

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЦИКЛИЧЕСКИХ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Каплун В.Г., Каплун П.В., Паршенко К.А. (ХНУ, г. Хмельницкий, Украина)

Experimental investigation of fatigue and long term of using of ball thrust bearings made of steel ShH15, 45, H12 with different hardening coverings of TiN are held. It is shown that hardening coverings lessen fatigue and raise the long term of using of bearings under the condition of being laid on hard base and the gradient of hardening on the thickness is minimum/ The technology of nitrohardening of steel ShH15, which raises the long term of using of ball bearings in 1.8 times in comparison with hardening using traditional technology.

В технике большое количество деталей машин, инструментов и оснастки работают при больших циклических контактных напряжениях: например, зубчатые колеса, колеса железнодорожного транспорта, вальцы прокатных станков, штампы и др. Проблема повышения их износостойкости и долговечности имеет большое экономическое значение и является актуальной.

Существуют разные способы решения этой проблемы. Они связаны с рациональным выбором материалов, изменением их структуры, химического и фазового составов, физико-механических характеристик методами термической и химико-термической обработки, пластического деформирования, нанесения упрочняющих покрытий и др. Однако механизм разрушения поверхности при различных методах упрочнения изучен не до конца. В частности, недостаточно изучено влияние конструкции и свойств покрытий, структуры и твердости материала основы, на которую наносятся покрытия, при действии циклических контактных нагрузок и касательных усилий, возникающих в зоне контакта и вызывающих проскальзывания.

Исследования многих авторов [1, 2, 3, 7] показывают, что при циклическом контактном нагружении, например, в подшипниках качения, под воздействием внешних нагрузок кроме других видов напряжений возникают касательные напряжения, величина которых играет важную роль в зарождении и развитии микротрещин. Некоторые из авторов [5, 6] считают это положение решающим в процессе усталостного развития микротрещин и долговечности подшипников качения. Исследования [8] закономерностей выкрашивания поверхностей качения, роликов с проскальзыванием показали, что глубины залегания максимальных главных и касательных напряжений совпадают с глубинами зон выкрашивания материалов пар качения. Поэтому исследование влияния характеристик покрытия и вида нагружения на величину и характер распределения касательных напряжений при контактном нагружении в подшипниках качения является актуальной задачей для определения их усталостной прочности и долговечности.

С целью изучения влияния характеристик и физико-механических свойств покрытий (толщины, модуля упругости и градиента свойств по глубине) на величину и характер распределения касательных напряжений в материале детали при контактном нагружении, нами проведены теоретические исследования на модели (пластины с различными вариантами покрытий) численным методом с использованием графовой модели упругого тела и пакета программ «Термоупругость», разработанной в Институте проблем прочности НАН Украины [9].

Исследуемая модель представляла собой пластину бесконечной длины и большой толщины, на поверхность которой нанесены покрытия с различными физико-механическими свойствами: диффузионные покрытия с плавным изменением свойств по глубине; однослойные покрытия с резким изменением свойств на границе с основанием; многослойные покрытия с различными свойствами и их распределением по глубине (табл. 1). Исследовалось напряженно-деформированное состояние (НДС) в ограниченной области. На площадку контакта $2 \cdot b = 0,4$ мм действовали равномерно распределенная нагрузка $q = f(x)$, которая изменялась по закону: $q = \alpha \cdot (1 - 0,25 \cdot x^2)$, где α - коэффициент нагрузки ($-0,2 \leq x \leq 0,2$), и касательная нагрузка $F = \mu \cdot q$, где μ - безразмерный коэффициент ($\mu < 1$). Решалась краевая задача в упругой области, исследовалось плоское напряженное состояние пластины с покрытием. Исследования проводились при постоянном значении модуля упругости основы $E_0 = 2 \cdot 10^5$ МПа. Параметры покрытия и коэффициент μ изменялись в следующих пределах: толщина покрытия $h_n = 5 \dots 300$ мкм; модуль упругости покрытия $E_n = (2 \dots 4) \cdot 10^5$ МПа; $K_e = E_n/E_0 = 1 \dots 2$; $\mu = 0 \dots 0,4$; коэффициент нагрузки $\alpha = 10^3$ МН/м.

