

УДК 539.538

ОСНОВИ І ЕЛЕМЕНТИ МЕХАНОТЕРМОДИНАМІКИ

Сосновский Л.О., д.т.н., проф.¹⁾, Приймаков О.Г., к.т.н., проф.²⁾,
Градиський Ю.О., к.т.н., доц.³⁾

¹⁾ Інститут проблем міцності НАН України, м. Київ,

²⁾ Харківський національний університет будівництва і архітектури,

³⁾ Харківський національний технічний університет сільського господарства
імені Петра Василенка

В статті розглянуто трибофатичну ентропію довільної силової механічної системи, і через неї отримано тензор міри пошкоджуваності для консервативних і дисипативних напружень цих систем. Створено схеми можливих кінетичних процесів незворотних механічних пошкоджень.

Вступ. Розвиток сучасної техніки поставив перед наукою актуальну проблему комплексної оцінки надійності силових систем. Одною з відповідей на цей заклик і стала трибофатика – наука про зносовтомні пошкодження (wear-fatigue damage) і руйнування силових систем (active system) машин і устаткування (ГОСТ 30638-99) [1, 2].

Активний розвиток трибофатики [2-4], дозволив впритул підійти до формування елементів і основ механотермодинаміки – нової науки, що вивчає трибофатичну ентропію, породжувану в механічній силі системі. Принципова відмінність трибофатичної ентропії від класичної термодинамічної ентропії полягає в тому, що остання є характеристика розсіювання (дисперсії) енергії, а трибофатична ентропія – характеристика її поглинання [2, 3].

Аналіз досліджень. Аналіз літературних джерел та предметних сайтів Інтернету показує, що дана науково-технічна проблема розв'язується в такій постановці вперше.

Метою даної статті є формування основ сучасної механотермодинаміки і розробка її основних елементів.

Результати досліджень. Так як силова система реально працює в навколишньому середовищі, то для повного аналізу її стану необхідно

розглянути термомеханічні критеріальні рівняння механотермодинамічних систем. Такими є переважна більшість силових систем середнього машинобудування. Як відомо, для опису стану термодинамічних систем використовують функції

$$U = U(T, V, N_k) \quad \text{або} \quad S = S(T, V, N_k), \quad (1)$$

в яких температура T , об'єм V , число молів хімічних компонентів N_k - макроскопічні змінні стану.

На рис. 1 показано формування поверхонь і функції ω_S в зв'язку зі зміною визначальних параметрів. В загальному випадку відкритої системи зміна dU внутрішньої енергії U представляється у вигляді

$$dU = dQ + dA + dU_{sub} = TdS - pdV + \sum_1^n \mu_k dN_k, \quad (2)$$

де dQ - кількість тепла; dA - кількість механічної енергії; dU_{sub} - кількість речовини, якою система обмінялася з навколишнім середовищем за інтервал часу dt ; p - тиск; μ_k - хімічні потенціали.

Планк особливо підкреслював, що у формулі (2) dU є нескінченно мала різниця, тоді як dQ , dA , dU_{sub} малі кількості.

З (2) випливає, що зміна ентропії

$$dS = \frac{dU + pdV}{T} - \frac{1}{T} \sum_1^n \mu_k dN_k. \quad (3)$$

Таким чином, в термодинаміці ентропія S - це міра незворотного розсіювання енергії, яка характеризує стан системи з погляду її внутрішньої впорядкованості, або структури.

Збільшення ентропії (3), по Пригожину, може бути представлено як сума її зміни $d_e S \geq \leq 0$, обумовленої обміном системи енергією і речовиною із зовнішнім середовищем, і зміни $d_i S \geq 0$, обумовленої незворотними процесами всередині системи:

