

механизмы с точечным контактом зубьев. – Николаев: Изд-во Атолл, 2010. – 774с. 7. Alexey Popov. Новая теория контактной прочности упруго сжатых тел. – Lublin (Poland). Изд-во Motrol, 2010. – С.223-231. 8. Попов А.П., Мироненко А.И. Разработка высокоэффективных зубчатых передач на основе новой теории контактной прочности // Специализированный информационно-аналитический журнал "Газотурбинные технологии" – Москва: 2011. – №4(95). – С.32-37. 9. Федякин Р.В., Чесноков В.А. Расчет цилиндрических передач Новикова и фрикционных передач // Изв. ВВИА им. Проф. Н.Е. Жуковского. – М., 1982. – 114с.

Поступила в редколлегию 09.04.2013

УДК 621.833

Контактная прочность зубчатых передач с точечным зацеплением зубьев / А.П. Попов, М.Г. Мозговой // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПИ". – 2013. – №40(1013). – С.108-116. – Бібліогр.: 9 назв.

Вперше на основі нової теорії контактної міцності пружно стиснутих тіл, розробленої О.П. Поповим, створено метод розрахунку на контактну міцність зубчастих передач з точковим зачепленням зубців.

Ключові слова: передачі, зубці, контакт, точка, напруження.

The method of calculation on contact strength of toothed gears with teeth point contact based on a new A.P. Popov's theory of contact strength of the elastic compressed bodies has been worked out for the first time.

Keywords: gears, teeth, contact, point, stress.

УДК 621.833.7: 614.84

А.Г. ПРИЙМАКОВ, к.т.н., проф., доцент каф. ОТО АСР НУГЗУ, Харьков;
А.В. УСТИНЕНКО, к.т.н., доц., старший научный сотрудник
каф. ТММ и САПР НТУ "ХПИ"

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Разработан энергетический критерий работоспособности несущих элементов аварийно-спасательной, инженерной и противопожарной техники с позиций трибофатики как основы проектирования этой техники. Определены параметры напряженно-деформированного состояния несущих элементов с помощью энергетического критерия.

Ключевые слова: трибофатика, энергетический критерий, пожарно-технические средства, основы проектирования.

Постановка проблемы. Проектирование функциональной и надежной аварийно – спасательной, инженерной и противопожарной техники (АСИПП) может обеспечиваться лишь надежной расчетно-проектировочной базой, сформированной на основе системного подхода [1-2]. Такой подход обеспечивает в настоящее время лишь трибофатика [1-6].

Анализ последних достижений и публикаций. Описание явления троппи, лежащего в основе трибофатики, можно найти в работах [1-6].

Постановка задачи и ее решение. Системный анализ – методология, созданная в результате научных обобщений с учетом всех превалирующих факторов влияния, но с единым интегральным (суммарным) критерием работоспособности. Для расчета и проектирования АСИПП-техники авторы рекомендуют использовать энергетический критерий работоспособности, сформированный с позиции трибофатики. При этом несущий элемент рассматривается как фрагмент силовой системы [5-6].

© О.Г. Приймаков, О.В. Устиненко, 2013

Гипотеза Сосновского о предельном состоянии силовой системы имеет вид:

$$\Phi(U_{\sigma(ch)}^{eff}, U_{\tau(ch)}^{eff}, U_{T(ch)}^{eff}, \Lambda_{i \setminus j}, m_k, U_0) = 0, \quad (1)$$

где $m_k, k=1, 2, \dots$ – некоторые характеристики свойств контактирующих материалов.

Дадим конкретизацию (1) в наиболее простой постановке. Будем считать, во-первых, что напряженное состояние, обусловленное повторно-переменной нагрузкой, является одноосным и характеризуется наибольшим нормальным напряжением σ . Во-вторых, примем, что контактное взаимодействие элементов системы описывается фрикционным напряжением τ_w . Пусть далее T – температура среды. Тогда, без учета коррозионных процессов, гипотеза (1) будет

$$\Phi(\sigma^2, \tau_w^2, T, \Lambda_{\sigma \setminus \tau}, \Lambda_{T \setminus M}, m_k, U_0) = 0, \quad (2)$$

так как силовая (U_{σ}^{eff}), фрикционная (U_{τ}^{eff}) и тепловая (U_T^{eff}) составляющие эффективной энергии U_{Σ}^{eff} пропорциональны соответствующим параметрам:

$$U_T^{eff} = a_T T; \quad U_{\sigma}^{eff} = a_{\sigma} \sigma^2; \quad U_{\tau}^{eff} = a_{\tau} \tau_w^2, \quad (3)$$

где коэффициенты $a \ll 1$ выделяют из полных тепловой и механической энергий их эффективные части.

