

Анализ механических состояний силовых систем. Сообщение 1. Предельное состояние

Л. А. Сосновский

НПО «Трибофатика», Гомель, Беларусь

Изложены основы теории предельных состояний силовых систем, которые работают в условиях сложного нагружения (механическая усталость, трение и изнашивание, температура, электрохимическая коррозия). Получен энергетический критерий предельного состояния и описаны методы определения его параметров. Записаны условия прочности с учетом как циклической, так и контактной нагрузок.

Ключевые слова: силовая система, предельное состояние, износоусталостное повреждение, прямой эффект, обратный эффект, критерий предельного состояния.

Введение. К настоящему времени расчеты на прочность при проектировании машин и оборудования (по предельному состоянию) приобрели классическое завершение. Нельзя сказать, что аналогичные достижения имеются в области расчетов на трение и износ. По нашему мнению, это связано, в частности, с тем, что в основу таких расчетов положена не механика деформируемого твердого тела, а механика дискретного контакта тел с шероховатой поверхностью. Между тем современный этап развития машиностроения ставит перед наукой очередную, более сложную задачу – анализ предельного состояния силовых систем, которые работают при сочетании контактных и внеконтактных нагрузок.

Ниже изложены основы теории предельного состояния таких систем, разрабатываемой в рамках трибофатики [1–4]. В последующих сообщениях будет дан анализ состояний поврежденности и безопасности.

Силовые системы и их повреждение. Силовой называют всякую механическую систему, которая воспринимает и передает рабочую повторно-переменную нагрузку и в которой одновременно реализуется процесс трения в любом его проявлении – при скольжении, качении, проскальзывании, ударе и т.д. [5]. В качестве типичных примеров назовем системы: вал/ступица (зубчатого колеса, маховика и др.) с неподвижной либо ходовой посадкой (прессовые, шпоночные, шлицевые и другие соединения); шейка коленчатого вала/шатун с подшипником скольжения; болтовые, заклепочные и резьбовые соединения, передающие циклическую нагрузку; колесо/железнодорожный рельс и проч. Как правило, это наиболее ответственные и массовые узлы современных машин и оборудования. Для них характерно комплексное, износоусталостное повреждение (ИУП), основными видами которого являются фрикционно-механическая, контактно-механическая, эрозивно-механическая и фреттинг-усталость [1–5]. В табл. 1 даны определения видов ИУП применительно к типичным силовым системам.

Т а б л и ц а 1

Основные виды износоусталостного повреждения

Типичная силовая система	Комплексное повреждение	Определение
Шейка коленчатого вала/шатунная головка с подшипником скольжения	Фрикционно-механическая усталость	Износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и трения скольжения
Колесо/железнодорожный рельс	Контактно-механическая усталость	Износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и трения качения (трения качения с проскальзыванием)
Шлицевой вал/втулка	Фреттинг-усталость	Износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и фреттинга
Вал гребного винта/морская вода	Коррозионно-механическая усталость	Усталость материала при одновременном воздействии повторно-переменных напряжений и коррозионной среды
Лопатки турбины/поток жидкости или газа, несущий твердые частицы	Эрозионно-механическая усталость	Износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и эрозии

Общие положения. Энергетический подход представляется наиболее общим при решении отдельных задач прочности и износостойкости элементов конструкций, поскольку энергетические критерии универсальны и интегрально характеризуют напряженно-деформированное состояние.

Рассмотрим общий случай реализации энергетического подхода применительно к силовой системе. Для такой системы ИУП обусловлено следующими воздействиями: а) контактной нагрузкой – в первом приближении будем ее характеризовать удельной силой трения $\tau_w = fp_a$, где p_a – наибольшее контактное давление, f – коэффициент трения; б) повторно-переменной (внеконтактной нагрузкой) – в первом приближении будем ее характеризовать циклическими напряжениями σ ; в) термодинамической нагрузкой – интегрально будем ее характеризовать температурой T_Σ , обусловленной всеми источниками тепла; г) электрохимической нагрузкой – опосредовано будем ее характеризовать коррозионным параметром (D), при этом следует различать коррозию под напряжением (D_σ), коррозию при трении (D_τ) и термическую коррозию (D_T). Рассматриваемый случай называем общим в том смысле, что в силовой системе реализуется практически весь комплекс повреждающих явлений.

Изложенные ниже представления положим в основу теории предельных состояний силовых систем.

