

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 взаимообусловленности 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 взаимообусловленности 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<sup>-2</sup>;  $D^* = 40$  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  $\alpha_t$  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  $\alpha_t$  к 1.

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

Таблица 2

Значения параметра  $\alpha_t$  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  $\sigma$  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 окислительной подверженности 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-Fe2H	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  $\omega_E$ ,  $\alpha_R$  и  $\beta_q$ , отражают определенные свойства элементов трибосистемы:  $\omega_E$  - физико-механические свойства контактирующих высокопрочных материалов и изменяются от -12 до +12;  $\alpha_R$  - микрогеометрию трущейся поверхности и имеют определенный реологический смысл в интервале от 0.05 до 0.50;  $\beta_q$  - 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  $\sigma_k$  и скорости скольжения  $V_{ск}$ . Сочетание параметров ( $V_{ск}$  и  $\omega_E$ ), ( $\sigma_k$  и  $\alpha_R$ ) и ( $S$  и  $\beta_q$ ) отражает определенный физический смысл. Скорость трения может изменять физические характеристики в связи со значением фактора  $\omega_E$  а количество смазочного материала - пассивировать динамические характеристики контакта в связи с характеристикой  $\beta_q$ . Наличие специальных таблиц, количественно связывающих параметры  $\omega_E$ ,  $\alpha_R$  и  $\beta_q$  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.