Предположение о том, что предельное состояние силовой системы наступит, когда простая алгебраическая сумма эффективных энергий достигнет критической величины

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

считается неправомерным [6]. В самом деле, подобный критерий, как нетрудно понять, не в состоянии описать возможные принципиально многообразные результаты комплексного повреждения. Поэтому энергетический критерий предельного состояния силовой системы следует записать с учетом диалектического взаимодействия необратимых повреждений:

$$U_{\Sigma}^{eff} = \Lambda_{M \setminus T} [a_T T_{\Sigma} + \Lambda_{\sigma \setminus \tau} (a_{\sigma} \sigma^2 + a_{\tau} \tau_w^2)] = U_0, \quad \Lambda_{\sigma \setminus \tau} \geq 1. \quad (5)$$

Здесь $\Lambda_{\sigma \setminus \tau}$ учитывает взаимодействие эффективных частей механической энергии, обусловленных нормальными σ и фрикционными τ_w напряжениями, а $\Lambda_{M \setminus T}$ – взаимодействие тепловой и механических составляющих эффективной энергии. Заметим, 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.

Критериальное уравнение *Сосновского-Богдановича* (5) есть конкретизация гипотезы (2). Оно описывает достижение предельного состояния и по критерию усталостного разрушения (прямой эффект), когда роль циклических напряжений является определяющей; и по критерию предельного контактного повреждения (обратный эффект), когда решающим является вклад процессов трения и изнашивания; и по критерию термодеструкции, когда термодинамические процессы становятся ведущими. Это означает, что уравнение (5) описывает достижение предельного состояния силовой системы независимо от того, какие механизмы генерирования и накопления разнообразных повреждений реализуются.

Из (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:

$$a_T T_\Sigma = U_0; \quad (6) \quad \Lambda_{\tau\sigma} (a_\sigma \sigma^2 + a_\tau \tau_w^2) = U_0. \quad (7)$$

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

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

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

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

Для конкретизации задачи (4) следует указать способ учета влияния электрохимических процессов на повреждаемость силовой системы. Введем параметр $0 \leq D \leq 1$, которому придадим следующее содержание: его увеличение должно быть эквивалентно росту эффективной (расходуемой на образование и накопление износоусталостных повреждений) 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 получим: рост D означает соответствующее увеличение a . Тогда критерий (5) можно записать в общем виде [4, 5]:

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

Здесь параметры D_σ , D_τ и D_T описывают влияние коррозии под напряжением, коррозии при трении и термической коррозии соответственно. Таким образом, уравнение (5) есть конкретизация гипотезы (1) в том случае, когда нагрузочными параметрами являются σ , τ_w , T_Σ , D .

При $D=0$ критерий (10) переходит в (5).

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

$$0 \leq \omega_{T(ch)} = \frac{a_T T_\Sigma}{U_0(1-D_T)} \leq 1; \quad 0 \leq \omega_{\sigma(ch)} = \frac{a_\sigma \sigma^2}{U_0(1-D_\sigma)} \leq 1; \quad 0 \leq \omega_{\tau(ch)} = \frac{a_\tau \tau_w^2}{U_0(1-D_\tau)} \leq 1. \quad (11)$$

Тогда критерий (10) принимает вид

$$\Lambda_{M\backslash T} [\omega_{T(ch)} + \Lambda_{\tau\sigma} (\omega_{\sigma(ch)} + \omega_{\tau(ch)})] = 1, \quad (12)$$

или

$$\omega_\Sigma = 1, \quad (12a)$$

где энергетическая мера комплексного износоусталостного повреждения

$$0 \leq \omega_\Sigma = \Lambda_{M\backslash T} [\omega_{T(ch)} + \Lambda_{\tau\sigma} (\omega_{\sigma(ch)} + \omega_{\tau(ch)})] \leq 1. \quad (13)$$

Критерий Сосновского (10), (12) гласит: предельное состояние силовой системы наступит, когда сумма диалектически взаимодействующих эффективных составляющих энергии от силового, фрикционного и термического воздействий (с учетом процессов коррозии под напряжением, термической и

трибохимической коррозии) достигнет критической величины U_0 . Критерий (10) в форме (12) или (13) удобен тем, что все меры поврежденности являются безразмерными и имеют единый интервал ($0 \leq \omega \leq 1$) изменения величин.