1. Зарождение и развитие комплексного ИУП определяется главным образом четырьмя частными явлениями: механической усталостью, трением и изнашиванием, тепловыми и электрохимическими (коррозионными) процессами. Эти явления относятся к частным в том смысле, что каждое из них может быть реализовано как независимое и отдельное и приводит к

соответствующему предельному состоянию по частным (отдельным) критериям.

2. Все частные явления и процессы в силовой системе развиваются одновременно и в одной зоне, поэтому ее предельное состояние обусловлено не отдельным явлением, а их совместным (совокупным) действием – ИУП критической величины.

3. Кинетика ИУП определяется не всей подводимой к силовой системе энергией U , а лишь ее эффективной (опасной) частью $U^{eff} \ll U$, которая затрачивается на повреждение.

4. Критерием предельного состояния служит условие достижения эффективной энергией U^{eff} критической величины U_0 в некоторой области ограниченных размеров элемента силовой системы – в его опасном объеме.

5. Критическая энергия U_0 разрушения (повреждения) считается фундаментальной для данного вещества константой, не зависящей от условий испытания, видов подводимой энергии, механизмов повреждения.

6. Эффективная энергия U^{eff} в общем случае может быть представлена функцией четырех составляющих: тепловой U_T^{eff} , силовой U_σ^{eff} , фрикционной U_τ^{eff} и электрохимической U_{ch}^{eff} энергий

$$U^{eff} = R(U_T^{eff}, U_\sigma^{eff}, U_\tau^{eff}, U_{ch}^{eff}), \quad (1)$$

где R учитывает кинетическое взаимодействие частных повреждающих явлений в комплексном процессе ИУП.

7. Процессы электрохимического (коррозионного) повреждения учитываются как термическая коррозия ($D_{T(ch)}$), коррозия под напряжением ($D_{\sigma(ch)}$) и коррозия трения ($D_{\tau(ch)}$), так что функция (1) принимает вид

$$U^{eff} = R(U_{T(ch)}^{eff}, U_{\sigma(ch)}^{eff}, U_{\tau(ch)}^{eff}). \quad (2)$$

8. Предельное состояние силовой системы наступит, если оно реализуется хотя бы от одного (любого) частного повреждающего явления, в то время как остальные повреждающие явления оказываются сопутствующими. В этой связи следует различать (и изучать) два эффекта [1–5]. Прямой эффект – влияние процессов трения и изнашивания на изменение характеристик сопротивления усталости. Обратный эффект – влияние циклических напряжений на изменение характеристик износостойкости.

9. Если условия эксплуатации или испытаний силовой системы таковы, что реализуется прямой эффект, то предельное состояние достигается по критериям объемного (усталостного) разрушения, тогда как поверхностное повреждение (изнашивание, коррозия) оказывается сопутствующим.

10. Если условия эксплуатации или испытаний силовой системы таковы, что реализуется обратный эффект, то предельное состояние достигается по критериям поверхностного повреждения (предельный износ, критическая глубина коррозионного повреждения), тогда как механическая усталость оказывается сопутствующим повреждением.

11. Предельное состояние силовой системы может достигаться одновременно по двум, трем, либо всем четырем критериям.

Энергетический критерий предельного состояния. Полная подводимая к системе энергия определяется простой суммой:

$$U = U_T + U_\sigma + U_\tau, \quad (3)$$

где U_T – тепловая, U_σ – силовая и U_τ – фрикционная составляющие полной энергии. Величины U_σ и U_τ нетрудно вычислить с учетом известных связей между напряжениями и деформациями в упругой и упруго-пластической областях. Однако использование (3) для практических расчетов нецелесообразно, так как большая часть подводимой к системе энергии рассеивается в ней и окружающем пространстве, не повреждая материал. Введем представление об эффективной энергии $U^{eff} \ll U$, т.е. части полной энергии, непосредственно затрачиваемой на образование и накопление повреждений в силовой системе. Ясно, что суммарная эффективная энергия включает тепловую U_T^{eff} , силовую U_σ^{eff} и фрикционную U_τ^{eff} составляющие, которые (как и величины U_T, U_σ, U_τ) пропорциональны соответствующим параметрам:

$$U_T^{eff} = a_T T_\Sigma, \quad U_\sigma^{eff} = a_\sigma \sigma^2, \quad U_\tau^{eff} = a_\tau \tau_w^2, \quad (4)$$

где коэффициенты $a \ll 1$ выделяют из полных тепловой и механической энергий их эффективные части U^{eff} .

По мере роста значений σ и (или) τ_w , и (или) T_Σ , соответственно увеличивается суммарная эффективная энергия (1) до достижения критической (предельной) величины U_0 . В этом случае наступает предельное состояние силовой системы, которое характеризуется, например, образованием усталостной трещины критического размера, либо предельно допустимой степенью износа в системе, либо одновременной реализацией обоих указанных состояний.

