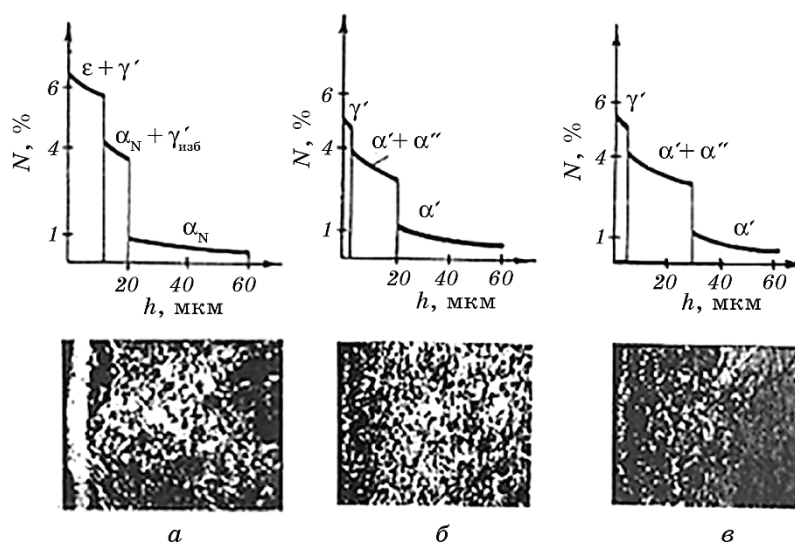


Рис. 1. Микроструктура ($\times 500$), содержание азота и расположение фаз по глубине стали ШХ15 после нитрозакалки (а, б) и оксинитрозакалки (в) при различных выдержках в процессе термоактивирования: 0 минут (а), 7 минут (б, в).

Fig. 1. The microstructure ($\times 500$), the nitrogen content, and the location of the phases in the depth of ShKh15 steel after nitrite (а, б) and oxinitrite hardening (в) at various times of thermal activation: 0 min (а), 7 min (б, в).

фазу (Fe_4N) с незначительной примесью $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$, что способствует большей пластичности азотированного слоя. Остаточные напряжения сжатия при этом в 1,5–1,6 раза ниже, чем у азотированных образцов.

На рисунке 1 показана микроструктура, содержание азота и расположение фаз по глубине стали ШХ15 после нитрозакалки (а, б) и оксинитрозакалки (в) при различных временах выдержки в процессе термоактивирования. На рисунке видно нетравящуюся ε -фазу, которая осталась на поверхности стали после нитрозакалки без термоактивирования азотированного слоя перед закалкой (рис. 1, а). При выдержке в 7 минут после нитрозакалки и оксинитрозакалки (рис. 1, б, в) наблюдается отсутствие ε -фазы, которая распалась во время термоактивирования. На поверхности остается только γ' -фаза. Освободившийся в результате распада ε -фазы азот диффундирует вглубь металла, увеличивая зону внутреннего азотирования. Наличие оксидного слоя на поверхности при оксинитрозакалке препятствует диффузии азота в окружающую среду, что способствует увеличению зоны внутреннего азотирования (рис. 1, в) и толщины азотированного слоя (табл. 1).

В таблице 2 приведены результаты исследований концентрации

ТАБЛИЦА 2. Концентрация азота и фазовый состав по глубине стали ШХ15 после ионного азотирования и нитрозакалки по оптимальному режиму.

TABLE 2. The concentration of nitrogen and the phase composition of the depth of steel ShKh15 after ion nitriding and nitro hardening optimal mode.

№	Толщина последовательно удаленного слоя, мкм	Суммарная величина удаленного слоя, мкм	Концентрация азота в слое по массе, %		Фазовый состав на поверхности	
			После азотирования	После нитрозакалки	После азотирования	После нитрозакалки
1	0	0	8,45	7,30	$\varepsilon + \gamma' + \alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$	$\gamma' + \alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$
2	5	5	7,95	7,35	$\varepsilon + \gamma' + \alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$	$\gamma' + \alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$
3	10	15	4,18	5,24	$\gamma' + \alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$	$\gamma' + \alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$
4	10	25	2,91	3,39	$\gamma' + \alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$	$\gamma' + \alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$
5	20	45	1,65	2,12	$\gamma' + \alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$	$\gamma' + \alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$
6	30	75	0,35	0,75	$\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$	$\gamma' + \alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$
7	30	105	0,17	0,20	$\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$	$\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$
8	60	165	0,12	0,15	$\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$	$\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$
9	60	225	0,08	0,10	$\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$	$\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$
10	60	285	0,006	0,008	$\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$	$\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$
11	60	345	0,004	0,006	$\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$	$\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$