Если использовать концепцию об опасных объемах деформируемого твердого тела при циклическом нагружении ($V_{P\gamma}$), при трении ($S_{P\gamma}$) и при термодинамическом нагружении ($V_{T\gamma}$), то пространственные меры поврежденности можно определить аналогично (11):

$$\omega_{T(ch)} = \frac{V_{T\gamma}}{V_0(1-D_T)}; \quad \omega_{\sigma(ch)} = \frac{V_{P\gamma}}{V_0(1-D_\sigma)}; \quad \omega_{\tau(ch)} = \frac{S_{P\gamma}}{S_k(1-D_\tau)}, \quad (14)$$

где V_0 , S_k – рабочие объемы.

И тогда критерий (10) запишем с учетом (14):

$$\Lambda_{M\backslash T} \left[\frac{V_{T\gamma}}{V_0(1-D_T)} + \Lambda_{\tau\sigma} \left(\frac{V_{P\gamma}}{V_0(1-D_\sigma)} + \frac{S_{P\gamma}}{S_k(1-D_\tau)} \right) \right] = 1. \quad (15)$$

Достоинство (15) состоит в том, что здесь учтено взаимодействие опасных объемов, обусловленных разными нагрузками, при формировании предельного состояния силовых систем. Кроме того, поскольку относительные опасные объемы определяются комплексом конструктивно-технологических и металлургических факторов, то этот комплекс факторов оказывается автоматически учтенным в критерии предельного состояния силовых систем.

В случаях, когда требуется учесть временные эффекты, критерии (10) и (12) записывают соответственно:

$$\int_0^t \left[\frac{a_T}{(1-D_T)} T_\Sigma(t) + \Lambda_{\tau\sigma} \left(\frac{a_\sigma}{(1-D_\sigma)} \sigma^2(t) + \frac{a_\tau}{(1-D_\tau)} \tau_w^2(t) \right) \right] \Lambda_{M\backslash T}(t) dt = U_0(t); \quad (16)$$

$$\int_0^t [\omega_{T(ch)}(t) + \Lambda_{\tau\sigma} (\omega_{\sigma(ch)}(t) + \omega_{\tau(ch)}(t))] \Lambda_{M\backslash T}(t) dt = 1, \quad (17)$$

где $U_0(t)$ – функция старения.

Заметим, что в критериях (4), (10) не было наложено никаких ограничений для величин $T_\Sigma > 0$, $\tau_w > 0$, $\sigma > 0$. Поэтому они могут описывать достижение предельного состояния не только при комплексном износоусталостном повреждении, но и при частных условиях нагружения, например, при чисто тепловом или чисто механическом разрушении.

Общий анализ этих критериев 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 и за счет увеличения только одного (любого) из нагрузочных параметров (при сохранении неизменными величин остальных параметров).

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

Последний вывод и есть результат принципиально нового подхода к построению критерия предельного состояния силовых систем.

Для практического применения критериев (4), (10) и (12) необходимо иметь обоснованные методики определения величин U_0 , a , Λ , D .

Выше был отмечен фундаментальный характер параметра U_0 . Если исходить из основных положений термофлуктуационной теории прочности [5-6], то U_0 следует трактовать как начальную энергию активации процесса разрушения. Там же было показано, что величина U_0 примерно совпадает с теплотой сублимации для металлов и кристаллов с ионными связями, а так же с энергией активации термодеструкции для полимеров [6],

$$U_0 \approx U_T.$$

С другой стороны, величина U_0 определяется как энергия активации механического разрушения

$$U_0 \approx U_M.$$

Следовательно, энергию U_0 можно считать константой вещества,

$$U_0 \approx U_M \approx U_T = \text{const.} \quad (18)$$

Принимая во внимание физико-механические и термодинамические представления о процессах разрушения [1-6], запишем (18) в виде:

$$U_M = s_k \frac{\sigma_{th} C_a}{E \alpha_V} = U_0 = k T_S \ln \frac{k \theta_D}{h} = U_T, \quad (19)$$

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

Согласно (19) приближенно можно принять [6]

$$U_0 \approx \varepsilon_* \frac{C_a}{\alpha_V}, \quad (20)$$

где $\varepsilon_* \approx 0,6$ – предельная деформация межатомной связи.

Из равенства (19) следует, что U_0 – энергия активации данного вещества, по порядку величины равная $1 \dots 10 \text{ эВ}$ в расчете на одну частицу, атом или молекулу ($\sim 10^2 \dots 10^3 \text{ кДж/моль}$), т.е. величина, близкая к энергии разрыва межатомной связи в твердом теле [1, 6]. Ее уровень не зависит от того, каким способом достигается разрушение – механическим, тепловым либо их совокупным действием. Методики экспериментального определения U_0 разработаны и хорошо известны [1, 2].