Конкретизация функции R в (1) может быть выполнена исходя из следующих соображений. В первом приближении можно положить, что предельное состояние силовой системы наступит, когда простая алгебраическая сумма эффективных энергий достигнет критической величины U_0 . Однако, по всей вероятности, это соблюдается не всегда. Например, если механизм повреждения связан с кинетикой накопления разрывов межатомных связей в соответствии с термофлуктуационной концепцией прочности твердых тел, то необходимо учитывать и возможный процесс их рекомбинации. Аналогично, если механизм повреждения определяется образованием и скоплением дислокаций (либо вакансий) согласно дислокационным (либо вакансионным) теориям, то следует принимать во внимание и возможный процесс их разрядки. С учетом взаимодействия различных повреждений $R \neq 1$. Поэтому энергетический критерий (1) предельного состояния силовой системы можно записать с учетом (4) в виде

$$U^{eff} = R_{T/M} [a_T T + R_{\sigma/\tau} (a_\sigma \sigma^2 + a_\tau \tau_w^2)] = U_0, \quad (5)$$

Здесь $R_{\sigma/\tau}$ определяет взаимодействие эффективных частей механической энергии, обусловленных нормальными σ и фрикционными τ_w напряжениями, а $R_{T/M}$ – взаимодействие тепловой и механических составляющих эффективной энергии; кроме того, величины R учитывают процессы залечивания повреждений, каков бы ни был их механизм. Заметим также, что в выражении (5) эффективная часть тепловой энергии определяется изменением суммарной температуры $T_\Sigma = T_2 - T_1$ в зоне силового контакта, обусловленной всеми источниками тепла, в том числе выделяемого при механическом (объемном и поверхностном) деформировании, структурных превращениях и т.п.

Критерий (5) имеет весьма общий характер. Он не содержит необоснованных коэффициентов и не зависит, например, от режима нагружения системы (статическое, длительное, циклическое нагружение), или от того, какие механизмы накопления повреждений и разрушения реализуются в ней.

Из общего критерия (5) нетрудно получить ряд важных частных случаев. Так, условия чисто теплового (или термодинамического) разрушения (когда $\sigma = 0$ и $\tau_w = 0$) либо чисто механического разрушения (когда $T_\Sigma = 0$) будут соответственно следующими:

$$a_T T_\Sigma = U_0, \quad (6)$$

$$R_{\sigma/\tau} (a_\sigma \sigma^2 + a_\tau \tau_w^2) = U_0. \quad (7)$$

В случае изотермической механической усталости (когда $\tau_w = 0$) имеем

$$R_{T/M} (a_T T_\Sigma + a_\sigma \sigma^2) = U_0, \quad (8)$$

а для изотермической фрикционной усталости (когда $\sigma = 0$) аналогично получаем

$$R_{T/M} (a_T T_\Sigma + a_\tau \tau_w^2) = U_0. \quad (9)$$

Для конкретизации методики расчета энергии (2), следует указать способ учета влияния электрохимических процессов на повреждаемость силовой системы. Введем параметр $0 \leq D \leq 1$, увеличение которого примем эквивалентным росту эффективной (расходуемой на образование и накопление ИУП) энергии в силовой системе вследствие развития электрохимической повреждаемости. Такое влияние нетрудно описать путем соответствующего изменения величин параметров a в критерии (5). В самом деле, если уменьшить величину a в $(1 - D)$ раз, т.е. ввести в критерий (5) выражение $a/(1 - D)$, то, очевидно, рост D означает соответствующее увеличение a . Тогда критерий (5) можно записать в обобщенном виде:

$$R_{T/M} \left[\frac{a_T}{1-D_T} T_\Sigma + R_{\sigma/\tau} \left(\frac{a_\sigma}{1-D_\sigma} \sigma^2 + \frac{a_\tau}{1-D_\tau} \tau_w^2 \right) \right] = U_0. \quad (10)$$

Введем относительные меры ω термодинамического (индекс T), силового (индекс σ) и фрикционного (индекс τ) повреждений с учетом влияния коррозии ($1-D$) (индекс ch):

$$\omega_{T(ch)} = \frac{a_T T_\Sigma}{U_0(1-D_T)}; \quad \omega_{\sigma(ch)} = \frac{a_\sigma \sigma^2}{U_0(1-D_\sigma)}; \quad \omega_{\tau(ch)} = \frac{a_\tau \tau_w^2}{U_0(1-D_\tau)}. \quad (11)$$

