

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЮ СИЛОВЫХ СИСТЕМ ПО КРИТЕРИЯМ ТРИБОФАТИКИ

*Белорусский государственный университет транспорта
(Гомель, Беларусь)*

Исследования, проведенные в последнее время, показывают, что значения характеристик сопротивления разрушению деталей – элементов силовых систем (СС), – подвергающихся в эксплуатации совместному воздействию повторно-переменных нагрузок и процессов трения, могут существенно отличаться от значений аналогичных характеристик деталей, работающих только на усталость или только на трение и изнашивание [1 – 5 и др.]. Поэтому на смену традиционным методам расчета элементов СС по отдельным критериям сопротивления усталости и износостойкости должны прийти комплексные методы их расчета по критериям износоусталостных повреждений (ИУП), разрабатываемые в рамках трибофатики [1, 2, 6].

Сегодня, по-видимому, вне конкуренции остаются два развиваемых комплексных подхода. Рассмотрим их сущность и применение в условиях фрикционно-механической усталости.

В основу первого подхода [1, 2, 7] положены теория прочности наиболее слабого звена в ее современной трактовке применительно к явлению усталости и концепция об опасном объеме деформируемого твердого тела. Если циклические (объемные) напряжения в элементе СС, обусловленные повторно-переменными нагрузками, равны σ , а фрикционные напряжения (удельная сила трения) равны $\tau_w = f_c \cdot q_m$, где f_c – коэффициенты трения при скольжении; q_m – среднее (нормальное) давление на площадке контакта, то основное уравнение теории прочности наиболее слабого звена с учетом опасных областей деформируемого элемента СС записывается так:

$$P = \left\{ 1 - [1 - F_1(\sigma)]^{n_1 V_\sigma} \cdot [1 - F_2(\tau_w)]^{n_2 S_q} \right\} \cdot a_p, \quad (1)$$

где P – вероятность отказа системы; V_σ , S_q – опасные области соответственно объемного и поверхностного деформирования элемента СС; n_1 , n_2 – количество опасных дефектов в единице объемов V_σ и S_q ; a_p – параметр, учитывающий статистическую взаимозависимость повреждений при механической и фрикционной усталости в множестве элементарных объемов исследуемой детали.

Поскольку $n_1 V_\sigma$ и $n_2 S_q$ – достаточно большие числа, выражение в скобках можно заменить его асимптотическим приближением:

$$P = \left\{ 1 - \exp[-c_1 n_1 V_\sigma F_1(\sigma) - c_1 n_1 S_q F_2(\tau_w)] \right\} \cdot a_p, \quad (2)$$

где под знаком экспоненты стоят две функции, первая из которых конкретизирована в работах [1, 8] и в общем случае неоднородного напряженного состояния записывается в виде:

$$\varphi(\sigma) = c_1 n_1 V_\sigma F_1(\sigma) = \frac{1}{V_0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{m_{r\sigma}} \times \iiint_{\sigma > \sigma_{Rmin}} \left(\frac{\sigma - \sigma_{Rmin}}{\sigma} \right)^{m_r} dV = c_v \frac{V_{Pr}}{V_0} \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^{m_{r\sigma}} \cdot \left(\frac{\sigma - \sigma_{Rmin}}{\sigma} \right)^{m_r} \right]$$

где V_{Pr}/V_0 – относительный опасный объем циклически деформируемого элемента;
 T_0 – температура элемента в зоне контакта в процессе ИУП и некоторая температура

его температура (например, комнатная); $m_{T\sigma}$ – параметр температурной активации усталостных повреждений; \square_{Rmin} – нижняя граница рассеяния пределов выносливости \square_R ; \square_* – параметр функции распределения пределов выносливости элемента в форме уравнения Вейбулла; m_v – параметр механической неоднородности материала исследуемого элемента; c_v – коэффициент, определяющий форму детали и способ ее нагружения.

