

УДК 539.311:621.891

Влияние характеристик структурной гетерогенности на процессы изнашивания термодиффузионных покрытий**В.М.Власов, Л.М.Нечаев, Н.Б.Фомичева, В.К. Зеленко**

Тульский государственный университет, г.Тула, Россия

В течение продолжительного времени проводились триботехнические испытания различных термодиффузионных покрытий на изнашивание при трении скольжения. Они позволили сделать ряд принципиальных обобщений по взаимобусловленности структурного состояния покрытий и кинетики процессов износа.

В результате моделирования фрикционных процессов широкого класса материалов было получено эмпирическое уравнение для коэффициента трения, отражающее параметрическое влияние свойств материала покрытий, реологию поверхностного трения и свойство смазочного материала.

Кинетика процессов изнашивания, коэффициенты трения скольжения и коррозионная стойкость высокопрочных покрытий, полученных термодиффузионными технологиями, являются в значительной степени структурно чувствительными и зависят от особенностей строения активного слоя. Безусловно, что на триботехнические свойства покрытий в первую очередь оказывает влияние их микроструктура, определяемая характеристиками структурной гетерогенности: размером фрагментов поликристалла, типом, геометрией, топографией, размерами и плотностью макродефектов (пор и включений). Достоверным является то, что субструктура, вид и уровень напряженного состояния также влияют на повреждаемость, и особенно на начальной стадии повреждаемости - зарождении микротрещин.

В течение продолжительного времени проводились триботехнические испытания различных термодиффузионных покрытий на изнашивание при трении скольжения. Они позволили сделать ряд принципиальных обобщений по взаимобусловленности структурного состояния покрытий и кинетики процессов износа.

Испытания для условий нереверсивного трения проводили на модернизированной стандартной машине СМЦ-2 с доработкой, в том числе узла крепления образца под схемы «штифт - шайба» и «кольцо - башмак». Установка позволила непрерывно контролировать износ в процессе эксперимента. Для имитации условий работы многих высокоскоростных узлов трения, была разработана оригинальная установка для испытаний на изнашивание в условиях нестационарного по скорости и нагрузке реверсивного трения в агре-

сивных газовых средах в диапазонах нагрузок до ~ 90 МПа и скоростей скольжения ~ 30 м/с с использованием гидроимпульсного генератора ударных волн [1,2].

Кинетика изнашивания термодиффузионно упрочненных сталей в области преимущественно усталостных процессов повреждаемости практически во всех случаях может быть отражена уравнением

$$c = K_c \cdot t^{a_t} = U_c \cdot S_k^{a_s} \cdot t^{a_t} \cdot u_{mp}, \quad (1)$$

в котором параметр K_x весьма чувствителен к субструктурному состоянию поверхностного слоя. В подтверждение этого в табл. 1 приведены данные по изменению показателя износостойкости в зависимости от технологических режимов упрочнения сталей.

Таблица 1

Изменение параметра $K_x \cdot 10^{-2}$ в зависимости от режимов трения сталей после электрогидроимпульсного упрочнения

Контактные давления, МПа	Мягкие режимы упрочнения			Жесткие режимы упрочнения		
	Скорость скольжения, м/с					
	1.0	2.0	3.0	1.0	2.0	3.0
0.8	3*	4*	5*	4*	4*	7*
1.0	5*	5*	7*	5*	7*	8*
2.0	8*	10*	10	10*	10*	10
5.0	1.5	20	35	10	20	25
8.0	20	30	35	30	30	30

*Зона механизма усталости.

Примечание. Границы субструктурных характеристик для мягких и жестких режимов упрочнения следующие: $p = (2...3) \cdot 10^{12}$ см⁻²; $D^* = 40$ нм; $\Delta\alpha/\alpha = 2-10-3$.

Примечательно, что при жестком режиме воздействия, формирующем высокие уровни субструктурной повреждаемости, а значит, и меньшую энергоемкость, происходит повышение скорости изнашивания.