Тогда критерий (10) принимает вид

$$R_{T/M} [\omega_{T(ch)} + R_{\sigma/\tau} (\omega_{\sigma(ch)} + \omega_{\tau(ch)})] = 1, \quad (10a)$$

или

$$\omega_\Sigma = 1, \quad (10б)$$

где мера комплексного ИУП

$$\omega_\Sigma = R_{T/M} [\omega_{T(ch)} + R_{\sigma/\tau} (\omega_{\sigma(ch)} + \omega_{\tau(ch)})]. \quad (12)$$

Критерий (10) гласит: предельное состояние силовой системы наступит, когда сумма взаимодействующих эффективных составляющих энергии от силового, фрикционного и термического воздействий (с учетом процессов коррозии под напряжением, термической коррозии и трибохимической коррозии) достигнет критической величины U_0 . Критерий (10) в форме (10а) или (10б) удобен тем, что все меры поврежденности являются безразмерными и имеют единый интервал ($0 \leq \omega \leq 1$) изменения величин.

Заметим, что в критериях (5) и (10) не наложено ограничений для величин $T_\Sigma > 0$, $\tau_w > 0$, $\sigma > 0$. Поэтому они могут описывать достижение предельного состояния не только при комплексном ИУП, но и при частных условиях нагружения, например, как отмечено выше, при чисто тепловом или чисто механическом разрушении. Если вместо нормального напряжения σ ввести интенсивность напряжений $\sigma_{инт} = \varphi(\sigma_i, \tau_{ij})$, где σ_i, τ_{ij} – компоненты напряжения, то эти критерии могут работать и в условиях произвольного сложного напряженного состояния циклически деформируемого элемента системы. Использование интегрального параметра, удельной силы трения $\tau_w = \bar{f} p_a$, в данных критериях позволяет учесть влияние сложного напряженного состояния при трении: показано, что величина τ_w пропорциональна эквивалентному напряжению, определяемому по известным теориям прочности [6]. Кроме того, можно оценить влияние смазочного материала на повреждаемость системы, если принять $f = f_{см}$, где $f_{см}$ – коэффициент трения со смазкой. Наконец, следует предположить, что критерии (5) и (10) описывают не только хрупкое (упругое), но и пластическое разрушение, если принять известный закон $\sigma_{инт} = E' \varepsilon_{инт}$, где E' – секущий модуль деформации, $\varepsilon_{инт}$ – интенсивность деформации, обусловленной как контактной, так и внеконтактной нагрузками.

Столь широкие возможности критериев (5) и (10) связаны с тем, что в их основу положены наиболее общие энергетические представления об условиях повреждения и разрушения твердых тел.

Совместный анализ критериев (5) и (10) позволяет сделать три основных вывода.

1). Рост нагрузочных параметров (σ , τ_w , T_Σ , D) ведет к соответствующему ускорению достижения предельного состояния.

2). Предельное состояние силовой системы может быть достигнуто за счет увеличения одного (любого) нагрузочного параметра (при неизменных величинах остальных параметров).

3). Если $R > 1$, то деградация силовой системы усиливается, а при $R < 1$ она замедляется по сравнению с поврежденностью, обусловленной совокупным действием одних только нагрузочных параметров.

Определение параметров. Для практического применения критериев (5) и (10) необходимо иметь обоснованные методики определения величин U_0 , a , R , D .

Выше отмечен фундаментальный характер параметра U_0 . Если принять термофлуктуационную теорию прочности, то U_0 определяется как начальная энергия активации процесса разрушения. Показано, что величина U_0 примерно совпадает с теплотой сублимации для металлов и кристаллов с ионными связями, а также с энергией активации термодеструкции для полимеров:

$$U_0 \approx U_T.$$

Кроме того, величина U_0 трактуется как энергия активации механического разрушения:

$$U_0 \approx U_M.$$

Следовательно, энергию U_0 можно считать константой вещества:

$$U_0 \approx U_M \approx U_T = \text{const.} \quad (13)$$

Принимая во внимание физико-механические и термодинамические представления о процессах разрушения [7, 8], запишем (13) в виде

$$U_M = s_k \frac{\sigma_{th} C_a}{E \alpha_V} = U_0 = kT_s \ln \frac{k\theta_D}{h} = U_T, \quad (13a)$$

где C_a – атомная теплоемкость; α_V – коэффициент термического расширения объема; σ_{th} – теоретическая прочность; T_S – температура плавления; k – постоянная Больцмана; θ_D – температура Дебая; h – постоянная Планка; E – модуль упругости; s_k – коэффициент приведения.

