

УДК 621.793.7

Е. К. ФЕНЬ, В. Н. ПАЩЕНКО

Национальный технический университет Украины «КПИ»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЙ ИЗНОСА ПОКРЫТИЙ ПРИ ФРЕТТИНГЕ, ПОЛУЧЕННЫХ ДЕТОНАЦИОННЫМ И СВЕРХЗВУКОВЫМ ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДАМИ

Представлены научные разработки математической модели процессов износа при фреттинге износ- и жаростойких покрытий с разным химическим составом и их процентным соотношением между собой в них компонентов, полученных детонационным и сверхзвуковым плазменным напылением.

Ключевые слова: *математическая модель, износ при фреттинге, газотермические покрытия.*

Вступление. Развитие современной техники характеризуется постоянным ростом разного рода нагрузок в поверхностных слоях деталей и конструкций изделий. Особенно это касается изделий, которые работают в экстремально-тяжёлых условиях, например, деталей авиационной техники. На поверхности указанных объектов действуют высокие температуры, агрессивная внешняя среда, знакопеременные нагрузки и т.п. Решение проблемы повышения стойкости поверхностей деталей и конструкций к различным внешним и внутренним факторам лежит в плоскости нанесения специальных покрытий из материалов, которые имеют повышенные физико-механические свойства.

Хорошие результаты для получения повышенных физико-механических свойств покрытий показывают такие методы газотермического напыления как детонационный и сверхзвуковой плазменный. Однако нанесение вышеуказанных покрытий является достаточно затратным процессом, который требует применения сложного и дорогого оборудования, дорогих дефицитных материалов, высококвалифицированного персонала.

Цель работы и постановка задачи. Целью данной работы является создание системы критериальных уравнений (математических моделей), которые бы связывали износ покрытий при фреттинге, полученных из композиционных материалов, с условиями их формирования в процессе детонационного и сверхзвукового плазменного напыления.

Многолетние работы по созданию износ- и жаростойких газотермических покрытий для деталей и конструкций авиационной техники, изучение их физико-механических свойств после напыления, позволили предложить такого типа критериальные уравнения, которые дают возможность предварительно определить свойства получаемых покрытий, что поможет существенно упростить процесс разработки и отработки технологий их напыления.

Задача данной работы состоит в создании таких математических моделей уравнений, которые заранее могут определить износ покрытий при фреттинге.

Математическое моделирование. Рассмотрим более подробно процесс математического моделирования процессов износа газотермических покрытий при фреттинге, так как уравнения получения основных физико-механических свойств покрытий подробно рассмотрены нами в работе [1].

Износ покрытий при фреттинге. Как основ исследования процессов износа при фреттинге материалов покрытий была взята модель, разработанная Н. Л. Голего и его сотрудниками в КИИГА [2]. Для газотермических покрытий необходимо было доработать данную модель, так как она была рассчитана на компактный материал, а не на материал, состоящий из различных компонентов, с различной плотностью, К.Т.Р., удельным весом и температурой плавления. Все размерности физико-механических свойств материалов, химического состава покрытий приняты согласно Международной системе единиц СИ.

Необратимые процессы, происходящие при износе покрытий при фреттинге, можно описать уравнением

$$T = d_i S / d\tau = \psi_k = \sum_1^n dW_D / d\tau + I_x V_x,$$

где T – температура; S – площадь поверхности; $d_i S / d\tau = d_i S / S_k \cdot d\tau$ – скорость изменения энтропии системы; $dW_D / d\tau = dW_D / S_k \cdot d\tau$ – скорость рассеянной энергии для процесса; S_k – площадь поверхности контакта; $I_x V_x$ – мощность химической реакции; $V_x = -\sum_1^n \psi_k \nu_k$ – скорость химической реакции; ψ_k – химический потенциал; ν_k – стехиометрический коэффициент n -компонентов реакции.

Учитывая прочностные характеристики, химический потенциал (ψ_k) дислокаций и химическое сродство процесса их образования уравнение можно представить в виде

$$\psi_D = P / \sum(n_D + \sigma)$$

или

$$A_D = \Delta\psi_D = \Delta P / \sum(n_D + \sigma),$$

где ψ_D – химический потенциал работы дислокаций; P – напряжения в материале покрытия; n_D – число дислокаций приходящихся на единицу деформации материала; σ – напряжение разрушения атомных связей в кристаллической решётке, которое можно выразить уравнением

$$\sigma = (2QE_n/r)^{1/2},$$

где Q – энергия кристаллической решётки; r – межатомное расстояние; E_n – модуль упругости компонентов входящих в материал; A_D – химическое сродство реакции образования и перемещения дислокаций в материале; $\Delta\psi_D$ – разница химических потенциалов дислокаций для двух напряжённых состояний материала; ΔP – упрочнение материала в процессе его пластической деформации.