$$dS = d_e S + d_i S. \quad (4)$$

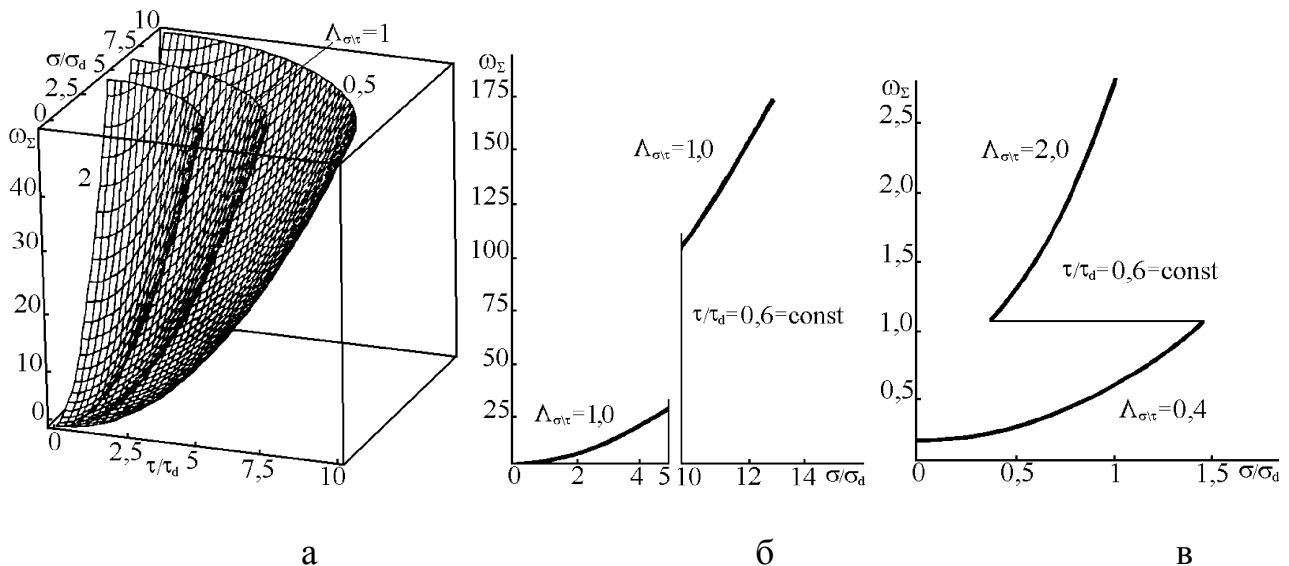


Рис. 1. Формування поверхонь (а) і функції (б, в) пошкодження ω_Σ у зв'язку зі зміною визначальних параметрів ($\sigma/\sigma_d > 0$, $\tau/\tau_d > 0$, $\Lambda_{\sigma/\tau} > 0$); $\Lambda_{\sigma/\tau}$ – ступінь незворотності пошкодження [1, 2]

В (3) і (4) не беруться до уваги багато процесів, наприклад, зміна внутрішньої енергії при пошкодженні, рухомих і деформованих твердих тіл і силових систем. А обмін речовиною розглядається лише в результаті таких процесів, як дифузія і хімічні реакції, тоді як обмін речовиною при поверхневому зношуванні й об'ємному (наприклад, втомному) руйнуванню не враховується. Тому виникає завдання про оцінку зміни ентропії в зв'язку з розвитком різноманітних явищ пошкоджуваності. Такі явища характерні, наприклад, для систем, що містять рухомі й деформовані об'єкти.

Прийmemo узагальнене уявлення [4, 5] про те, що пошкодження є зміна складу, будови, структури, розмірів, форми, об'єму, маси, суцільності і, отже, відповідних механо-фізико-хімічних та інших властивостей об'єкта. В остаточному підсумку, пошкодження пов'язують з порушенням суцільності і цілісності тіла, аж до його розкладання (наприклад, на атоми) [6]. Таким чином, пошкоджуваність трактується як фундаментальна властивість (і обов'язок) рухомих і деформованих систем, а руйнування розглядається як специфічний тип пошкодження - відповідне порушення їх суцільності і цілісності.

Трактування руйнування як одного з видів (нехай і найважливішого) пошкодження далеко безперечне і, звичайно, може викликати заперечення. Але воно приймається нами в першому наближенні як засіб для досягнення поставленої мети.