Из равенства (13a) следует, что U_0 – энергия активации данного вещества, по порядку величины равная $1 \dots 10$ эВ в расчете на одну частицу, атом или молекулу ($\sim 10^2 \dots 10^3$ кДж/моль), т.е. величина, близкая к энергии разрыва межатомной связи в твердом теле. Ее уровень не зависит от того,

каким способом он достигается – механическим, тепловым либо их совокупным действием. Методики экспериментального определения U_0 разработаны и известны. Численные значения U_0 для материалов различных классов приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Энергия разрыва межатомных связей для некоторых материалов

Материал	U_0 , кДж/моль
Металлы	
Алюминий	222
Железо	419
Кадмий	117
Медь	339
Ниобий	629
Платина	503
Титан	503
Цинк	507
Полимеры	
Капрон	188
Полиметилметакрилат (оргстекло)	750
Полипропилен	235
Полистирол	130
Полихлорвинил	147
Ионные кристаллы	
Каменная соль	285
Хлористый литий	302
Хлористое серебро	126

Используя (13а), получаем формулу для расчетной оценки теоретической прочности

$$\sigma_{th} = \frac{E\alpha_V k T_S}{c_a} \ln \frac{k\theta_D}{h}.$$

Откуда устанавливается термомеханическая константа

$$\frac{\sigma_{th}}{T_S} = E \frac{\alpha_V k}{c_a} \ln \frac{k\theta_D}{h} = \theta_\sigma,$$

которая характеризует потерю прочности, приходящуюся на 1 К.

Значения коэффициентов a в уравнении (5) определяются из граничных условий

$$T = 0, \quad \tau_w = 0: \quad a_\sigma \sigma_d^2 = U_0, \quad a_\sigma = U_0 / \sigma_d^2; \quad (14)$$

$$T = 0, \quad \sigma = 0: \quad a_\tau \tau_d^2 = U_0, \quad a_\tau = U_0 / \tau_d^2; \quad (15)$$

$$\sigma = 0, \quad \tau_w = 0: \quad a_T T_d = U_0, \quad a_T = U_0 / T_d, \quad (16)$$

где σ_d, τ_d – нормальное и фрикционное предельные напряжения при $T \rightarrow 0$, называемые пределами (механической) деструкции; T_d – температура деструкции (при $\sigma = 0, \tau_w = 0$), или предел термодеструкции.

Для определения a_σ с помощью (14) следует провести, например, статическое испытание материала на растяжение при температуре, близкой к абсолютному нулю. Тогда практически чисто механическое разрушение нормальным отрывом будет иметь место при напряжении $\sigma = \sigma_d$. Для оценки a_τ по формуле (15) необходимо осуществить, например, статическое испытание на чистый сдвиг или кручение (тонкостенной трубки) при $T \rightarrow 0$. Тогда практически чисто механическое разрушение сдвигом произойдет при касательном напряжении $\tau_w = \tau_d$. Коэффициент a_T , используя (16), можно рассчитать, если реализовать разрушение материала только тепловым способом (в этом случае $T = T_d$). Таким образом, величины σ_d, τ_d, T_d есть физические константы материала, определяемые из соответствующих опытов. Это означает, что и коэффициенты a являются постоянными материала при заданных условиях нагружения.

Что касается параметров R , то из (5) с учетом (4) следует, что их значения зависят от соотношения эффективных энергий в заданных условиях испытания конкретной силовой системы. Так, значение параметра $R_{T/M} = f_1[(U_\sigma^{eff} + U_\tau^{eff})/U_T^{eff}]$ обуславливается соотношением механической и тепловой эффективных энергий, а значение параметра $R_{\sigma/\tau} = f_2[U_\tau^{eff}/U_\sigma^{eff}]$ – соотношением фрикционной и силовой частей механической энергии.

