

## Математическая модель процесса износа многокомпонентных композитов в зоне трения

СКАЧКОВ В.А., ИВАНОВ В.И., ГРИЦАЙ В.П.

Запорожская государственная инженерная академия

С позиций механики сплошных сред предложена математическая модель процесса износа многокомпонентных покрытий на пористых материалах. Экспериментальным путем изучен массовый износ покрытий, нанесенных электролизом ионных расплавов, и выявлена его зависимость от качественных характеристик поверхностного слоя.

The mathematical model for wear of multicomponent coverages is offered on porous materials from positions of continuous environments mechanics. The mass wear of coverages, which ionic fusions inflicted an electrolysis, is studied by experiment and his dependence from high-quality descriptions of superficial layer is exposed.

З позицій механіки суцільних середовищ запропоновано математичну модель процесу зношення багатоконпонентних покриттів на поруватих матеріалах. Експериментальним шляхом вивчено масове зношення покриттів, що нанесено електролізом іонних розплавів, і виявлено його залежність від якісних характеристик поверхневого шару.

Работоспособность узлов трения определяется величиной износа фрикционной пары, которая, в свою очередь, зависит от величины силы трения и физических характеристик компонентов композита. В работе [1] построена модель расчета коэффициентов трения многокомпонентных композитов, которые обуславливают появление силы трения.

В работах [2,3] показано, что износ соответствует усталостному разрушению, которое характеризуется процессом накопления микроструктурных разрушений, которые имеют случайный характер, обусловленный

$$\xi_{ij} = \sum_{k=1}^N Q_{ij\alpha\beta}^k \cdot (I_{\alpha\beta\gamma\delta} - \Psi_{\alpha\beta\gamma\delta}^k) \cdot \lambda_k \cdot [\varepsilon_{\gamma\delta} - \sum_{m=1}^N b_{\gamma\delta}^m (1 - \varphi^k) \cdot \lambda_k \cdot \Delta T], \quad (1)$$

где  $\xi_{ij}$ ,  $\varepsilon_{mn}$  - микроструктурные напряжения и деформации соответственно;  $Q_{ijmn}^k$ ,  $b_{ij}^k$  - случайные модули упругости и коэффициенты линейного термического расширения компонента композита с номером k соответственно; T - температура процесса;  $\Psi_{ijmn}^k$ ,  $\varphi^k$  - случайные структурные функции, устанавливающие зависимость упругих характеристик и коэффициентов линейного термического расширения компонента композитов с номером k от степени структурных преобразований соответственно;  $\lambda_k$  - случайная индикаторная функция;  $I_{ijmn}$  - единичный тензор четвертого ранга; N - количество компонентов в композите.

В уравнении (1) случайную термоструктурную функцию задают в виде соотношения

$$\Psi_{ijmn}^k(\vec{r}, S, \xi) = P_0^k(\vec{r}, S^k, \xi^k) \cdot I_{ijmn} + P_{ijmn}^k(\vec{r}, S^k, \xi^k), \quad (2)$$

где  $P_0^k(\vec{r}, S^k, \xi^k)$  - скалярная случайная функция, описывающая накопление трехмерных дефектов;  $P_{ijmn}^k$  - случайная тензорная функция, описывающая накопление плоских дефектов;  $S^k$  - случайный тензор прочности структурного элемента композита с номером k.

Компоненты случайной тензорной функции (2) однозначно определяются распределением микронапряжений и тензорами прочности структурных элементов композита. В общем случае, когда главные оси симметрии структурных элементов не совпадают с направлениями главных напряжений, тензор  $\Psi_{ijmn}$  несим-

метричен и его компонентами являются 36 случайных функций. В ряде частных случаев симметрия функции (2) увеличивается.

Для определения компонент случайных тензорных функций микроповреждаемости и статистических параметров микронапряжений и микродеформаций решают статистическую краевую задачу микромеханики композитов, связанную по процессам деформирования и разрушения. В постановке данной задачи дополнительно к уравнениям (1) добавляют уравнение равновесия, геометрические соотношения и граничные условия:

Расширяя возможности подхода работы [1], предлагается модель прогнозирования процесса износа многокомпонентных покрытий в зоне трения.