азота и фазового состава по глубине стали ШХ15 после ионного азотирования и нитрозакалки. Из таблицы 2 видно, что концентрация азота после нитрозакалки меньше по сравнению с азотированием и постепенно уменьшается по глубине от поверхности до основы. При этом меняется фазовый состав. В поверхностном слое толщиной 5 мкм после азотирования присутствуют все три фазы ($\varepsilon + \gamma' + \alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$), а в последующих слоях общей толщиной 40 мкм отсутствует ε -фаза и в наличии только две фазы ($\gamma' + \alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$). Во всех последующих слоях вплоть до основы присутствует фаза $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$ — твёрдый раствор азота в железе. После нитрозакалки отсутствует ε -фаза и в поверхностных слоях общей толщиной 75 мкм присутствуют только фазы γ' и $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$, а во всех последующих слоях присутствует фаза $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$. Исследования показали, что поле нитрозакалки концентрация азота на поверхности ниже по сравнению с её значением на глубине 5 мкм. Это обусловлено тем, что во время термоактивирования азотированного слоя при температуре закалки после разложения ε -фазы происходит частичная диффузия азота и углерода с поверхности в окружающую среду. Это приводит к снижению твердости поверхности (рис. 2).

На рисунке 2 показано распределение микротвёрдости по глубине образцов стали ШХ15 после различных видов термической и химико-термической обработок: нитрозакалки, закалки, азотирования

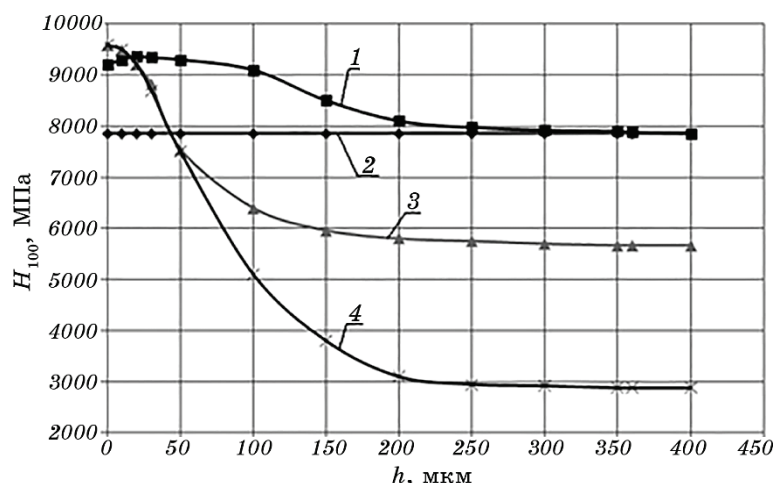


Рис. 2. Распределение микротвердости по толщине азотированного слоя стали ШХ15 после: 1 — нитрозакалки, 2 — закалки, 3 — азотирования после закалки, 4 — азотирования стали без термообработки.

Fig. 2. Distribution of microhardness through the thickness of the nitrided layer of ShKh15 steel after: 1—nitrite hardening, 2—quenching, 3—nitriding after quenching, 4—nitriding of steel without heat treatment.

вания после закалки, азотирования стали без термообработки. На рисунке 2 наглядно видно, что в диффузионных покрытиях возникает переменный по глубине градиент твёрдости, усреднённая величина которого (табл. 1) после нитрозакалки составляет 3,13 МПа/мкм и в 6 и 3,6 раза меньше по сравнению с её значениями для азотированной стали без термообработки и после закалки соответственно.

При нитрозакалке на поверхности возникает понижение твёрдости в связи с частичной диффузией азота и углерода в окружающую среду в процессе термоактивирования. Максимальная твёрдость в этом случае находится на глубине 5–10 мкм от поверхности. Поэтому для получения большей долговечности при качении рекомендуется удалять шлифованием поверхностный слой пониженной твёрдости. При оксинитрозакалке такой слой пониженной твёрдости на поверхности не образуется.

В таблице 3 приведены результаты испытаний на контактную усталость стали ШХ15 при трении качения в масле И-20 при максимальном давлении на площадке контакта 2140 МПа. Из таблицы видно, что долговечность образцов без термообработки после ионного азотирования составляет при линейном и точечном контактах $0,71 \cdot 10^6$ и $1,0 \cdot 10^6$ циклов нагружения соответственно и превышает в 1,3 раза её значение для неазотированных образцов. Долговечность

ТАБЛИЦА 3. Результаты испытаний на контактную усталость стали ШХ15 при трении качения в масле И-20 при максимальном давлении на площадке контакта 2140 МПа.