Аналогично для второй функции, стоящей под знаком экспоненты в (2), имеем:

$$\varphi(\tau_w) = c_2 n_2 S_q F_2(\tau_w) = \frac{1}{S_0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{m_{T\tau}} \times \iiint_{\tau_w > \tau_{fmin}} \left(\frac{\tau_w - \tau_{fmin}}{\tau_{w*}} \right)^{m_s} dS = c_s \frac{S_{py}}{S_0} \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^{m_{T\tau}} \cdot \left(\frac{\tau_w - \tau_{fmin}}{\tau_{w*}} \right)^{m_s} \right], \quad (4)$$

где S_{py}/S_0 – относительный опасный объем интенсивно деформируемого при трении элемента; $m_{T\tau}$ – параметр температурной активации процесса изнашивания; \square_{fmin} – нижняя граница рассеяния пределов фрикционной усталости \square_f ; \square_{w*} – параметр функции распределения пределов фрикционной усталости элемента в форме уравнения Вейбулла; m_s – параметр механической неоднородности поверхностного слоя исследуемого элемента; c_s – коэффициент, определяющий форму контактирующих элементов СС и схему их взаимодействия.

Из (2) путем предельного перехода [8] при $P = 0,5$ ($\square = \bar{\sigma}_{RT}$ – среднее значение предела выносливости при $\square_w = 0$ и $T > 0 = \text{const}$) получаем формулу для расчетной оценки среднего значения $\bar{\sigma}_{R\tau}$ пределов фрикционно-механической выносливости элемента СС по критерию зарождения в нем магистральной усталостной трещины при заданной температуре T в зависимости от величины \square_w фрикционного напряжения

$$\bar{\sigma}_{R\tau} = \bar{\sigma}_{RT} \cdot \left(1 - c_s \frac{S_{0,5\gamma}}{S_0} \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^{m_{T\tau}} \cdot \left(\frac{\tau_w - \tau_{fmin}}{\tau_{w*}} \right)^{m_s} \right]^{1/m_v} \right). \quad (5)$$

Формула (5) отражает влияние процесса трения скольжения на изменение сопротивления усталости элемента СС (прямой эффект [9]) – с ростом \square_w величина $\bar{\sigma}_{R\tau}$ уменьшается (при прочих равных условиях). Если же $\square_w = 0$, то $S_{0,5\gamma} = 0$ и $\bar{\sigma}_{R\tau} = \bar{\sigma}_{RT}$, как это и должно быть.

Из (2) также путем предельного перехода [8] при $P = 0,5$ ($\square_w = \bar{\tau}_{f\tau}$ – среднее значение предела фрикционной усталости при $\square = 0$ и $T > 0 = \text{const}$) можно получить формулу для расчетной оценки среднего значения $\bar{\tau}_{f\sigma}$ пределов фрикционно-механической выносливости элемента СС по критерию достижения предельного износа в СС при заданной температуре T в зависимости от величины \square циклического напряжения

$$\bar{\tau}_{f\sigma} = \bar{\tau}_{f\tau} \cdot \left(1 - c_v \frac{V_{0,5\gamma}}{V_0} \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^{m_{T\sigma}} \cdot \left(\frac{\sigma - \sigma_{Rmin}}{\sigma_*} \right)^{m_y} \right]^{1/m_s} \right), \quad (6)$$

которая отражает влияние повторно-переменных напряжений (деформаций) на изменение сопротивления изнашиванию элемента системы (обратный эффект [9]) – с ростом \square величина $\bar{\tau}_{f\sigma}$ уменьшается (при прочих равных условиях). Если же $\square = 0$, то $V_{0,5\gamma} = 0$

и $\bar{\tau}_{f\sigma} = \bar{\tau}_{f\tau}$, как и должно быть.

