го сжатых тел, разработанной Генрихом Герцем, доказано и показано, что минимальные напряжения при точечном зацеплении зубьев могут быть не только больше, но и меньше таковых, характерных для линейного взаимодействия зубьев.

Также впервые разработан практический метод расчета на контактную прочность зубчатых передач с точечным зацеплением эвольвентных зубьев.

Список литературы: 1. Патент №76881 на винахід. Україна. Зубчаста передача з модифікованими ніжками зубів / *Попов О.П.* – 20041210284; Заявл. 14.12.04; Опубл. 15.09.06. Бюл. №9. **2.** Патент №77304 на винахід. Україна. Зубчаста передача з криволінійними твірними зубів / *Попов О.П.* – а2004121281; Заявл. 14.02.04; Опубл. 15.11.06. Бюл. №11. **3.** Патент № 77634 на винахід. Україна. Зубчасте зачеплення / *Попов О.П.* – а20041210280; Заявл. 14.12.04; Опубл. 15.12.06. Бюл. №12. **4.** Патент № 81008 на винахід. Україна. Зубчаста передача Попова О.П. з точковою і двопарною системою зачеплення евольвентних зубів / *Попов О.П.* – а200507850; Заявл. 08.08.05; Опубл. 26.11.07. Бюл. №19. **5.** Патент №84606 на винахід. Україна. Зубчаста передача з рівноміцним зачепленням евольвентних зубів / *Попов О.П.* – а200611795; Заявл. 09.11.06; Опубл. 10.11.08. Бюл. №21. **6.** *Попов А.П.* Зубчатые 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 "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПІ". – 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

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

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].

Гипотеза Сосновского о предельном состоянии силовой системы имеет вид:

$$\Phi\left(U^{eff}_{\sigma(ch)}, U^{eff}_{\tau(ch)}, U^{eff}_{T(ch)}, \Lambda_{i\backslash j}, m_k, U_0\right)=0, \qquad (1)$$

где m_k, k=1, 2, …, – 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

$$\Phi\left(\sigma^2, \tau_W^2, T, \Lambda_{\sigma\backslash\tau}, \Lambda_{T\backslash M}, m_k, U_0\right)=0, \qquad (2)$$

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

$$U^{eff}_{T}=a_T T; \quad U^{eff}_{\sigma}=a_\sigma\sigma^2; \quad U^{eff}_{\tau}=a_\tau\tau_W^2, \qquad (3)$$

где коэффициенты a<<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

$$\Sigma U^{eff}=U^{eff}_{T}+U^{eff}_{\sigma}+U^{eff}_{\tau}=a_T T_\Sigma+a_\sigma\sigma^2+a_\tau\tau_W^2=U_K, \qquad (4)$$

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:

$$U^{eff}_{\Sigma}=\Lambda_{M\backslash T}\left[a_T T_\Sigma+\Lambda_{\tau\backslash\sigma}\left(a_\sigma\sigma^2+a_\tau\tau_W^2\right)\right]=U_0, \quad \Lambda\leqq 1. \qquad (5)$$

Здесь $\Lambda_{\tau/\sigma}$ учитывает взаимодействие эффективных частей механической энергии, обусловленных нормальными σ и фрикционными τ_W напряжениями, а $\Lambda_{M/T}$ – 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:

$$a_T\cdot T_\Sigma=U_0; \qquad (6) \qquad\qquad \Lambda_{\tau\backslash\sigma}\left(a_\sigma\sigma^2+a_\tau\tau_W^2\right)=U_0\,. \qquad (7)$$

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

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

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

$$\Lambda_{M\backslash T}=\left(a_T T_\Sigma+a_\tau\tau_W^2\right)=U_0\,. \qquad (9)$$

Для конкретизации задачи (4) следует указать способ учета влияния электрохимических процессов на повреждаемость силовой системы. Введем параметр $0\le D\le 1$, 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]:

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

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*):

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

Тогда критерий (10) принимает вид

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

или

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

где энергетическая мера комплексного износоусталостного повреждения

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

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 ($0 \le \omega \le 1$) 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):

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

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:

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

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

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],

$$U_0 \approx U_\text{T}.$$

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

$$U_0 \approx U_\text{M}.$$

Следовательно, энергию U_0 можно считать константой вещества,

$$U_0 \approx U_\text{M} \approx U_\text{T} = \text{const}. \qquad (18)$$

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

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

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]

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

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...10эВ в расчете на одну частицу, атом или молекулу ($\sim 10^2 ... 10^3$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 совокуп-

ным действием. Методики экспериментального определения U_0 разработаны и хорошо известны [1, 2].

Из (19) устанавливается термомеханическая константа материала,

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

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

Выводы. Таким образом, авторами разработан энергетический критерий работоспособности несущих элементов АСИПП-техники. Разработанный критерий носит универсальный характер для пар трения износоконтактного 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. ІПМаш ім. А.М. Підгорного, 2007. – 38с. **3.** *Приймаков О.Г., Градиський Ю.О.* Теорія зносостійкої витривалості та и 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 "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПІ". – 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 электромеханическими 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.