TABLE 3. The results of test on contact fatigue of ShKh15 steel during rolling friction in oil I-20 with a maximal pressure on the contact area of 2140 МПа.

№	Вид термообработки и технологии нанесения покрытия	Микротвёрдость H_{100} , МПа		Толщина покрытия, мкм	Долговечность, $N \cdot 10^6$ циклов при контакте	
		Поверхности	Основы		Линейном	Точечном
1	Без термообработки	2940	2860	0	0,55	0,76
2	Без т/о + ионное азотирование	9580	2860	350	0,71	1,00
3	Закалка	7860	7860	0	15,7	24,1
4	Закалка + ионное азотирование	9180	5670	357	17,3	25,2
5	Нитрозакалка	9120	7860	367	27,1	38,7
6	Оксинитрозакалка	9340	7860	375	32,1	48,8

азотированных образцов после закалки в 24–25 раз превышает её значение для азотированных образцов без термообработки за счёт более высокой твёрдости основы и меньшего градиента твёрдости азотированного слоя.

Наивысшую долговечность при трении качения имели образцы после нитрозакалки и оксинитрозакалки, которая в 1,8 и 2 раза превышает ее значение для азотированных образцов и образцов после закалки соответственно. Это обусловлено наличием более высокой твердости поверхности и основы, большей толщиной и меньшим градиентом твердости азотированного слоя, оптимальными остаточными напряжениями сжатия в поверхностном слое. Исследова-

ТАБЛИЦА 4. Зависимость износа и соотношения его составляющих от вида термообработки и технологии нанесения покрытия на стали ШХ15 при трении качения с точечным и линейным контактами в масле И-20.

TABLE 4. Dependence of wear and ratio of its components on the type of heat treatment and coating technology for ShKh15 steel during rolling friction with point and line contacts in oil I-20.

№	Вид т/о и техноло- гия нане- сения по- крытия	Долго- веч- ность <i>N</i> ·10 ⁶ циклов	Суммарный износ до по- явления питтинга, мкм	Путь про- сколь- зыва- ния <i>L</i> ·10 ³ , м	Интенсив- ность износа при про- скользыва- нии <i>I</i> ·10 ⁻⁹	Износ от про- скользы- вания, мкм	Составляющие суммарного износа, %	
							Дефор- маци- онная	Про- сколь- зыва- ния
Точечный контакт								
1	Без т/о + и.а	1,0	12	1210,0	0,95	1,15	95,8	4,2
2	Закалка	24,1	32	29161,0	0,95	27,7	13,4	86,6
3	Закалка + + и.а.	25,2	36	30492,0	0,63	19,2	46,2	53,8
4	Н.з.	38,7	15	46827,0	0,30	14,0	6,7	93,3
5	О.н.з.	48,8	18,6	59048,0	0,30	17,7	4,0	95,2
Линейный контакт								
6	Без т/о + и.а	0,71	37	3674	0,95	3,5	94,5	5,5
7	Закалка	15,7	43	57682	0,95	54,8	15,6	84,4
8	Закалка + + и.а.	17,3	65	63560	0,63	40,0	38,5	61,5
9	Н.з.	27,1	31	99565	0,30	30,0	3,2	96,8
10	О.н.з.	32,1	36,2	117935	0,30	35,4	2,2	97,8

ния показали, что долговечность образцов при трении качения с линейным контактом в условиях эксперимента на 30–35% меньше, чем для образцов с точечным контактом. Это объясняется большим коэффициентом проскальзывания (0,26) и более тяжелыми условиями работы материала при линейном контакте (плоское напряжённое состояние) по сравнению с точечным контактом (объёмное напряжённое состояние), при котором материал работает в условиях всестороннего сжатия [1, 3].

В таблице 4 приведены результаты исследований зависимости износа и соотношения его составляющих от вида термообработки и технологии нанесения покрытия на стали ШХ15 при трении качения с точечным и линейным контактами в масле И-20. Исследования показали, что вид термической и химико-термической обработки оказывает существенное влияние не только на контактную выносливость образцов, но и на их износ. Величина суммарного износа зависит от количества циклов нагружений до появления питтинга и особенно сильно от соотношения между собой его составляющих — деформационной и от проскальзывания. В азотированных образцах без термообработки с низкой твёрдостью основы деформационная составляющая суммарного износа при точечном контакте составляет 95,8%, а при линейном контакте — 94,5%. При этом, долговечность образцов имеет минимальное значение. Наоборот, в образцах с высокой твёрдостью основы составляющая от проскальзывания является преобладающей, при этом долговечность образцов максимальная. Исследования показали, что образцы с линейным контактом при всех видах термической и химико-термической обработки имели значительно больший износ от проскальзывания (более 2 раз) по сравнению с образцами с точечным контактом. Это обусловлено большим коэффициентом проскальзывания (0,26) при линейном контакте против значительно меньшего его значения (0,054) при точечном контакте.

4. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

На контактную прочность и износостойкость стали при трении качения большое влияние оказывает вид термической и химико-термической обработки и, в частности, физико-механические свойства азотированного слоя (твёрдость, толщина, градиент твёрдости по толщине, остаточные напряжения), фазовый состав его поверхности и твёрдость основы.

Исследования показали, что применение интегральных технологий нитрозакалки и оксинитрозакалки позволяет в 1,8–2 раза повысить контактную выносливость стали ШХ15 и снизить интенсивность её износа при трении качения в масле И-20 по сравнению с закалённой сталью.

Для достижения максимальных значений долговечности и износостойкости при трении качения рекомендуется применение интегральных технологий упрочнения композиции «покрытие–основа» с получением на поверхности градиентного покрытия высокой твердости без хрупких фаз, с максимальной толщиной, с минимальным градиентом твердости по глубине и оптимальными остаточными напряжениями сжатия, которое должно наноситься на основу максимальной твердости. К таким перспективным технологиям относятся нитрозакалка и оксинитрозакалка.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. К. Джонсон, *Механика контактного взаимодействия* (Москва: Мир: 1989).
2. Г. К. Трубин, *Контактная усталость материалов для зубчатых колес* (Москва: Машгиз: 1962).
3. С. В. Пинегин, *Контактная прочность и сопротивление качению* (Москва: Машиностроение: 1969).
4. Л. Я. Перель, *Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор: справочник* (Москва: Машиностроение: 1983).
5. П. В. Каплун, К. А. Паршенко, *Підвищення зносостійкості і довговічності підшипників кочення* (Хмельницький: ХНУ: 2016).
6. В. М. Зинченко, *Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки* (Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана: 2001).
7. О. І. Балицький, В. О. Колесніков, Я. Еліаш, М. Р. Гаврилюк, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, № 4: 110 (2014).
8. В. Г. Каплун, П. В. Каплун, *Ионное азотирование в безводородных средах* (Хмельницький: ХНУ: 2015).
9. В. М. Федірко, І. М. Погрелюк, *Азотування титану та його сплавів* (Київ: Наукова думка: 1996).
10. М. М. Швед, *Изменение эксплуатационных свойств железа и стали под влиянием водорода* (Київ: Наукова думка: 1985).
11. В. І. Похмурський, Х. Б. Василів, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, № 2: 5 (2012).
12. P. V. Kaplun, *Mater. Sci.*, **53**, Iss. 6: 818 (2018).
13. P. V. Kaplun, O. V. Dykha, and V. A. Gonchar, *Mater. Sci.*, **53**, Iss. 4: 468 (2018).
14. P. V. Kaplun and B. A. Lyashenko, *Strength of Materials*, **48**, Iss. 6: 777 (2016).
15. В. І. Похмурський, М. С. Хома, *Корозійна втома металів і сплавів* (Львів: СПОЛІОМ: 2008).
16. P. V. Kaplun and B. A. Lyashenko, *Strength of Materials*, **50**, Iss. 2: 288 (2018).
17. П. В. Каплун, В. А. Гончар, А. В. Паршенко, *Спосіб випробувань на контактну витривалість при коченні з проковзуванням*, Патент України № 106181 (Опубл. 25 квітня 2016).
18. В. Г. Каплун, П. В. Каплун, В. А. Гончар, Т. В. Донченко, *Спосіб підвищення контактної витривалості при циклічному навантаженні нітрогарту-*

- ванням, Патент України № 123692 (Опубл. 12 березня 2018).
19. В. Г. Каплун, П. В. Каплун, В. А. Гончар, Т. В. Донченко, *Спосіб підвищення контактної витривалості сталей при циклічному контактному навантаженні застосуванням оксинітрогартування*, Патент України № 123691 (Опубл. 12 березня 2018).