При моделировании композита средой  $B_2$  физические уравнения для условий накопления повреждений можно представить в виде:

$$\xi_{i\alpha, \alpha} = 0; \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{ij} = 0,5 (\chi_{i,j} + \chi_{j,i}); \quad (3.2)$$

$$\chi_i|_{\Gamma} = \chi_i^{\Gamma}, \quad (3.3)$$

где  $\chi_i$ ,  $\chi_i^{\Gamma}$  - вектор случайных перемещений в объеме и на границе тела соответственно.

Усредняя уравнения (1) и выделяя часть, ответственную за упругие характеристики материала, получают соотношение

$$C_{ijmn}^I = \sum_{k=1}^N \langle Q_{ij\alpha\beta}^k \rangle [I_{\alpha\beta\gamma\delta} - \langle \Psi_{\alpha\beta\gamma\delta}^k \rangle] \langle [\lambda_k \dot{\Phi}_{\gamma\delta mn}] \rangle, \quad (4)$$

где  $C_{ijmn}^I$  - макроскопические модули упругости композита;  $\dot{\Phi}_{ijmn}$  - флуктуация тензора четвертого ранга, зависящего от свойств компонентов композита [5];  $\langle \dots \rangle$  - оператор статистического осреднения.

Решение системы уравнений (3) с учетом соотношения (4) для флуктуаций микроструктурных напряжений  $\dot{\xi}_{ij}$  можно записать как

$$\dot{\xi}_{ij} = \sum_{k=1}^N [\dot{\theta}_{ij\alpha\beta}^k \cdot (I_{\alpha\beta\gamma\delta} - \langle \Psi_{\alpha\beta\gamma\delta}^k \rangle) - C_{ij\alpha\beta}^k \langle \Psi_{\alpha\beta\gamma\delta}^k \rangle] \cdot \dot{\lambda}_k \cdot [e_{\gamma\delta} - \varepsilon_{\gamma\delta} - \sum_{k=1}^N \langle b_{\gamma\delta}^k \rangle \cdot (1 - \langle \varphi^k \rangle) \cdot \lambda_k \cdot \Delta T], \quad (5)$$

где  $e_{ij}$  - макрокопическая деформация;  $\dot{\theta}_{ijmn}^k$ ,  $C_{ijmn}^k$  - флуктуации и средние значения модулей упругости компонентов композита соответственно.

В выражении (5) флуктуации микроструктурных напряжений определяются согласно работе [5]:

$$\dot{\xi}_{ij} = \int_V G_{i\alpha} \cdot \Pi_{\varphi\alpha\alpha} dV, \quad (6)$$

где  $G_{i\alpha}$  - тензор Грина для тела с объемом  $V$ .

В решении (6) параметр  $\Pi_{ij}$  определяется с использованием уравнения

$$\Pi_{ij} = \sum_{k=1}^N [\dot{\theta}_{ij\gamma\delta}^k \cdot (I_{\gamma\delta\alpha\beta} - \langle \Psi_{\gamma\delta\alpha\beta}^k \rangle) \cdot \langle \lambda_k \rangle + \langle \theta_{ij\alpha\beta}^k \rangle \langle \Psi_{\gamma\delta\alpha\beta}^k \rangle \lambda_k] \cdot [e_{\alpha\beta} - \sum_{k=1}^N \langle b_{\alpha\beta}^k \rangle \cdot (1 - \langle \varphi^k \rangle) \cdot \dot{\lambda}_k \cdot \Delta T]. \quad (7)$$

Дисперсии микроструктурных напряжений задают как:

$$D_{ij}^{mn} = \langle \dot{\xi}_{ij} \cdot \dot{\xi}_{mn} \rangle. \quad (8)$$

Средние значения и дисперсии микроструктурных напряжений вычисляют согласно работе [5]:

$$\sigma_{ij}^k = \sigma_{ij} + \langle \lambda_k \rangle^{-1} \cdot \langle \lambda_k \cdot \dot{\xi}_{ij} \rangle. \quad (9)$$

Компоненты случайных термоструктурных функций в соотношении (2) задаются в виде:

$$D_{ijmn}^k = \sigma_{ij} \cdot \sigma_{mn} + D_{ij}^{mn} - \sigma_{ij}^k \cdot \sigma_{mn}^k - \langle \lambda_k \rangle \cdot [\langle \lambda_k \cdot \dot{\xi}_{ij} \rangle \cdot \dot{\xi}_{mn} + \sigma_{mn} \langle \lambda_k^2 \cdot \dot{\xi}_{ij} \rangle + \sigma_{ij} \langle \lambda_k^2 \cdot \dot{\xi}_{mn} \rangle]. \quad (10)$$