Диссипативная функция описывается уравнением

$$\psi_D = dW/d\tau = dD/d\tau \cdot A_D = V_D A_D,$$

где dW – работа пластической деформации; dD – изменение числа дислокаций; $d\tau$ – время упрочнения; $V_D = dD/d\tau$ – скорость образования дислокаций.

Процесс разрушения поверхностных слоёв, с учётом химической реакции, можно описать уравнением

$$\sum Q dS = Q_m dS_m + Q_o dS_o = Q_x dS_x - Q_D dS_D,$$

где Q_m и dS_m – удельная поверхностная энергия и изменение площади неокисленного материала; Q_o и dS_o – удельная поверхностная энергия и изменение площади оксидов в процессе износа; Q_x и dS_x – удельная поверхностная энергия и изменение площади химических соединений в процессе износа; Q_D и dS_D – удельная поверхностная энергия и изменение площади поверхности дислокационных границ.

Диссипативную функцию можно выразить уравнением

$$\begin{aligned} \psi_D &= dS_o/d\tau(-\Delta\sigma_o) + dS_m/d\tau(-\Delta\sigma_m) + dS_x/d\tau(-\Delta\sigma_x) - dS_D/d\tau(-\Delta\sigma_D) = \\ &= V_{so}(-\Delta\sigma_o) + V_{sm}(-\Delta\sigma_m) + V_{sx}(-\Delta\sigma_{sx}) - V_{sD}(-\Delta\sigma_{sD}), \end{aligned} \quad (1)$$

где V_{so} , V_{sm} , V_{sx} – скорости изменения свободных поверхностей оксидов, материала и химических соединений материала в процессе износа, тогда

$$\psi_D = V_D A_D + V_c A_c + V_{os} A_{so} (-\Delta\sigma_o) + V_{sm} (-\Delta\sigma_m) + V_{sx} (-\Delta\sigma_x)$$

или $\psi_D = V_D \cdot \Delta P / \Sigma(n + \sigma) + V_c A_c + V_{so} (-\Delta\sigma_s) + V_{sm} (-\Delta\sigma_m) + V_{sx} (-\Delta\sigma_x)$.

Исходя из этого, создаётся система уравнений, где поток массы окисленных и неокисленных продуктов износа выглядит как

$$V = V_o + V_m + V_x,$$

$$V_o = v_o (K_1 \Delta P / n + K_2 A_o - K_3 \Delta\sigma_o - K_4 \Delta\sigma_m - K_5 \Delta\sigma_x), \quad (2)$$

где v_o – стехиометрический коэффициент оксида в уравнении химической реакции;

$$V_{sm} = d(\pi d^2 \cdot 6d\rho_m / 6d\rho_m) / S_x d\tau = 6/d\rho_m V_m = K_{12} V_m,$$

где K_{12} – коэффициент плотности материала; d – размер частиц износа; ρ_m – удельная плотность материала;

$$V_m = [-\psi + K_1 (\Delta P / n)^2 + (2K_2 A_c - 2K_3 \Delta\sigma_o - K_4 \Delta\sigma_m - K_5 \Delta\sigma_x) \cdot \Delta P / n] / K_{12} \Delta\sigma_m + [K_6 A_c^2 + K_7 \Delta\sigma_o^2 - 2K_8 \Delta\sigma_o A_c - K_9 \Delta\sigma_m A_c - K_{10} \Delta\sigma_x A_c + K_{11} \Delta\sigma_o \Delta\sigma_m \Delta\sigma_x] / K_{12} \Delta\sigma_m, \quad (3)$$

$$V_{sx} = \Sigma_1^n n(\pi d^2) / S_x \cdot d\tau = \Sigma_3^i n(\pi d^2) V / (\pi d^2 / 4) d\tau = \Sigma_1^n n 4 V_x / d\tau = K_{13} V_x, \quad (4)$$

где n – число частиц прореагировавшего химического соединения; $K_1 - K_{14} = const$.

Вся внешняя энергия, подведенная к системе, выражается уравнением

$$Q = 2P_n A \varphi N,$$

где P_n – удельная нагрузка; A – амплитуда скольжения; φ – коэффициент трения скольжения; N – количество циклов испытаний.