В трибологии в качестве характеристики сопротивления изнашиванию обычно используют интенсивность изнашивания I , которая пропорциональна величине $S_{0,5\gamma}$ [1, 7]:

$$c_s \frac{S_{0,5\gamma}}{S_0} = \frac{c_1}{I}, \quad (7)$$

где c_1 – коэффициент, определяющий схему и условия контактного взаимодействия элементов механической системы. Из (2) с учетом (7), при реализации соответствующего предельного перехода, следует формула для определения средней интенсивности изнашивания \bar{I}_σ элемента СС с учетом влияния циклических напряжений \square [1]:

$$\bar{I}_\sigma = \frac{\bar{I}}{1 - b_v \frac{V_{0,5\gamma}}{V_0} \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^{m_{T\sigma}} \cdot \left(\frac{\sigma - \sigma_{Rmin}}{\sigma} \right)^{m_v} \right]}, \quad (8)$$

где \bar{I} – средняя интенсивность изнашивания исследуемого элемента при чистом трении (т.е. при $\square = 0$); b_v – коэффициент, учитывающий схему усталостных испытаний.

Формула (8) предсказывает рост интенсивности изнашивания элемента системы с увеличением \square ; при этом когда $\square = 0$, т.е. $V_{0,5\gamma} = 0$, имеем $\bar{I}_\sigma = \bar{I}$, что и требуется.

Согласно (5), (6), (8), изменение характеристик сопротивления ИУП в количественном отношении зависит также от физико-механических свойств материала исследуемого элемента СС (\square_{Rmin} , \square_* , m_v , \square_{fmin} , \square_{w*} , m_S), схемы износоусталостных испытаний, размеров и формы элементов системы ($V_{P\gamma}/V_0$, $S_{P\gamma}/S_0$, b_v , c_v , c_s), температуры (m_T , T/T_0).

Таким образом, одно из главных достоинств рассматриваемого подхода состоит в том, что он позволяет учесть влияние на сопротивление ИУП многих (наиболее значимых) эксплуатационных, конструктивных, технологических и металлургических факторов. В то же время практическое использование этого подхода сдерживается трудностями определения значений входящих в основные формулы параметров и коэффициентов. Поэтому преодоление указанных трудностей представляется одной из задач дальнейших исследований.

Второй подход к оценке характеристик сопротивления разрушению СС базируется на энергетическом критерии предельного состояния таких систем [10, 11]:

$$U^{ef} = R_{T,M} \left[a_T T_\Sigma + R_{\sigma,\tau} (a_\sigma \sigma^2 + a_\tau \tau_w^2) \right] = U_0, \quad (9)$$

где U^{ef} – удельная эффективная, т.е. затраченная на ИУП, энергия; U_0 – удельная энергия разрыва межатомных связей (константа вещества); R – параметры, учитывающие взаимодействие эффективных частей механической энергии (R_{\square}), а также взаимодействие тепловой и механической составляющих эффективной энергии (R_{\square}); a – коэффициенты, выделяющие из полных тепловой (индекс «Т») и механической (индексы « \square » и « τ » для силовой и фрикционной составляющих) энергий их эффективные части; T_Σ – суммарная температура в зоне силового контакта элементов СС, обусловленная всеми источниками тепла, в том числе выделяемого при механическом деформировании, структурных превращениях и т.п.

Пусть изучается прямой эффект при ИУП, когда $\tau_w = \text{const}$ и $T = \text{const}$. Тогда из критерия (9) имеем следующее выражение для предела фрикционно-механической выносливости (критерий предельного состояния – образование магистральной усталостной трещины):

$$\sigma_{R\tau} = \left[\frac{(U_0 / R_{T,M} - a_T T) / R_{\sigma,\tau} - a_\tau \tau_w^2}{a_\sigma} \right]^{1/2} \quad (10)$$

Преобразуем (10), учитывая, что

$$\sigma_{RT} = \left[\frac{U_0 / R_{T,M} - a_T T}{a_\sigma} \right]^{1/2}, \quad (11)$$

$$\tau_{fT} = \left[\frac{U_0 / R_{T,M} - a_T T}{a_\tau} \right]^{1/2}, \quad (12)$$

