

В. Н. ЛОЗОВСКИЙ, Л. И. БЕРШАДСКИЙ, В. П. СОЛОВЬЕВ

ЭФФЕКТ СХВАТЫВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

(Представлено академиком А. Ю. Ишлинским 13 XII 1971)

В обычных условиях среды схватывание металлов при граничном трении возникает при некоторых критических значениях нагрузки P или скорости скольжения v (¹⁻⁴). На этом основаны все существующие методы испытания металлов и смазок, однако нами установлено (^{5, 6}), что при работе ряда ответственных сопряжений схватывание может возникать при контактных давлениях и скоростях скольжения, намного ниже критических, что является причиной непредвиденного отказа или аварии.

Нами выявлено, что этот эффект возникновения схватывания при невысоких уровнях нагрузки и скорости скольжения обусловлен динамическим (переменным) характером нагружения. При этом возможность схватывания и момент его возникновения определяются амплитудно-частотным спектром нагружения. При постоянных нагрузке и скорости скольжения ($P = \text{const}$, $v = \text{const}$) условием отсутствия схватывания является динамическое равновесие процессов разрушения и образования защитных пленок, в том числе вторичных структур (¹).

При критических значениях P или v равновесная площадь пленок минимальна и возрастает вероятность встречи ювенильных участков сопряженных поверхностей, определяющая возникновение схватывания. В основе динамического равновесия разрушения и образования пленки лежит механизм саморегулирования этих процессов (⁷). Предложенная в работе (⁷) модель саморегулирования является статической, т. е. описывает только установившиеся режимы трения металлов ($P = \text{const}$, $v = \text{const}$) и не позволяет выявить рассматриваемого эффекта.

Эффект возникновения схватывания при малых уровнях P и v выявлен при исследовании поведения рассматриваемой физической системы при переменном нагружении. Модель этой системы показана на рис. 1.

Приняты следующие обозначения: $q(t)$ — параметр нагружения, определяемый значениями нормального давления на контакте P и скорости скольжения v ; S_{ϕ} — площадь фактического контакта (практически не изменяющаяся до возникновения схватывания); $S_{пл}$ — площадь поверхности контакта, покрытая защитными пленками; $S_{ю}$ — площадь ювенильных участков, образующихся на поверхности контакта при разрушении и уносе пленок; w_p — скорость разрушения пленок — уменьшения их площади в единицу времени; w_{ϕ} — скорость образования пленок — увеличения площади, покрытой защитными пленками (образующимися в результате деформирования и окисления ювенильных участков металла и адсорбции смазки); f_1 , f_2 — функции, выражающие зависимости скорости образова-

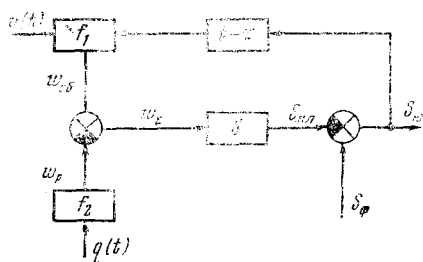


Рис. 1

ния и разрушения пленок от соответствующих параметров; τ — время между моментами разрушения и уноса пленки (появлением ювенильного участка) и образования пленки на этом участке: τ определяется главным образом проникающей способностью среды и скоростью физико-химического взаимодействия среды и ювенильной поверхности металла; причем проникающая способность, как правило, является фактором, контролирующим кинетику взаимодействия. Значения τ имеют порядок величины проникающей способности смазок (при граничном трении) или газовой среды (при трении без смазки).

Рассматриваемой модели соответствуют следующие соотношения:

$$dS_{\text{пл}}/dt = w_{\text{ос}}(t) - w_p(t) = w_e(t), \quad (1)$$

$$w_{\text{ос}}(t) = f_1[v(t), S_{\text{ж}}(t - \tau)], \quad w_p(t) = f_2[q(t)], \quad (2)$$

$$S_{\text{ю}}(t) = S_{\Phi} - S_{\text{пл}}(t). \quad (3)$$

Скорость образования пленок пропорциональна скорости скольжения и площади, на которой возможно образование пленок (ювенильной поверхности), и может быть записана в виде

$$w_{\text{ос}}(t) = Kv(t)S_{\text{ю}}(t - \tau), \quad (4)$$

где K — некоторый коэффициент.