В первом приближении величины $R_{T/M}, R_{\sigma/\tau}$ можно установить по результатам двух опытов, на основании которых составляется система из двух уравнений типа (5). Если принять $T = 0$, то $R_{T/M} = 1$, и по формуле (7) имеем

$$R_{\sigma/\tau} = \frac{U_0}{a_\sigma \sigma^2 + a_\tau \tau_w^2}. \quad (17)$$

Далее при известном $R_{\sigma/\tau}$ и заданной температуре $T > 0$ из (7) получаем

$$R_{T/M} = \frac{U_0}{a_T T_\Sigma + R_{\sigma/\tau} (a_\sigma \sigma^2 + a_\tau \tau_w^2)}. \quad (18)$$

Вклад процессов коррозии в ИУП силовой системы можно определить так:

$$1 - D_T = b_{e(T)} \left(\frac{v_{ch}}{v_{ch(T)}} \right)^{m_v(T)}; \quad (19a)$$

$$1 - D_{\sigma} = b_{e(\sigma)} \left(\frac{v_{ch}}{v_{ch(\sigma)}} \right)^{m_{v(\sigma)}} ; \quad (196)$$

$$1 - D_{\tau} = b_{e(\tau)} \left(\frac{v_{ch}}{v_{ch(\tau)}} \right)^{m_{v(\tau)}} , \quad (19)$$

где v_{ch} – скорость коррозии в данной среде; $v_{ch(T)}$, $v_{ch(\sigma)}$, $v_{ch(\tau)}$ – скорость коррозии в той же среде соответственно при термическом, силовом и фрикционном воздействии; b_e – коэффициенты, учитывающие процессы коррозионной эрозии; m_v – параметры, определяющие электрохимическую активность материалов при силовом (индекс σ), фрикционном (индекс τ) и термодинамическом (индекс T) нагружении.

Многокритериальная диаграмма предельных состояний. На рис. 1 дано графическое представление уравнения (10) в виде многокритериальных диаграмм (1–5) предельных состояний различных силовых систем. Здесь ось ординат служит прочностной шкалой (σ_{-1} – предел выносливости при циклическом нагружении), а ось абсцисс – трибологической шкалой (τ_f – предельное значение удельной силы трения (фрикционного напряжения при трении)). Из анализа рис. 1 следуют два наиболее важных вывода.

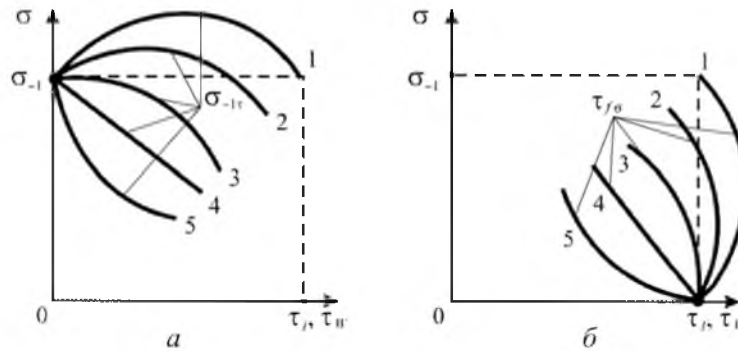


Рис. 1. Типичные диаграммы предельного состояния силовых систем.

1). Процессы трения и изнашивания в зависимости от условий их реализации могут не только значительно снижать (кривые 3, 4 и 5 на рис. 1,а), но и существенно повышать (кривые 1 и 2 на рис. 1,а) сопротивление усталости силовой системы, характеризуемое величиной предела выносливости σ_{-1} (прямой эффект). Значит, в определенных условиях ее эксплуатации трение и изнашивание полезны. Более того, изменяя условия трения и изнашивания должным образом, можно эффективно управлять процессом ИУП конкретной силовой системы.

2). Циклические напряжения в зависимости от условий испытания могут не только значительно снижать (кривые 3, 4 и 5 на рис. 1,б), но и существенно повышать (кривые 1 и 2 на рис. 1,б) износостойкость силовой

системы, характеризуемую величиной предельного фрикционного напряжения τ_f (обратный эффект). Таким образом, в определенных условиях ее эксплуатации циклические напряжения благоприятны. Следовательно, изменяя условия циклического нагружения должным образом, можно эффективно управлять процессом ИУП конкретной силовой системы.

При реализации прямого эффекта предельное состояние силовой системы достигается по критериям механической усталости (рис. 1,а), тогда как повреждения, обусловленные процессами трения и изнашивания, вызывают лишь изменение характеристик сопротивления усталости. При реализации обратного эффекта, наоборот, предельное состояние силовой системы достигается по критериям износостойкости (см. рис. 1,б), тогда как повреждения, вызванные циклическими напряжениями, ведут лишь к изменению характеристик трения и изнашивания.

Анализ соответствующих экспериментальных результатов (например, [1–4]) показывает, что кривые типа 1 и 2 характерны для контактно-механической усталости, кривые 2, 3 – для фрикционно-механической усталости, 3–5 – для коррозионно-механической усталости и фреттинг-усталости.

Исследование многочисленных и разнообразных частных случаев, следующих из критерия (10), выходит за рамки данной статьи; некоторые из них рассмотрены в работе [9].