Компоненты случайных термоструктурных функций в соотношении (2) задают в виде:

$$\langle P_0^k \rangle = \int_0^\tau \Omega_0^k \cdot F^k(\tau) d\tau; \quad (11)$$

$$\langle P_{ijmn}^k \rangle = \int_0^\tau \Omega_{ijmn}^k \cdot F^k(\tau) d\tau; \quad (12)$$

$$\Omega_0^k = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot D_{ijij}^k} \cdot \int_{\sigma_{ij}^{B-(k)}}^{\sigma_{ij}^{B+(k)}} \exp\left[-\frac{(x - \sigma_{ij}^k)^2}{D_{ijij}^k}\right] dx; \quad (13)$$

$$\Omega_{ijmn}^k = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot D_{ijmn}^k} \cdot$$

$$\int_{\sigma_{ij}^{B-}}^{\sigma_{ij}^{B+}} \int_{\sigma_{mn}^{B-}}^{\sigma_{mn}^{B+}} \exp\left[-\frac{(x - \sigma_{ij}^k)(y - \sigma_{mn}^k)}{D_{ijmn}^k}\right] dx dy; \quad (14)$$

$$F^k(\tau) = \sum_{i=1}^M F_{1i}^k \cdot \exp[F_{2i}^k \cdot (\tau_i^k - \tau)], \quad (15)$$

где  $\sigma_{ij}^{B-(k)}$ ,  $\sigma_{ij}^{B+(k)}$  - компоненты пределов прочности компонентов композита с номером  $k$  на растяжение и сжатие соответственно;  $F_{1i}^k$ ,  $F_{2i}^k$  - экспериментальные константы;  $M$  - количество характеристических вре-

менных точек, при которых изменяется характер зависимости упругих свойств компонентов композита в процессе износа;  $\tau_i^k$  - характерные отрезки времени, на которых изменяются упругие характеристики компонентов композита с номером  $k$  в процессе износа.

Средние значения случайных функций  $\varphi^k$  в уравнении (1) можно представить в виде зависимости:

$$\langle \varphi^k \rangle = \int_0^\tau \sum_{i=1}^M \varphi_{1i}^k \cdot \exp[\varphi_{2i}^k \cdot (\tau_i^k - \tau)] d\tau, \quad (16)$$

где  $\tau_i^k$  - характеристические отрезки времени, на которых изменяются коэффициенты линейного термического расширения компонентов композита с номером  $k$ ;  $\varphi_{1i}^k$ ,  $\varphi_{2i}^k$  - экспериментальные константы;  $M$  - количество точек, при которых характеристически изменяется поведение коэффициентов линейного термического расширения компонентов композита.

В качестве примера рассмотрены пористые материалы на основе прессованного графита с защитно-упрочняющими покрытиями - карбида кремния (SiC), диборида титана (TiB<sub>2</sub>) и меди. Нанесение покрытий осуществляли электролизом соответствующих ионных расплавов при плотности тока в пределах 0,1...1,1 А/см<sup>2</sup>.

Испытания на износ производили в условиях сухого трения на машине трения СМТ-1 по схеме «диск-колодка». Диск диаметром 50 мм изготавливали из серого чугуна. Колодку размерами 11 x 16 x 10 мм<sup>3</sup>, притертую по радиусу 25 мм выполняли из исследуемых композитов. Изменение массы образцов определяли на аналитических весах с точностью 0,0001 г.

Результаты экспериментов по изучению массового износа графитовых материалов с защитно-упрочняющими покрытиями, полученными при различных параметрах электролиза, представлены на рис. 2. Установлено, что плотность тока электролиза оказывает существенное влияние на массовый износ. Так, при величине плотности тока до 0,60 А/см<sup>2</sup> износ снижается более чем в пять раз, вплоть до 6,2·10<sup>-9</sup> г/(м·мм<sup>2</sup>). Далее в интервале плотности тока 0,60...0,70 А/см<sup>2</sup> интенсивность массового износа устанавливается и поддерживается минимальной.