REFERENCES

1. K. Dzhonson, *Mekhanika Kontaktnogo Vzaimodeystviya* [Contact Mechanics] (Moscow: Mir: 1989) (in Russian).
2. G. K. Trubin, *Kontaktnaya Uсталost' Materialov dlya Zubchatykh Koles* [Contact Fatigue of Gear Wheel] (Moscow: Mashgiz: 1962) (in Russian).
3. S. V. Pinegin, *Kontaktnaya Prochnost' i Soprotivlenie Kacheniyu* [Contact Strength and Rolling Resistance] (Moscow: Mashinostroenie: 1969) (in Russian).
4. L. Ya. Perel', *Podshipniki Kacheniya: Raschet, Proektirovanie i Obsluzhivanie Opor: Spravochnik* [Rolling Bearings: Calculation, Design and Maintenance of Bearings: Handbook] (Moscow: Mashinostroenie: 1983) (in Russian).
5. P. V. Kaplun and K. A. Parshenko, *Pidvyshchennya Znosostiykosti i Dovhovichnosti Pidshypnykiv Kochennya* [Increasing Wear Resistant and Durability of Rolling Bearings] (Khmelnyskyi: KhNU: 2016) (in Ukrainian).
6. V. M. Zinchenko, *Inzheneriya Poverkhnosti Zubchatykh Koles Metodami Khimiko-Termicheskoy Obrabotki* [Gear Wheels Surface Engineering using Chemicothermal Treatment Methods] (Moscow: MGTU im. N. E. Bauman: 2001) (in Russian).
7. O. I. Balyts'kyi, V. O. Kolesnikov, Ya. Eliash, and M. R. Havrylyuk, *Physicochemical Mechanics of Materials*, No. 4: 110 (2014) (in Ukrainian).
8. V. G. Kaplun and P. V. Kaplun, *Ionnoe Azotirovanie v Bezvodородnykh Sredakh* [Ion Nitriding in Hydrogen-Free Environments] (Khmelnyskyi: KhNU: 2015) (in Russian).
9. V. M. Fedirko and I. M. Pohrelyuk, *Azotuvannya Tytanu ta yoho Splaviv* [Nitriding of Titanium and its Alloys] (Kyiv: Naukova Dumka: 1996) (in Ukrainian).
10. M. M. Shved, *Izmenenie Ekspluatatsionnykh Svoystv Zheleza i Stali pod Vliyaniem Vodoroda* [Change of the Service Properties of Iron and Steel under Hydrogen Influence] (Kyiv: Naukova Dumka: 1985) (in Russian).
11. V. I. Pokhmurs'kyi and Kh. B. Vasylyv, *Physicochemical Mechanics of Materials*, No. 2: 5 (2012) (in Ukrainian).
12. P. V. Kaplun, *Mater. Sci.*, **53**, Iss. 6: 818 (2018).
13. P. V. Kaplun, O. V. Dykha, and V. A. Gonchar, *Mater. Sci.*, **53**, Iss. 4: 468 (2018).
14. P. V. Kaplun and B. A. Lyashenko, *Strength of Materials*, **48**, Iss. 6: 777 (2016).
15. V. I. Pokhmurs'kyi and M. S. Khoma, *Koroziyna Vtoma Metaliv i Splaviv* [Corrosion Fatigue of Metals and Alloys] (Lviv: SPOLOM: 2008) (in Ukrainian).
16. P. V. Kaplun and B. A. Lyashenko, *Strength of Materials*, **50**, Iss. 2: 288 (2018).
17. P. V. Kaplun, V. A. Honchar, and A. V. Parshenko, *Sposib Vyprobuvan na*

- Kontaktnu Vytryvalist pry Kochenni z Prokovzuvanniam* [Test Method for Back-to-Back Endurance for Rolling with slip]: Ukrainian Patent No. 106181 (Publ. November 25, 2016) (in Ukrainian).
18. V. H. Kaplun, P. V. Kaplun, V. A. Honchar, and T. V. Donchenko, *Sposib Pidvyshchennya Kontaktnoyi Vytryvalosti pry Tsyklichnomu Navantazhenni Nitrohartuvannyam* [Method of Back-to-Back Endurance Increasing under Cyclic Loading by Nitroannealing]: Ukrainian Patent No. 123692 (Publ. March 12, 2018) (in Ukrainian).
19. V. H. Kaplun, P. V. Kaplun, V. A. Honchar, and T. V. Donchenko, *Sposib Pidvyshchennya Kontaktnoyi Vytryvalosti Staley pry Tsyklichnomu Kontaktnomu Navantazhenni Zastosuvannyam Oksynitrohartuvannya* [Method of Back-to-Back Endurance Increasing of Steels at Cyclic Contact Loading using Oxynitroannealing]: Ukrainian Patent No. 123691 (Publ. March 12, 2018) (in Ukrainian).