Условия прочности. В частном случае изучения прямого эффекта на основании (10) при $\sigma > 0$, $T_\Sigma > 0$, $\tau_w > 0$, $D = 0$ имеем формулу для предельных напряжений

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

которую можно преобразовать к виду

$$\sigma_{-1\tau} = \sigma_{-1} \sqrt{\frac{1}{R_{\sigma/\tau}} - \frac{\tau_w^2}{\tau_f^2}}. \quad (20)$$

При изучении обратного эффекта, аналогично из (10) получаем

$$\tau_{f\sigma} = \tau_f \sqrt{\frac{1}{R_{\sigma/\tau}} - \frac{\sigma^2}{\sigma_{-1}^2}}. \quad (21)$$

Принимая во внимание формулы (20) и (21), запишем соответствующие условия прочности

$$\sigma \leq [\sigma] = \sigma_{-1\tau} / n_{\sigma\tau}, \quad (22)$$

$$\tau_w = fp_a \leq [\tau] = \tau_{f\sigma} / n_{\tau\sigma}. \quad (23)$$

Условие (23) можно задать и по контактному давлению

$$p_a \leq [p] = p_{f\sigma} / n_{p\sigma}. \quad (24)$$

В формулах (22)–(24) $[\sigma]$, $[\tau]$, $[p]$ – допускаемые напряжения, n – соответствующий коэффициент запаса. На основании (22)–(24) нетрудно, применяя известные процедуры сопротивления материалов, поставить и решить любую из трех задач: 1) проверка прочности, 2) выбор материалов для изготовления элементов силовой системы, 3) определение размеров их поперечного сечения.

Так, для силовой системы вал/подшипник скольжения из (22) с учетом (20) получаем уравнение для вычисления требуемого момента сопротивления (изгибу) вала

$$W_{TF} = \frac{Mn_{\sigma\tau}}{\sigma_{-1\tau}} = \frac{Mn_{\sigma\tau}}{\sigma_{-1} \sqrt{\frac{1}{R_{\sigma/\tau}} - \frac{\tau_w^2}{\tau_f^2}}}. \quad (25)$$

А из (23) с учетом (21) находим требуемую (номинальную) площадь (контакта) контртела по формуле

$$A_a = \frac{fF_N n_{\tau\sigma}}{\tau_{f\sigma}} = \frac{fF_N n_{\tau\sigma}}{\tau_f \sqrt{\frac{1}{R_{\sigma/\tau}} - \frac{\sigma^2}{\sigma_{-1}^2}}}. \quad (26)$$

Очевидно, что расчет вала и контртела с использованием формул (25) и (26), соответственно, позволяет выполнить проектирование силовой системы по основным критериям трибофатики.

Так, например, на рис. 2 дан графический анализ уравнения (25) при условии, что момент сопротивления вала при обычном расчете на усталость $W_F = 1$.

Здесь горизонтальная пунктирная линия соответствует случаю, когда $W_{TF}/W_F = 1$, т.е. когда расчет вала выполнен по частному критерию механической усталости без учета влияния процессов трения и изнашивания. Другая пунктирная линия (восходящая) означает, что такое влияние принимается во внимание при $R_{\sigma/\tau} = 1$. Сплошные линии характеризуют роль взаимодействия повреждений с учетом его направленности ($R_{\sigma/\tau} > 1$ либо $R_{\sigma/\tau} < 1$). Из рис. 2 можно сделать следующие заключения.

Если $R_{\sigma/\tau} = 1$, то $W_{TF}/W_F > 1$ уже при $\tau_w^2/\tau_f^2 \approx 0,3$, а при $\tau_w^2/\tau_f^2 \approx 0,7$ требуется принять момент сопротивления W_{TF} , который приблизительно в 2-3 раза превышает величину W_F . Если $R_{\sigma/\tau} < 1$, то обычно имеем момент сопротивления $W_{TF} < W_F$. Наконец, если $R_{\sigma/\tau} > 1$, то значение W_{TF} стремительно возрастает (по сравнению с величиной W_F) – тем быстрее, чем больше отношение τ_w^2/τ_f^2 . Так, при $R_{\sigma/\tau} = 1,2$ и $\tau_w^2/\tau_f^2 \approx 0,7$, момент сопротивления W_{TF} превышает W_F примерно в 3 раза.