Учитывая независимость механических воздействий P и v , выражение для скорости разрушения пленок в функции от q может быть записано в виде

$$w_p[q(t)] = a_1 v(t) + a_2 p(t), \quad (4')$$

где a_1 и a_2 — некоторые коэффициенты.

Таким образом, кинетика разрушения и образования защитных пленок описывается дифференциальным уравнением

$$dS_{\text{пл}}/dt + kv(t)S_{\text{пл}}(t - \tau) = v(t)(kS_{\Phi} - a_1) - a_2 p(t). \quad (5)$$

Выражение (5) представляет собой линейное дифференциальное уравнение с запаздывающим аргументом, которое может быть записано в общем виде

$$dS_{\text{пл}}/dt + R(t)S_{\text{пл}}(t - \tau) = Q(t), \quad (6)$$

где

$$R(t) = kv(t); \quad Q(t) = v(t)(kS_{\Phi} - a_1) - a_2 p(t). \quad (7)$$

Решение этого уравнения без учета запаздывания имеет вид

$$S_{\text{пл}} = \left[\int Q(t) \exp\left(\int R(t) dt\right) \cdot dt + C \right] \exp\left(-\int R(t) dt\right). \quad (8)$$

Рассмотрим кинетику образования и разрушения защитных пленок при переменном нагружении. В качестве примера выберем случай, имеющий наибольшее практическое значение, т. е. когда $P = \text{const}$, $\tau = \text{const}$, $v(t) = v_A \sin \omega t$ (v_A — амплитудное значение скорости, ω — круговая частота). Необходимо выделить два различных этапа поведения рассматриваемой физической системы: 1) $0 < t \leq \tau$, 2) $t > \tau$.

1. Для первого этапа уравнение (5) примет вид

$$dS_{\text{пл}}/dt = (kS_{\text{ю}}^0 - a_1)v_A |\sin \omega t| - a_2 p. \quad (9)$$

где $S_{\text{ю}}^0 = S_{\text{ю}}(0)$, а знак абсолютной величины отражает равноценность направлений относительного перемещения контактирующих тел с точки зрения процессов разрушения и образования пленок.

Решение уравнения (9) имеет вид

$$S_{\text{пл}} = C - (kS_{\text{ю}}^0 - a_1)v_A \int |\sin \omega t| dt - a_2 p \int dt = \\ = C - (kS_{\text{ю}}^0 - a_1) \frac{v_A}{\omega} [|\cos \omega t| - A(\omega t)] - a_2 p t, \quad (10)$$

где

$$A(\omega t) = \begin{cases} 2(\cos \omega t), & \frac{n\pi}{\omega} < t < \frac{2n+1}{2} \frac{\pi}{\omega}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \\ 0 & \text{для остальных } t \end{cases} \quad (11)$$

$$C = S_{\text{пл}}^0 = (kS_{\text{ю}}^0 - a_1)v_A/\omega, \quad S_{\text{пл}}^0 = S_{\Phi} - S_{\text{ю}}^0. \quad (12)$$

Таким образом, изменение площади пленок при $0 < t \leq \tau$ выражается зависимостью

$$S_{\text{пл}} = S_{\text{пл}}^0 + \frac{v_A}{\omega} (kS_{\text{ю}}^0 - a_1) [1 - (|\cos \omega t| - A(\omega t))] - a_2 p t, \quad (13)$$

где

$$[1 - (|\cos \omega t| - A(\omega t))] \geq 0. \quad (13')$$

Выражение (13) показывает, что на этапе $0 < t \leq \tau$ происходит убывание $S_{\text{пл}}$, причем скорость убывания зависит от давления на контакте. Убывание имеет колебательный характер с частотой, соответствующей частоте изменения скорости скольжения. При этом критическая величина площади пленок, при которой возможно возникновение схватывания, быстрее достигается с уменьшением частоты и увеличением амплитуды. Однако это справедливо только для значений v_A ниже некоторого критического значения, зависящего от соотношения протяженности контакта в направлении движения и амплитуды перемещения (⁵, ⁶).

Схватывание на этом этапе может возникнуть при некотором соотношении коэффициентов k , a_1 , a_2 и давления на контакте, характеризующих прочностные свойства защитных пленок и интенсивность их образования. Наиболее благоприятным условием схватывания является плохая проникающая способность среды, когда τ велико.