Таблица 1. Варианты моделей покрытий с различными физико-механическими характеристиками

№ слоя покрытия	Толщина слоя в мкм	Вариант модели покрытия													
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
		Значения модулей упругости $E \cdot 10^5$ МПа													
1	5	2,0	4,0	3,5	3,0	2,1	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	
2	5	2,0	4,0	3,45	2,95	4,0	4,0	3,0	3,85	3,85	4,0	4,0	4,0	4,0	
3	5	2,0	3,95	3,4	2,9	3,95	2,1	2,2	3,4	3,5	2,0	4,0	4,0	4,0	
4	5	2,0	3,85	3,3	2,8	3,85	3,85	2,07	2,8	2,9	2,0	4,0	4,0	4,0	
5	30	2,0	3,6	2,9	2,6	3,6	3,6	2,0	2,3	2,6	2,0	2,0	4,0	4,0	
6	50	2,0	2,8	2,4	2,3	2,8	2,8	2,0	2,0	2,3	2,0	2,0	4,0	4,0	
7	100	2,0	2,3	2,15	2,1	2,3	2,3	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	4,0	
8	100	2,0	2,05	2,05	2,02	2,05	2,05	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	4,0	
9	700	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	
10	1000	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	
11	1000	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	
12	2000	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	

Данные расчета касательных напряжений на поверхности пластины в центре площадки контакта при различных вариантах модели покрытия и различных коэффициентах μ показали, что при $\mu = 0$ и $\mu = 0,01$ значения $\tau_{xy} = 0$ или незначительны, не зависимо от характера и физико-механических свойств покрытия. При значениях $\mu \geq 0,1$ величина касательных напряжений в данной точке возрастает с возрастанием μ . При различных свойствах покрытий значения τ_{xy} различны. Однако их значения в различных вариантах моделей покрытий незначительно (до 10%) отличаются от величины τ_{xy} в пластине без покрытий. На рис. 1 показано распределение касательных напряжений в зоне контакта на поверхности и глубине покрытий при различных вариантах конструкции покрытия.

Исследования показали, что при значениях $\mu < 0,1$ максимальные значения τ_{xy} находятся на глубине $0,5 \cdot b$ с симметричным их расположением относительно оси Y (рис. 1б). При различных вариантах моделей покрытий эта закономерность сохраняется. С увеличением μ точка максимального возникновения τ_{xy} перемещается к

поверхности и центру площадки контакта и при $\mu = 0,4$ находится на поверхности в центре площадки контакта. Характер распределения τ_{xy}^{\max} вдоль оси X в опасных сечениях показан на рис. 26. Из рис. 26 видно, что с увеличением μ уменьшается симметрия расположения τ_{xy} относительно оси Y с уменьшением зоны со знаком «+» и увеличением зоны со знаком «-» в рассматриваемом сечении.