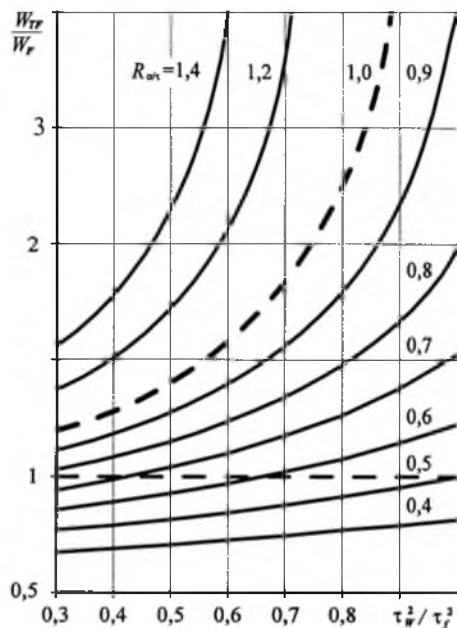


Рис. 2. Оценка момента сопротивления изгибу вала по критериям трибофатиги.

Заключение. В данном сообщении изложены основы общей теории предельного состояния силовых систем.

Энергетический критерий предельного состояния в виде (10) или (10а) описывает достижение силовой системой предельного состояния, обусловленного повторно-переменной, фрикционной, тепловой и электрохимической нагрузками. Из него следуют частные критерии предельного состояния при механическом (7) либо термодинамическом (6) повреждении, а также критерии изотермической механической (8) либо фрикционной (9) усталости. Методики определения всех параметров вытекают из соотношений (13а), (14)–(19).

Предложенный критерий графически характеризуется многокритериальной диаграммой (см. рис. 1) предельного состояния типичных силовых систем, работающих в условиях контактно-механической, фрикционно-механической и фреттинг-усталости (табл. 1).

На основе энергетического критерия записаны условия прочности (22)–(24) силовых систем, которые используют, например, для подбора размеров поперечного сечения элемента конструкции (формула (25)) и для определения требуемой площади контакта (формула (26)).

Анализ условия прочности (25) показал (см. рис. 2), что требуемый размер поперечного сечения вала (и, следовательно, его сопротивление усталости) существенно зависит от условий трения, интегрально характеризующихся соотношением τ_w^2/τ_f^2 действующего и предельного фрикционных напряжений, а также от процессов взаимодействия повреждений, обусловленных контактной и внеконтактной нагрузками и интегрально характеризующихся параметром $R_{\sigma/\tau}$.

Таким образом, разработана инженерная методика анализа и расчета силовых систем, работающих в сложных условиях нагружения, как по комплексным, так и по частным критериям предельного состояния.

Резюме

Викладено основи теорії граничних станів силових систем, що працюють в умовах складного навантаження (механічна втома, тертя та спрацьовування, температура, електрохімічна корозія). Отримано енергетичний критерій граничного стану та описано методи визначення його параметрів. Записано рівняння міцності з урахуванням як циклічного, так і контактного навантажень.

1. *Библиографический список работ по трибофатике (1985–2000)* (Международный координационный совет по трибофатике). – Сост. Т. Есева, С. Тюрин. – Гомель, 2000. – 26 с.
2. *Сосновский Л. А., Троценко В. Т., Махутов Н. А. и др.* Износоусталостные повреждения и их прогнозирование (трибофатика). – Гомель: НПО «Трибофатика», 2001. – 171 с.
3. *Proc. of III Int. Symp. on Tribo-Fatigue (ISTF'2000: Oct. 22–26, 2000, Beijing, China)* / Eds. Gao Wanzhen and Li Jian. – Hunan University Press, China, 2000. – 653 p.
4. *Трибофатика: Тр. 4-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF4), 23–27 сентября 2002 г., Тернополь (Украина)* / Отв. ред. В. Т. Троценко – Тернополь: Тернопольский государственный технический университет им. Ивана Пулюя, 2002. – Т. 1. – 530 с., Т. 2. – 317 с.
5. *ГОСТ 30638–99. Трибофатика. Термины и определения* (Межгосударственный стандарт). – Минск: Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. – 17 с.
6. *Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С.* Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 528 с.
7. *Иванова В. С., Терентьев В. Ф.* Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
8. *Журков С. Н.* Дилатонный механизм прочности твердых тел // Физика прочности и пластичности. – Л.: Наука, 1986. – С. 5 – 11.
9. *Трибофатика–98/99: Ежегодник. Под общ. ред. Л. А. Сосновского* // Вып. 1: Теория накопления износоусталостных повреждений. Под ред. Н. А. Махутова / Авт.: Л. А. Сосновский, А. В. Богданович. – Гомель: НПО «Трибофатика», 2000. – 60 с.

Поступила 09. 04. 2003