Наиболее стойким к износу является покрытие на основе SiC-C, что вполне согласуется с данными металлографического анализа. На графите формируется наиболее плотная структура, состоящая из диффузионного интерметаллидного слоя глубиной 450 мкм. Наличие интерметаллидной фазы оказывает влияние на стойкость против износа. Несколько ниже показатели для покрытия на основе диборида титана. Минимальный массовый износ составляет 6,7·10<sup>-9</sup> г/(м·мм<sup>2</sup>), что в отличие от предыдущего покрытия, можно объяснить незначительной концентрацией материала-покрытия в недостаточном протяженном диффузионном слое (до 150 мкм). Мелкое покрытие на графите характеризуется минимальным износом [(8,1·10<sup>-9</sup> г/(м·мм<sup>2</sup>)] при плотности тока 0,8 А/см<sup>2</sup>. По всей видимости, структурные изменения поверхностного слоя графита оказывают влияние на прочностные показатели. Увеличение плотности тока приводит к накоплению электролитической меди на поверхности графита, что непосредственно снижает стойкость к истиранию.

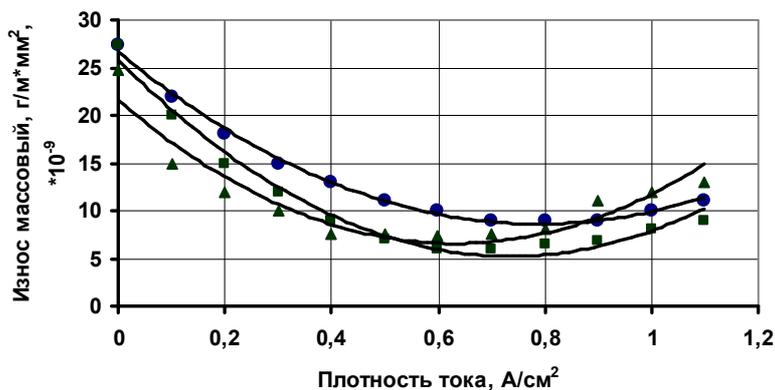


Рис. 1. Влияние плотности тока на массовый износ графита с защитно-упрочняющими покрытиями:  
 ● - медное покрытие ( $y = 26,587 - 45,603 x + 28,921 x^2$ )·10<sup>-9</sup> R<sup>2</sup> = 0,9951;  
 ■ - покрытие на основе карбида кремния ( $y = 25,804 - 55,889 x + 37,947 x^2$ )·10<sup>-9</sup> R<sup>2</sup> = 0,9824;  
 ▲ - покрытие на основе диборида титана ( $y = 21,531 - 47,507 x + 37,702 x^2$ )·10<sup>-9</sup> R<sup>2</sup> = 0,9010

#### Выводы

Разработана математическая модель процесса прогнозирования износа в условиях сухого трения многокомпонентных композитных покрытий на пористых материалах с защитно-упрочняющими покрытиями. Установлено взаимовлияние параметров электролиза, структуры, фазового состава покрытия, глубины диффузионного внедрения и интенсивности массового износа для пористых материалов. Путем обработки экспериментальных и теоретических данных показано, что интенсивность массового износа зависит от качественных характеристик поверхностного слоя, а минимальные показатели износа приходятся на оптимальные параметры электролиза. Определено, что наиболее стойким к истиранию покрытием является SiC, которое при толщине диффузионного внедрения 450 мкм обеспечивает износ не более  $5,1 \cdot 10^{-9}$  г/(м·мм<sup>2</sup>).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Скачков В. А. Метод прогнозирования коэффициентов трения многокомпонентных композитных материалов / В. А. Скачков // Металлургия (Труды ЗГИА). – Запорожье: ЗГИА, 2001. – Вып. 4. – С. 78-81.
2. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
3. Шпеньков Г. П. Физикохимия трения / Г. П. Шпеньков. – Минск: Машиностроение, 1991. – 396 с.
4. Ковшов А. Г. Физическая модель разрушения поверхностей трения / А. Г. Ковшов // Актуальные проблемы трибологии (Сборник трудов международной научно-технической конференции. – М.: Машиностроение, 2007. – Т. 2. – С. 206-213.
5. Волков С. Д. Статистическая механика композитных материалов / С. Д. Волков, В. П. Ставров. – Минск: БГУ, 1978. – 204 с.

пост. 21.09.09