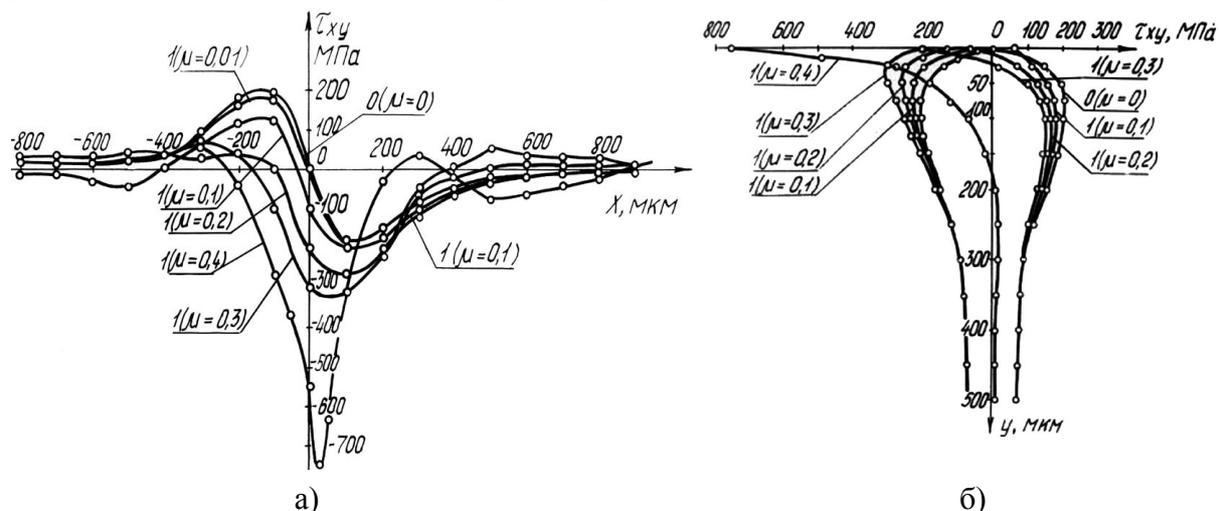


Рис. 1. Распределение касательных напряжений в композиции “покрытие –основа” при отсутствии покрытия (вариант 0 табл. 1) и наличии покрытия (вариант 1, табл. 1) с различными значениями μ . а) значения касательных напряжений на поверхности площадки контакта вдоль оси X; б) распределение касательных напряжений по глубине композиции в опасных сечениях

Таблица 2. Максимальные касательные напряжения в опасных сечениях при различных вариантах покрытий

Значения μ	Вариант модели покрытия												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	185	199	193	193	199	198	188	189	191	186	188	205	204
0,01	188	201	195	194	201	200	188	191	194	188	190	208	209
0,1	210	227	215	214	219	219	208	213	220	203	210	236	228
0,2	241	261	249	247	251	250	238	249	261	229	242	267	249
0,3	307	317	305	304	303	312	327	346	393	334	309	300	301
0,4	734	756	723	703	705	712	738	745	739	707	695	737	732

В табл. 2 приведены данные максимальных значений касательных напряжений при различных вариантах моделей покрытий для различных значений μ . Из приведенных данных видно, что с возрастанием μ резко возрастают значения τ_{xy}^{\max} как для варианта 0 (пластины без покрытия), так и для различных вариантов покрытий.

Свойства покрытий оказывают влияние на величину τ_{xy}^{\max} . Так, заметна тенденция уменьшения максимальных касательных напряжений с уменьшением модуля упругости покрытия и коэффициента K_e . В частности при толщине

диффузионного покрытия 300 мкм с уменьшением K_e от 2 до 1 τ_{xy}^{\max} уменьшается на 7% при $\mu=0$. При увеличении μ до 0,4 это уменьшение τ_{xy}^{\max} составляет 3%.

Увеличение толщины покрытия приводит к незначительному (до 5%) повышению τ_{xy}^{\max} . Однако существенным является то, в каком месте возникают τ_{xy}^{\max} в покрытии, имеющем более высокие физико-механические характеристики или в основе с меньшими физико-механическими свойствами. Поэтому толщина покрытия должна быть большей, чем глубина возникновения максимальных касательных напряжений. Наиболее неблагоприятным с точки зрения работоспособности покрытия и долговечности композиции “покрытие-основа” является случай, когда максимальные касательные напряжения возникают на стыке покрытия и основы, где предел адгезионной прочности значительно меньше предела когезионной прочности, особенно в покрытиях, полученных методом осаждения без переходной диффузионной зоны.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что на величину максимальных касательных напряжений, возникающих в конструктивных элементах при контактном воздействии, оказывают влияния физико-механические свойства покрытия и величина касательной нагрузки. Для повышения долговечности конструктивных элементов рекомендуется наносить диффузионные покрытия, в которых значительно выше адгезионная прочность по сравнению с покрытиями, полученными методами осаждения, и градиент изменения свойств покрытия по глубине следует уменьшать за счет повышения твердости и модуля упругости основы.