где σ_{RT} , τ_{fT} – пределы выносливости и фрикционной усталости в условиях изотермического ($T = \text{const}$) нагружения. Тогда для $\sigma_{R\tau}$ имеем

$$\sigma_{R\tau} = \sigma_{RT} \cdot \varphi_\sigma(\tau_w), \quad (13)$$

где функция

$$\varphi_\sigma(\tau_w) = \sqrt{\frac{1}{R_{\sigma,\tau}} - \frac{\tau_w^2}{\tau_{fT}^2}}, \quad \sqrt{\frac{1}{R_{\sigma,\tau}} - \frac{\tau_w^2}{\tau_{fT}^2}} \geq 0. \quad (14)$$

Согласно (13), (14), величину $\sigma_{R\tau}$ элемента СС можно оценить расчетным путем, если известны значения его пределов выносливости σ_{RT} и фрикционной усталости τ_{fT} (при $T = \text{const}$), условия трения (τ_w), свойства СС и условия ее нагружения (параметр $R_{\sigma\tau}$). При этом, если $R_{\sigma\tau} = \text{const}$, с ростом τ_w прогнозируется снижение $\sigma_{R\tau}$. Когда же $\tau_w = 0$, то $R_{\sigma\tau} = 1$ и из (13) имеем $\sigma_{R\tau} = \sigma_{RT}$, как и должно быть. Заметим, что для реальных СС чаще всего $R_{\sigma\tau} \neq \text{const}$. Поэтому для одних СС в некотором интервале изменения τ_w или во всем диапазоне $0 \leq \tau_w \leq \tau_{fT}$ оказывается, что $R_{\sigma\tau} < 1$, а $\varphi_\sigma(\tau_w) > 1$, т.е. при ИУП протекают процессы упрочнения, и $\sigma_{R\tau} > \sigma_{RT}$. Для тех же СС, но в ином интервале изменения τ_w или для других СС во всем диапазоне $0 \leq \tau_w \leq \tau_{fT}$, наоборот, обнаруживается, что $R_{\sigma\tau} > 1$, а $\varphi_\sigma(\tau_w) < 1$, т.е. при ИУП преобладают процессы разупрочнения, и $\sigma_{R\tau} < \sigma_{RT}$.

При изучении обратного эффекта в условиях, когда $\sigma = \text{const}$ и $T = \text{const}$, из критерия (9) имеем следующее выражение для предела фрикционно-механической выносливости (критерий предельного состояния – достижение системой предельного износа):

$$\tau_{f\sigma} = \tau_{fT} \cdot \varphi_\tau(\sigma), \quad (15)$$

где функция

$$\varphi_\tau(\sigma) = \sqrt{\frac{1}{R_{\sigma,\tau}} - \frac{\sigma^2}{\sigma_{RT}^2}}, \quad \sqrt{\frac{1}{R_{\sigma,\tau}} - \frac{\sigma^2}{\sigma_{RT}^2}} \geq 0. \quad (16)$$

Следовательно, в соответствии с (15), (16), оценку предельного напряжения $\tau_{f\sigma}$ элемента СС можно выполнить, если известны значения его пределов выносливости σ_{RT} и фрикционной усталости τ_{fT} (при $T = \text{const}$), нагруженность (σ), свойства СС и условия ее испытаний (параметр $R_{\sigma\tau}$). При $R_{\sigma\tau} = \text{const}$ формулы (15), (16) предсказывают снижение $\tau_{f\sigma}$ с ростом σ , а если $\sigma = 0$, то $R_{\sigma\tau} = 1$ и имеем $\tau_{f\sigma} = \tau_{fT}$, как и должно быть. Поскольку для реальных СС $R_{\sigma\tau} \neq \text{const}$, ясно, что в случаях, когда в системе преобладают

процессы упрочнения, будет $R_{\square} < 1$, а $\varphi_{\square}(\sigma) > 1$, значит, $\tau_{f\square} > \tau_{fT}$; в тех случаях, когда доминирующими являются процессы разупрочнения, будет $R_{\square} > 1$, а $\varphi_{\square}(\sigma) < 1$, и тогда $\tau_{f\square} < \tau_{fT}$.