Из (19) устанавливается термомеханическая константа материала,

$$\frac{\sigma_{th}}{T_S} = E \frac{\alpha_V k}{C_a} \ln \frac{k \theta_D}{h} = \theta_\sigma. \quad (21)$$

Константа Сосновского θ_σ характеризует потерю прочности, приходящуюся на 1К.

Выводы. Таким образом, авторами разработан энергетический критерий работоспособности несущих элементов АСИПП-техники. Разработанный критерий носит универсальный характер для пар трения износостойкого взаимодействия.

Список литературы: 1. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526с. 2. Приймаков О.Г. Системне прогнозування працездатності несучих елементів авіаційних конструкцій: автореферат дис...докт.техн.наук. – Харків: вид. ПІМаш ім. А.М. Підгорного, 2007. – 38с. 3. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О. Теорія зносостійкої витривалості та застосування в машинобудуванні. – Харків: Оберіг, 2009. – 336с. 4. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О. Витривалість конструкційних матеріалів при абразивному зношуванні. –

Харків: Оберіг, 2009. – 383с. 5. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О., Приймаков Г.О. Прогнозування витривалості та загальної працездатності несучих елементів авіаційних конструкцій. – Харків: Оберіг, 2010. – 247с. 6. Сосновский Л.А. Сюрпризы трибофатики / Л.А. Сосновский, С.С. Щербаков. – Гомель: УО "БелГУТ", 2005. – 194с.

Поступила в редколлегию 09.03.2013

УДК 621.833.7: 614.84

Энергетический критерий работоспособности несущих элементов машиностроительных конструкций / А.Г. Приймаков, А.В. Устиненко // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПИ". – 2013. – №40(1013). – С.116-121. – Бібліогр.: 6 назв.

Розроблено енергетичний критерій працездатності несучих елементів аварійно-рятувальної, інженерної та протипожежної техніки з позицій трибофатики як основи проектування цієї техніки. Визначені параметри напружено-деформованого стану несучих елементів з допомогою енергетичного критерію.

Ключові слова: трибофатика, енергетичний критерій, пожежно-технічні засоби, основи проектування.

Developed energy efficiency criterion bearing elements emergency-rescue, engineering and fire-fighting equipment from the position as Tribo-Fatigue design principles of this technique. The parameters of the stress – strain state of carrier elements with the energy criterion.

Keywords: tribo-fatigue, energy criterion, fire-hardware, design principles.

УДК 621.833.7: 614.84

А.Г. ПРИЙМАКОВ, к.т.н., проф., доцент каф. ОТО АСР НУГЗУ, Харьков;

А.В. УСТИНЕНКО, к.т.н., доц., старший научный сотрудник каф. ТММ и САПР НТУ "ХПИ";

Д.Л. СОКОЛОВ, к.т.н., доцент каф. ОТО АСР НУГЗУ;

Е.Н. ГРИНЧЕНКО, к.т.н., доцент каф. ОТО АСР НУГЗУ

РАЗРАБОТКА МАНИПУЛЯТОРОВ С СИЛОВЫМИ ВОЛНОВЫМИ МЕХАНИЗМАМИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Предложены конструкции манипуляторов, содержащих силовые волновые механизмы с электро-механическими генераторами волн, обладающие свойствами прецизионного и безинерционного манипулирования. Такие конструкции могут быть использованы для проведения аварийно-спасательных работ в агрессивных средах без непосредственного присутствия человека.

Ключевые слова: манипулятор, несущий элемент, гибкое колесо, жесткое колесо, генератор волн, аварийно-спасательные работы.

Постановка проблемы. Согласно Концепции и Программы научного обеспечения деятельности Государственной службы Украины чрезвычайных ситуаций от 2012 года одним из основных направлений и задач научного обеспечения деятельности службы есть разработка и создание специальной, противопожарной, поисково-спасательной техники и средств спасения для оснащения подразделений ГСУ ЧС.

При современном развитии производства, военно-промышленного комплекса используются различные материалы, которые отличаются повышенной техногенной опасностью. При возникновении аварий техногенного характера образуются агрессивные среды, где присутствие человека физически невозможно. Поэтому на ГСУ ЧС возлагаются задачи по разработке и использованию роботизированной техники для ликвидации ЧС без непосредственного присутствия человека. Одним из вариантов такой техники являются манипуляторы для выполнения ряда задач по проведению аварийных работ в агрессивных средах. Такие манипулято-

© О.Г. Приймаков, О.В. Устиненко, Д.Л. Соколов, Е.М. Гринченко, 2013