2. Второй этап, когда $t > \tau$, представляет наибольший интерес; в этом случае уравнение (5) имеет вид

$$dS_{\text{пл}}/dt + kv_A |\sin \omega t| S_{\text{пл}}(t - \tau) = (kS_{\Phi} - a_1)v_A |\sin \omega t| - a_2 p. \quad (14)$$

Пусть

$$\tau = 2\pi m / \omega, \quad m = 1, 2, 3 \dots \quad (15)$$

Тогда, производя замену $t^* = t - \tau$, получим решение (14) в виде

$$S_{\text{пл}} = S_{\Phi} - \frac{a_1}{k} - a_2 p e^M \int e^{-M} dt + e^M C, \quad M = \frac{kv_A}{\omega} [|\cos \omega t^*| - A(\omega t^*)], \quad (16)$$

где C — постоянная интегрирования.

Разобьем интеграл $J = \int e^{-M} dt^*$ на две части:

$$J = J_1 + J_2 = \int B dt^* + \int D'(\omega t^*) dt^*, \quad (17)$$

B — постоянная составляющая, $D'(\omega t^*)$ — переменная составляющая.

Тогда выражение (16) примет вид

$$S_{\text{пл}} = S_{\Phi} - a_1/k - (a_2 B p t^* + a_2 p D'(\omega t^*) - C) e^M. \quad (18)$$

Анализ выражения (18) показывает, что 1) схватывание при динамическом нагружении принципиально возможно при любых уровнях P , $v > 0$ (для частоты изменения скорости $\omega > 2\pi/\tau$). Однако в реальных условиях необходимо учитывать ограничение $P > P_c$, где P_c — минимальное давление, при котором обеспечивается фактический контакт на площади, соответствующей критическому значению ее протяженности в направлении относительных перемещений, зависящему от величины амплитуды перемещений (6); 2) время до возникновения схватывания зависит главным образом от констант скорости разрушения и образования защитных пленок.

Особого рассмотрения заслуживает случай, когда колебание скорости происходит относительно некоторого постоянного значения v_0 . При наличии постоянной составляющей скорости поведение физической системы будет описываться уравнением

$$dS_{пл}/dt + k(v_0 + v_A |\sin \omega t^*|) S_{пл}(t^*) = (kS_\Phi - a_1)[v_0 + v_A |\sin \omega t^*|] - a_2 p; \quad (19)$$

решение уравнения (19) имеет вид

$$S_{пл} = S_\Phi - \frac{a_1}{k} - \left(a_2 p \int e^N dt^* - C \right) e^{-N},$$

$$N = kv_0 t^* - \frac{kv_A}{\omega} [|\cos \omega t^*| - A(\omega t^*)]. \quad (20)$$

Устремляя $\omega \rightarrow \infty$, получим

$$S_{пл} = S_\Phi - \frac{1}{k} \left(a_1 + \frac{a_2 p}{v_0} \right) + C \exp(-kv_0 t^*). \quad (21)$$

Из выражения (21) следует, что с увеличением времени схватывание в принципе невозможно, так как при наличии v_0 не происходит возрастания ювенильных участков.

При $\omega \rightarrow \infty$ имеет место периодическое изменение площади пленок, но возрастание ювенильных участков не происходит. Это позволяет использовать введение постоянной составляющей v_0 как одно из эффективных средств борьбы со схватыванием при динамическом нагружении.

Поступило
9 XII 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ И. В. Крагельский, Трение и износ, М., 1968. ² Г. В. Виноградов, Сборн. Теория смазочного действия и новые материалы, «Наука», 1965. ³ Б. И. Костецкий, Сопротивление изнашиванию деталей машин, 1959. ⁴ Ф. П. Боуден, Д. Тейбор, Трение и смазка твердых тел, М., 1968. ⁵ В. Н. Лозовский, Сборн. О природе схватывания твердых тел, «Наука», 1968. ⁶ В. Н. Лозовский, Надежность и долговечность золотниковых и плунжерных пар, М., 1971. ⁷ Б. И. Костецкий, Л. И. Бершадский, Е. Н. Чукреев, ДАН, 191, № 6 (1970).