Разработана также методика расчетной оценки долговечности СС на основе энергетического критерия (9) и выполнена проверка рассмотренного подхода, которая показала удовлетворительное соответствие теории и опыта [12].

Несомненным достоинством энергетического подхода, считающегося наиболее универсальным, является его простота, минимальное количество требующих оценки параметров. Вместе с тем, он нуждается в совершенствовании с целью возможности учета определяющих факторов, в том числе масштабного.

Следует отметить, что оба изложенных подхода могут использоваться для оценки характеристик сопротивления разрушению и при иных видах ИУП, например, фреттинг-усталости, контактно-механической усталости. В этих случаях в расчетные формулы подставляется удельная сила трения, определяемая по следующим выражениям:

- при фреттинг-усталости

$$\tau_w = f_{\phi} \cdot q_m, \quad (17)$$

- при контактно-механической усталости

$$\tau_w = f_R \cdot p_0, \quad (18)$$

где f_{ϕ} , f_R – коэффициенты трения при фреттинге и качении; q_m , p_0 – среднее и максимальное (нормальные) давления на площадке контакта соответственно.

Дальнейшие исследования позволят установить эффективность каждого из рассмотренных подходов с тем, чтобы способствовать их внедрению в инженерные расчеты СС современных машин и оборудования.

Литература. 1.Сосновский Л.А. Комплексная оценка надежности силовых систем по критериям сопротивления усталости и износостойкости (основы трибофатики) – Гомель: БелИИЖТ, 1988. – 56 с. 2.Сосновский Л.А. Трибофатика: проблемы и перспективы/ Доклад на тематической выставке АН СССР «Математика и механика - народному хозяйству». – Гомель: БелИИЖТ, 1989. – 65 с. 3.Сосновский Л.А., Махутов Н.А., Шуринов В.А. Фрикционно-механическая усталость: основные закономерности (обобщающая статья) // Завод. лаборатория. – 1992. – N 9. – С. 46 – 63. 4.Сосновский Л.А., Махутов Н.А., Шуринов В.А. Фреттинг-усталость: основные закономерности (обобщающая статья) // Завод. лаборатория. – 1992. – N 8. – С. 45 – 62. 5.Сосновский Л.А., Махутов Н.А., Шуринов В.А. Контактно-механическая усталость: основные закономерности (обобщающая статья) // Завод. лаборатория. – 1992. – N 11. – С. 44 – 61. 6. II Международный симпозиум по трибофатике (Москва, 15-17 октября 1996 г.). Решение. – Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», 1996. – 8 с. 7.Сосновский Л.А. Надежность и долговечность элементов силового металлополимерного трибосопряжения в процессе износосталостных испытаний // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 1986. – N 9. – С. 93–102. 8.Сосновский Л.А. Статистическая механика усталостного разрушения. – Минск: Наука и техника, 1987. – 288 с. 9.ГОСТ 30638 – 99. Трибофатика. Термины и определения. – Минск: БелГИСС, 1999.–18 с. 10.Сосновский Л.А. Энергетический подход к анализу поврежденности силовой системы // Изв. АН БССР. Серия физ.-техн. наук. – 1991. – N 4. – С. 87–92. 11.Сосновский Л.А., Махутов Н.А. Предельные состояния силовых систем и процессы их повреждения. Сообщение 1: Энергетические критерии разрушения. Сообщение 2: Долговечность и меры поврежденности // Пробл. прочности. – 1993. – N 1. – С. 11–23; № 3. – С. 17– 27. 12.Богданович А.В., Махутов Н.А., Сосновский Л.А. Методика прогнозирования долговечности силовых систем по критериям износосталостного повреждения // Завод. лаборатория. – 2000. – № 8 (принято к печати).