С целью изучения процесса изнашивания и проверки рекомендаций теоретических исследований нами проведены сравнительные экспериментальные исследования износостойкости и долговечности элементов шарикоподшипников с различными покрытиями и структурой материала, из которого они изготавливались. Исследования проводились на специальной установке [10] для испытаний образцов на трение качения. В качестве исследуемого образца было выбрано верхнее кольцо упорного шарикоподшипника № 8204 с плоской поверхностью контакта. Исследования проводились в среде масла И-20 при нагрузке на шарик 300Н и частоте вращения образца 600 мин⁻¹. Исследуемые образцы изготавливались из сталей: 45, ШХ15 и Х12, подвергались различной термической обработке с целью получения различной структуры и твердости материала. На обработанные образцы наносились различные покрытия (табл. 3). Шероховатость всех образцов была $R_a = 0,125$ мкм. В сепараторе упорного подшипника находилось 12 шариков диаметром 7,14 мм и твердостью HRC=63 ед., которые непосредственно контактировали с исследуемым образцом.

В процессе исследований измерялась величина изнашивания, долговечность, выраженная в количестве циклов нагружения до появления питтинга, и твердость поверхности дорожки качения. Величина износа измерялась с помощью профилометра-профилографа модели 201, твердость дорожки качения измерялась твердомером ПМТ-3.

Результаты испытаний (табл. 3) показывают, что долговечность образцов увеличивается при увеличении толщины покрытия и твердости основы, на которую наносится покрытие. Все образцы с покрытиями, нанесенными на закаленную основу, имели почти на порядок выше долговечность и износостойкость по сравнению с образцами с такими же покрытиями, нанесенными на основу с малой твердостью. Уменьшение градиента твердости по глубине азотированных образцов из стали ШХ15 в 2 раза за счет увеличения твердости основы закалкой привело к увеличению долговечности образцов в 5 раз.

Исследования показали, что износостойкость и долговечность образцов увеличивается с увеличением твердости покрытий только до определенных значений, при

которых достигается оптимальное соотношение между твердостью и пластичностью. Такое соотношение определяется структурой и фазовым составом покрытий. При твердости покрытий, большей от оптимального значения, повышается его хрупкость и происходит более быстрое разрушение. Для азотированных слоев оптимальной является твердость поверхности 7600–7800 МПа, в которой отсутствует хрупкая ϵ -фаза (табл. 3).

Таблица 3. Физико-механические характеристики и результаты исследований на износостойкость и долговечность образцов из различных сталей с различными покрытиями и термообработкой

№ п/п	Марка стали	Вид термообработки и технологии нанесения покрытия	Микротвердость H_{100} , МПа			Толщина покрытия, мкм	Износ, мкм	Долговечность, $N \cdot 10^6$ циклов
			Поверхности до испытаний	Основа	Дорожки качения после испытаний			
1	45	без термообработки	4200	2450	3290	–	48	0,60
2	45	без термообработки + ионное азотирование (режим 1)	7440	2450	7110	280	36	0,96
3	45	закалка	5110	5100	523	–	5,6	0,60
4	45	закалка + ионное азотирование (режим 1)	7460	4400	7200	290	6,4	12,9
5	ШХ15	без термообработки	3840	3340	3320	–	46	0,70
6	ШХ15	без термообработки + ионное азотирование (режим 1)	9180	2680	7400	300	25	1,08
7	ШХ15	закалка	7210	7210	7130	–	5,0	25,1
8	ШХ15	закалка + ионное азотирование (режим 1)	9180	4970	7160	300	5,2	24,2
9	ШХ15	закалка + ионное азотирование (режим 2)	7660	5800	7300	290	4,5	26,4
10	ШХ15	закалка + TiN (метод КИБ)	14000	5120	5120	5	9,5	22,0
11	ШХ15	без термообработки + TiN (метод КИБ)	14000	2680	2350	5	44	0,75
12	ШХ15	без термообработки + гальванический Cr	8200	7210	7140	5	4,6	28,4
13	ШХ15	закалка + гальванический Cr	8200	7210	7300	10	4,3	30,1
14	ШХ15	нитрозакалка + режим 2 (азотирование + закалка)	8300	7200	7410	320	2,5	48,9