Рассеянная энергия равна $\Delta W_p = 2KP_n A \varphi N$,

а рассеянная мощность (диссипативная функция) выражается уравнением

$$W = 2KP_n A \varphi f, \quad (5)$$

где f – частота колебаний; K постоянная, характеризующая долю рассеянной энергии при износе покрытий при фреттинге.

Исходя из уравнений (2–5) получаем величину приведенной скорости износа

$$V = V_o + V_m + V_x = C_1 P A f + C_2 + C_3 \Delta P + C_4 (\Delta P)^2 + C_5 (\Delta P)^3,$$

где $C_1 = 2K\varphi / K_{12} \Delta\sigma_m$, $C_3 = v_o K_2 K_{12} \Delta\sigma + 2K_3 A_c - 2K_4 \Delta\sigma_o - K_5 \Delta\sigma_m - K_6 \Delta\sigma_x / K_{12} \Delta\sigma_m n$,

$$C_2 = [v_o K_{12} \Delta\sigma_m (K_6 A_c - K_7 \Delta\sigma_o - K_8 \Delta\sigma_m - K_9 \Delta\sigma_x) + K_6 A_c^2 / K_{12} \Delta\sigma_m] + K_7 \Delta\sigma_o^2 - 2K_8 \Delta\sigma_o A_c - K_9 \Delta\sigma_m A_c - K_{10} \Delta\sigma_x A_c + K_{11} \Delta\sigma_o \Delta\sigma_m \Delta\sigma_x,$$

$$C_4 = K_1 / K_{12} \Delta\sigma_m n^2, \quad C_5 = K_2 / K_{13} \Delta\sigma_x n^3.$$

Если предположить, что при усталостных процессах величина упрочнения ΔP и действующие в материале напряжения P_{max} связаны линейной зависимостью $\Delta P = K_n P_{max}$, где K_n – коэффициент пропорциональности, то, исходя из средства химической реакции, получаем уравнение с добавлением самой химической реакции

$$A_c = -\Sigma_1^n v_k \chi_k = v_m \chi_m + v_x \chi_x + v_{гс} \chi_{гс} - v_o \chi_o,$$

где $v_{гс}$ – стехиометрический коэффициент газовой среды; $\chi_{гс}$ – стехиометрический потенциал газовой среды.

Величина химического потенциала газового компонента в реакции $\chi_{гс}$ зависит от его парциального давления. Поэтому

$$\chi_{гс} = \chi_{гс}^o + RT \cdot \ln P_2 / P_2^o,$$

где $\chi_{гс}^o$ – химический потенциал компонента в его стандартном состоянии; P_2^o – постоянное давление пара; P_2 – парциальное давление в газе его активного компонента.

Известно, что при износе покрытий при фреттинге интенсивно развиваются механико-химические процессы. Парциальное давление кислорода в воздухе меньше, чем чистого кислорода. Анализ уравнения (1) и феноменологических

уравнений приводит к созданию уравнений (вследствие наложения химических реакций, пластической деформации, свободной поверхности от оксидов, что влечёт за собой изменение интенсивности основных процессов), где при $\Delta\sigma_i = 0$, получаем:

$$V_d = (K_1K_6 - K_{22}/K_6) \cdot \Delta P/n + K_2/K_6 \cdot V_o, \quad (6)$$

$$V_c = (K_1K_6 - K_{22}/K_1)A_c + K_2/K_1 \cdot V_d, \quad (7)$$

где K_2/K_6 – приращение потока дислокаций на единицу скорости химической реакции; K_2/K_1 – скорость химической реакции вызванная единичным потоком дислокаций.

Уравнения (6) и (7) описывают химико-механические и механико-химические эффекты при износе. Но при износе покрытий при фреттинге присутствуют обратные эффекты. Поэтому, при $A_c = 0$, уравнения (6) и (7) приобретают вид:

$$V_d = (K_1K_{14} - K_2^2/K_{14}) \cdot \Delta P/n + K_5/K_{14}V_{sm} + K_6/K_{14}V_{sx},$$

$$V_{sx} = (K_1K_{14} - K_6^2/K_{11})\Delta\sigma_x + K_5/K_{11} \cdot V_d,$$

где $V_{sm} = (K_1K_{14} - K_5^2/K_1)\Delta\sigma_m + K_5/K_1 \cdot V_d$; K_5/K_1 – плотность потока свободной поверхности, вызванных единичным потоком дислокаций; K_5/K_{14} – плотность потока дислокаций, вызванных единичным потоком свободных поверхностей.