Параметр K_x линейно зависит от скорости трения $V_{тр}$ и описывается степенной аппроксимацией от контактных давлений с показателем функции, равным 0.20...0.40. Последнее подтверждается серией экспериментов по изнашиванию сталей после импульсных способов их упрочнения. Производный параметр U_x в уравнении (1) в достаточной степени корректно характеризует определенное структурное состояние упрочненных слоев только в условиях реализации усталостного механизма изнашивания, и по этой причине его можно трактовать как экспериментальную материальную триботехническую константу.

Создание высокопрочных покрытий на сталях путем формирования легированного слоя расширяет зону усталостных механизмов изнашивания, Адгезионные процессы регулируются только в области низких скоростей скольжения, причем адгезионная зона весьма стабильна по своей топографии и практически не зависит от вида материала покрытия и типа слоя. В области диаграммы, где сочетаются высокие скорости и нагрузки, преобладают трибохимические процессы поверхностной повреждаемости.

Для высокопрочных покрытий, в отличие от упрочненных стальных структур, кинетика неустановившегося изнашивания описывается выражением (1) с некоторыми приближениями. Степенной показатель α_t может быть меньше 1 и принимать значения в широком диапазоне от 0.2 до 0.9 в зависимости от структуры покрытий. Для однородных по химическому составу слоев этот параметр составляет 0.7...0.9. Переход к режиму установившегося изнашивания характеризуется приближением значения параметра α_t к 1.

Для покрытий, полученных при импульсных вариантах легирования чистыми металлами (хромом, молибденом, вольфрамом), характерна некоторая стабильность степенного показателя α_t в кинетическом уравнении. В частности, для усталостной зоны диаграмм изнашивания значение составляет (1.2...1.3) (табл.2)

Таблица 2

Значения параметра α_t уравнения (1) для сталей, легированных молибденом и хромом электрогидроимпульсным методом

Контактные давления, МПа	Покрытие из молибдена		Покрытие из хрома	
	Тип1	Тип 2	Тип1	Тип 2
0.5	1.0	1.0	1.0	1.0
1.0	1.2	1.2	1.2	1.2

2.0	1.2	1.2	1.2	1.3
4.0	1.3	1.3	1.3	1.3
6.0	1.3	1.3	1.3	1.3
8.0	1.3	1.3	1.3	1.4
10.0	1.3	1.3	1.3	1.4
12.0	1.4	1,4	1,4	1.5
14.0	1.4	1.5	1,4	1.5
16.0	1.4	1.6	1,4	1.6

При более высоких контактных нагрузках, когда возможно протекание триботехнических реакций и микросколов, параметр $\alpha\sigma$ возрастает до значения 1.7...1.9.

Изнашивание покрытий из различных керамических материалов, полученных высокоэнергетическими технологиями, показало, что реакции износа, так же как и в случае для покрытий из тугоплавких металлов, на стадии регулярного изнашивания имеют практически линейный характер. Типы слоев по отношению объемов V расплавов: 1) $VMO \geq VFE$. 2) $VMO \approx VFE$ при $V_{тр} \approx 1$ м/с указаны в табл.2. С увеличением давления скорость износа возрастает нелинейно (табл. 3) ($\alpha\sigma \approx 1.3...1.4$), в то время как фактор скорости, и особенно при малых нагрузках, практически не влияет на износостойкость.

Таблица 3

Влияние контактных давлений σ к на скорость изнашивания керамических покрытий, полученных лазерными технологиями ($X \cdot 10^7$ мкм/мин*)

Контактные нагрузки, МПа	Тип керамического материала				
	Fe2B	FeN	W	TiN	W+Mo
10	0.9	1.0	1.2	0.7	0.7
80	7.6	8.4	10.1	6.0	5.6
120	11.3	12.5	13.2	9.0	8.6

Отмечено, что значения скоростей изнашивания коррелируют с прочностными упругими характеристиками материалов, а также со структурными макронеоднородностями покрытий. Меньшей окислации подвергаются нитридные и боридные покрытия (табл.4).