Нанесение покрытий на закаленную поверхность при температурах высокого отпуска сталей вызывает снижение твердости основы, что приводит к уменьшению эффекта от нанесения покрытия и даже к снижению долговечности по сравнению с закаленной сталью без покрытия. Подтверждением этого служит нанесение TiN методом КИБ на незакаленную сталь ШХ15, при котором произошло снижение твердости основы с 7210 МПа до 5200 МПа, что в конечном счете привело к снижению долговечности образцов на 12% по сравнению с закаленной сталью. Однако нанесение

хрома гальваническим методом на закаленную основу стали ШХ15 с сохранением твердости основы позволило увеличить долговечность образцов на 25% при той же толщине покрытия 5 мкм, что и для TiN (рис.2).

Наибольшую долговечность и износостойкость показали образцы, упрочненные по технологии нитрозакалки – ионное азотирование с последующей закалкой и отпуском (табл. 3, рис. 2). При такой технологии достигается высокая твердость поверхности и основы, отсутствует хрупкая ϵ -фаза на поверхности, увеличивается толщина диффузионного слоя и снижается градиент твердости по глубине образцов. Износостойкость и долговечность образцов из стали ШХ15, упрочненных по технологии нитрозакалки, увеличилась в 2 раза по сравнению с закаленными образцами.