Исходя из условий установления равновесной концентрации необходимо, чтобы в материале происходило скалывание частиц при трении и их уход с дислокациями, а также, чтобы в материале образовалось столько же новых дислокаций, сколько и ушло. Это приведёт к появлению дополнительного потока свободной поверхности. Так как увеличение потока свободных поверхностей является следствием уменьшения работы идущей на их образование $\Delta\sigma = \sigma - \sigma_d/2$, вследствие увеличения при деформации числа дислокаций на границе раздела блоков, то это ведёт к возрастанию удельной энергии (σ_d). Исходя из ранее изложенных уравнений и при $\Delta P = 0$, получаем уравнения:

$$V_c = (K_6K_{14} - K_9^2/K_{14})A_c + K_9/K_{14} \cdot V_{sm},$$

$$V_{sm} = (K_6K_{14} - K_9^2/K_6)\Delta\sigma_m + K_9/K_6 \cdot V_c,$$

$$V_{sx} = (K_1K_{14} - K_6^2/K_6)\Delta\sigma_x + K_9/K_7 \cdot V_c \Gamma,$$

где K_9/K_{14} – приращение скорости химической реакции, вызванных единичным потоком свободных поверхностей; K_9/K_6 – приращение потока дислокаций, вызванных химической реакцией; K_9/K_7 – поток свободной поверхности на единицу скорости химической реакции.

Причину возрастания скорости химической реакции можно объяснить увеличением изобарно-изотермического потенциала системы при образовании новых свободных поверхностей и нарушений кристаллической структуры материала; повышением свободной энергии, способствующей образованию новых химических соединений; ростом химической активности материала, что согласуется в общем виде. В рассматриваемых условиях участвуют в данном процессе не только металлы, но и различные химические соединения. Только таким образом можно объяснить наблюдаемое в процессе износа при фреттинге интенсивное разрушение поверхности покрытия в начальный период износа.

Расхождение между экспериментальными величинами износа при фреттинге покрытия после напыления и значениями, полученными при расчетах с помощью математической модели, составляет $\pm 6-9\%$.

Выводы. Расчеты показали адекватность разработанных моделей результатам эксперимента. Математические модели уравнений и экспериментальные

данні износа покриттів при фреттингу відрізняються між собою в діапазоні $\pm 6-9\%$. Це свідчить про правильний вибір методу розробки достатньо складної даної математичної моделі.

Список литературы

1. Фень Е.К. Критериальное обобщение физико-механических свойств газотермических покрытий, полученных высокоскоростными методами / Е.К. Фень, В.Н. Пашенко // Проблемы тертя та зношування: наук.-тех.зб.– К.: НАУ. – 2013. – № 59. – С. 104–111.

2. Голего Н.Л. Фреттинг-коррозия металлов // Н.Л. Голего, А.Я. Алябьев, В.В. Шевеля. – К.: Техніка, 1974. – 270 с.

Стаття надійшла до редакції 03.06.2013

Є. К. ФЕНЬ, В. М. ПАЩЕНКО

МАТЕМАТИЧНЕ МОДУЛЮВАННЯ РІВНЯННЯ ЗНОСУ ПОКРИТТІВ ПРИ ФРЕТІНГУ, ОТРИМАНИХ ДЕТОНАЦІЙНИМ ТА НАДЗВУКОВИМ ПЛАЗМОВИМ МЕТОДАМИ

Представлені наукові розробки математичної моделі процесів зношування при фретінгу зносо- та жаростійких покриттів з різним хімічним складом та їх відсотковим співвідношенням між собою в них компонентів, отриманих детонаційним та надзвуковим плазмовим напиленням.

Ключові слова: математична модель, знос при фретінгу, газотермічні покриття.

E. K. FEN, V. M. PASHCHENKO

MATHEMATICAL MODELLING OF EQUATION OF COATINGS WEAR BY FRETTING, RECEIVED BY D-GUN AND SUPERSONIC PLASMA JET METHODS

In this work it is represented the scientific workouts of mathematical models wear of coatings by fretting which was received by D-gun and supersonic plasma jet methods for wear- and heat resistance materials of coatings with different properties chemical composition and their percent contents at these components. This mathematical models and the experimental facts different each other at limit $\pm 6-9\%$. This work is evidence for correctly chosen methods of workouts of mathematical models for defining wear and tear of coatings by fretting of gasothermic coatings.

Key words: mathematical models, wear and tear of coatings by fretting, gasothermic coatings.

Фень Евгений Константинович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораториями кафедры инженерия поверхности НТУУ КПИ.

Пашенко Валерий Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры инженерия поверхности НТУУ КПИ.