Таблица 4
Скорости изнашивания фрикционных пар с керамическими покрытиями (X • 107 мкм/мин)

Контактные нагрузки, МПа	Тип фрикционной пары					
	Fe2B-Fe2B	Fe2B-Fe2N	Fe2B-сталь	Fe2M-сталь	Fe2N-Fe2N	сталь-сталь
40	1.9	1.4	4.8	7.5	4.0	3.4
320	15.5	52	64	100	165	100
Механизмы изнашивания	У+Тх	Тх+У	А	А+Тх	У+Тх	А

Примечание. Обозначения механизмов: У - усталостный, Тх - триботехнический, А - адгезионный.

Мягкое контртело при сухом трении активизирует износ триботехнической пары вследствие развивающихся процессов адгезии, однако при наличии смазки оно формирует трибопленку и нивелирует износ.

При высоких контактных нагрузках, превышающих прочностные характеристики керамических материалов, микроконтактные объемы последних могут квазихрупко скалываться, что значительно активизирует процессы изнашивания. Кинетика триботехнической повреждаемости в этом случае может быть аппроксимирована уравнением (1) при больших значениях степенного показателя $\alpha \sigma \approx 1.8 \dots 1.9$.

В результате моделирования фрикционных процессов широкого класса материалов было получено эмпирическое уравнение для коэффициента трения, отражающее параметрическое влияние свойств материала покрытий, реологию поверхностного трения и свойство смазочного материала:

$$f_{\text{од}} = \left[30 - v_E \cdot \lg \left(\frac{V_{ck}}{V_{ck}^0} \right) \right] \cdot \left(\frac{s_k}{s_k^0} \right)^{\alpha_R} \cdot \left(\frac{40}{S} \right)^{K_b}, \quad (2)$$

где показатель КВ

можно определить как 0.25

$$\left(\frac{s_k}{s_k^0} \right)$$

Эмпирические параметры ω_E , α_R и β_q , отражают определенные свойства элементов трибосистемы: ω_E - физико-механические свойства контактирующих высокопрочных материалов и изменяются от -12 до +12; α_R - микрогеометрию трущейся поверхности и имеют определенный реологический смысл в интервале от 0.05 до 0.50; β_q - адгезионные свойства смазки окружающей среды и изменяются от 0.1 до 0.9.

Зависимость (2) рекомендуется использовать при моделировании коэффициента трения с учетом начальных величин давления σ_k и скорости скольжения $V_{ск}$. Сочетание параметров ($V_{ск}$ и ω_E), (σ_k и α_R) и (S и β_q) отражает определенный физический смысл. Скорость трения может изменять физические характеристики в связи со значением фактора ω_E а количество смазочного материала - пассивировать динамические характеристики контакта в связи с характеристикой β_q . Наличие специальных таблиц, количественно связывающих параметры ω_E , α_R и β_q с характеристиками триботехнической системы, дает возможность с высокой точностью оценивать коэффициент трения в связи с реальной структурой гетерогенного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов В.М., Нечаев Л.М. //Работоспособность высокопрочных термодиффузионных покрытий в узлах трения машин. Тула: Приок.кн.изд-во, 1994, 237с.
2. Фролов Н.Н., Власов В.М.//Газотермические износостойкие покрытия в машиностроении.М.:Машиностроение, 1992, 255с.

Influence of characteristics of structural heterogeneity on processes of wear process termodiffusion coverings

V.M.Vlasov, L.M.Nechaev, N.B.Fomicheva, V.K.Zelenko

During long time were carried out of test various termodiffusion of coverings on wear at friction of sliding. They have allowed to make a number of basic generalizations on consistent of a structural condition of coverings and kinetic of processes of deterioration.

As a result of modeling frictional processes of a wide class of materials the empirical equation for factor of friction reflecting parametrical influence of properties of a material of coverings, reology of superficial and property of a lubricant material was received.