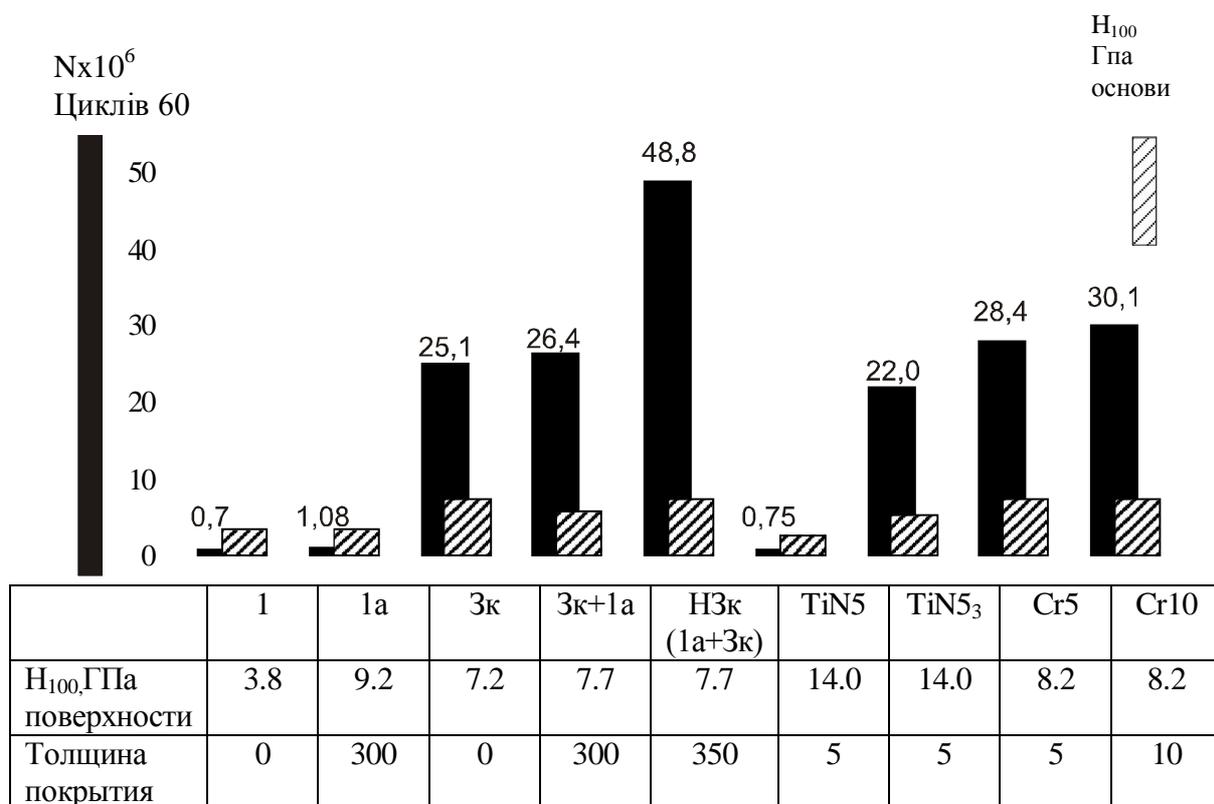


Рис. 2. Гистограмма долговечности образцов из стали ШХ15 с различными покрытиями и разной твердостью основы при трении качения с проскальзыванием в масле И-20. Условные обозначения: N – долговечность в млн. циклов; H_{100} – микротвердость в ГПа; 1 – сталь без термообработки; 1а – сталь азотированная по режиму 1а; 3к – сталь закаленная; 3к+1а – сталь закаленная с последующим азотированием по режиму 1а; НЗк – нитрозакалка (азотирование по режиму 1а с последующей закалкой и отпуском); TiN5 – покрытие TiN (метод КИБ) толщиной 5 мкм; TiN5₃ – покрытие TiN на закаленной основе (метод КИБ) толщиной 5 мкм; Cr5 – покрытие гальваническим хромом толщиной 5 мкм; Cr10 – покрытие гальваническим хромом толщиной 10 мкм

Многие исследования показывают [4-10], что преобладающим видом изнашивания поверхности при циклическом контактно нагружении и, в частности, качении, является усталостное разрушение. Его характеризуют три стадии: 1-ая – приспособляемость, которая начинается с момента начала пластической деформации поверхности до исчерпания микропластической деформации в поверхностном слое;

при этом микротвердость на поверхности изменяется и достигает максимального значения; 2-ая – накопление дефектов в поверхностном слое и возникновение микротрещин; 3-ья – разрушение (быстрый рост микротрещин, образование макротрещин, выкрашивание). Увеличение времени 1-ой и 2-ой стадий способствует повышению долговечности конструктивных элементов. Этого можно достичь увеличением продолжительности микропластических деформаций за счет наличия в микроструктуре материала метастабильных фаз, которые при пластическом деформировании превращаются в более стабильные структуры, а также при помощи легирования материалов азотом и другими легирующими элементами, которые снижают скорость роста микротрещин.

Нами проведены исследования влияния количества метастабильной фазы – остаточного аустенита, который образуется в процессе закалки сталей при разных температурах, на износостойкость и долговечность образцов из стали X12 при качении. Испытания проводились по приведенной выше методике. Результаты испытаний (табл. 4) показали, что с увеличением количества остаточного аустенита уменьшается твердость образцов. Под действием пластической деформации часть остаточного аустенита превращается в мартенсит, в результате чего увеличивается твердость стали на поверхности дорожки качения. Наибольшая износостойкость и долговечность в стали X12 получена при содержании остаточного аустенита 30 вес. %. При этом 12,9 вес. % остаточного аустенита превратилась в мартенсит. Это обусловило повышение твердости поверхности на дорожке качения с 8664 МПа до 9440 МПа. Исследования показали, что с дальнейшим увеличением содержания остаточного аустенита происходит уменьшение твердости поверхности контакта и, соответственно, износостойкости и долговечности образцов. Однако при содержании остаточного аустенита в стали меньше 30 вес. % происходит повышение исходной твердости и хрупкости стали и снижение ее долговечности при циклическом контактном нагружении (табл. 4). Таким образом, для стали X12 при данных условиях испытаний наличие в структуре 30 вес.% остаточного аустенита является оптимальным с точки зрения обеспечения ее максимальной износостойкости и долговечности.

Таблица 4. Физико-механические характеристики и результаты испытаний на износостойкость образцов из стали X12 с различным содержанием остаточного аустенита

№ п/п	Температура закалки, °С	Количество остаточного аустенита, вес. %	Твердость образца до испытаний Н ₁₀₀ , МПа	Твердость образца на дорожке качения после испытаний Н ₁₀₀ , МПа	Количество распавшегося аустенита, вес. %	Износ, мкм	Долговечность до выкрашивания, N·10 ⁶ циклов
1	920	25	9162	9260	12,8	7,5	64,8
2	940	30	8664	9440	12,9	5,5	69,1
3	1000	46	8450	8700	17,6	6,5	64,1
4	1060	65	7708	8570	18,2	13,5	54,3
5	1090	80	6710	7960	25,6	15,1	41,0
6	1130	92	4830	6540	32,5	16	30,2

Вероятно, что для других марок стали и других условий испытаний оптимальные значения содержания остаточного аустенита будут другими, однако

является очевидным его положительное влияние на долговечность и износостойкость конструктивных элементов при циклическом контактом нагружении и, в частности, для подшипников качения, зубчатых колес и др.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие рекомендации для повышения износостойкости и долговечности конструктивных элементов при циклическом контактом нагружении в масле:

1. Наносить диффузионные упрочняющие покрытия с оптимальной микротвердостью поверхности (7660 –7860 МПа) и минимальным градиентом твердости по глубине на основу максимальной твердости;
2. Толщина покрытий должна превышать глубину залегания максимальных касательных напряжений;
3. Применять технологии нанесения покрытий, позволяющие сохранять максимальную твердость основы и, в частности, технологию нитрозаковки (ионное азотирование с последующей закалкой, оптимальной выдержкой при температуре закалки и низкотемпературным отпуском);
4. Применять стали, в структуре которых содержится оптимальное количество остаточного аустенита.

Список литературы: 1. Орлов А.В., Черменский О.Н., Нестеров В.М. «Испытания конструкционных материалов на контактную усталость». – М.: Машиностроение, 1980. –110с. 2. Пинечин С.В. «Трение качения в машинах и приборах». М., Машиностроение, 1976, 262с. 3. Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Партон В.З. «Основы механики разрушения материалов». Киев: Наук. Думка, 1988 –Т.1-488с. 4. Черменский О.Н. «Накопление усталостных повреждений в опорах качения»//Пробл. машиностр. и надеж. машин. – 1996 -№5 –с.44-49. 5. Fatigue and failure mechanism of bearings/Schlicht H., Schreiber E., Zwirlein O/ “Int. Conf. Fatigue Eng. Mater. And Strct. Sheffield. 15-16 Sept. 1986. Vol.1”. 6. Воробьев Ю.В. «Физические основы усталостной прочности при качении» «Тр. 5-й Науч.-техн. конф. Фак. Мат. Знаний, посвящ. 50-летию Куйбышев. Политехн. Ин-та. Куйбышев, май, 1980. Ч.1». Куйбышев, 1980. С.170-175. 7. Johnson K.L. The strength of surfaces in rolling contact/ Proc. Inst. Mech. Eng. C. –1989. –203 №3. – с. 151-163. 8. Yoshida Akira, Fujita Kmei. Study on pitting of surface rolled steel rollers. 2. In the case of steel rollers surface-rolled under stiding-rolling condition./ ”Jonrnal JSLE. Int. Ed.” 1988. №9. 35-40. 9. Кузовков Е.Г. «Графовая модель упругого тела. Расчет напряженно-деформированного состояния» / АН УССР, Ин-тут пробл. проч. Препр. –Киев, - 1985. – 53 с. 10. Каплун П.В. Кинетика износа сталей с диффузионными покрытиями при контактом циклическом нагружении. // «Проблемы трибологии», 2001, №1, с.119-124.

Сдано в редакцию 23.05.05

Рекомендовано д.т.н., проф. Шевченко Ф.Л.