В [2] показано, що для силових систем незворотна пошкоджуваність ω_Σ є функція ефективних механічної U_M^{eff} , теплової U_T^{eff} і електрохімічної U_{ch}^{eff} енергій, при цьому розділяється механічна енергія, обумовлена зміною розмірів тіла (U_σ^{eff}), і механічна енергія, обумовлена зміною його форми (U_τ^{eff}):

$$\omega_{\Sigma} = \omega_{\Sigma}(U_{\sigma}^{eff}, U_{\tau}^{eff}, U_T^{eff}, U_{ch}^{eff}) = \omega_{\Sigma}(\sigma^2, \tau_w^2, T_{\Sigma}, v_{ch}(m_v), \Lambda_{\sigma/p}, \Lambda_{T/M}) = \omega_{\Sigma}(U_{\Sigma}^{eff}). \quad (5)$$

Оскільки внутрішні незворотні пошкодження термомеханічної природи виникають внаслідок зміни ефективної енергії в небезпечному об'ємі системи, то в загальному випадку

$$dU_{\Sigma}^{eff} = \omega_{\Sigma} dW_{P\gamma}, \quad (6)$$

де $dW_{P\gamma}$ - елементарний небезпечний об'єм.

Тоді, відповідно до (2) – (4) можна ввести уявлення про трибофатичну ентропію, зміна якої

$$(d_i S)_{TF} = \frac{1}{T_{\Sigma}} \omega_{\Sigma} dW_{P\gamma}. \quad (7)$$

Таким чином, ентропія (7) служить мірою незворотного поглинання енергії U_{Σ}^{eff} в небезпечному об'ємі $W_{P\gamma}$ силової системи. Покажемо аналогію уявлень про трибофатичну і термодинамічну ентропію.

Згідно з термодинамікою в загальному випадку незворотна зміна ентропії $d_i S$ пов'язана з потоком деякої величини X (наприклад, теплоти або речовини):

$$d_i S = F dX,$$

де F - термодинамічна сила.

Так, при розширенні газу в поршневому двигуні тиск в об'ємі газу (p_1) завжди більший, ніж тиск на поршень (p_2). Тоді різниця ($p_1 - p_2$) характеризує градієнт тиску і представляє собою ту силу на одиницю площі, яка переміщає поршень. У випадку $T = \text{const}$ незворотне збільшення ентропії [1, 2]

$$(d_i S)_T = \frac{p_1 - p_2}{T} dV > 0.$$

Тут $(p_1 - p_2) / T$ відповідає термодинамічній силі (F), а dV характеризує сполучений з нею термодинамічний потік (dX).

Якщо ω_1 - концентрація пошкоджень в точці твердого тіла з напруженнями (p_1), а ω_2 - концентрація пошкоджень при зміні напруження $p_2 > < p_1$, то $\omega_1 > < \omega_2$, тобто виявляється градієнт пошкоджень, що характеризується різницею ($\omega_1 - \omega_2$), яка сполучена з величиною небезпечного об'єму $W_{P\gamma}$.

Тоді незворотне збільшення трибофатичної ентропії в точці твердого тіла при $T_{\Sigma} = \text{const}$

$$(d_i S)_{TF} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{T_\Sigma} dW_{P\gamma} > 0.$$

Таким чином, тут $(\omega_1 - \omega_2) / T_\Sigma$ - відповідає термомеханічній силі (F), оскільки $\omega_1 \sim p_1$ і $\omega_2 \sim p_2$, а $dW_{P\gamma}$ характеризує сполучений з нею термомеханічний потік (X).

Тепер розглянемо відкриту термодинамічну систему, що містить тверде тіло, яке пошкоджується; це - механотермодинамічна система. Повна зміна ентропії в такій системі, мабуть, визначається сумою (3) і (7)

$$(dS)_T + (d_i S)_{TF} = \frac{dU + \Delta p dV}{T} - \frac{1}{T} \sum_1^n \mu_k dN_k + \frac{1}{T_\Sigma} \int \omega_\Sigma dW_{P\gamma} \quad (8)$$

термодинамічної і трибофатичної ентропії. Тут термодинамічній ентропії (3) приписаний індекс T , при цьому враховано, що $\Delta p dV = (p_M - p)dV$, $p_M dV$ - механічна енергія, що надходить в систему із зовнішнього середовища. А елементарна трибофатична ентропія (7) визначена для всього небезпечного об'єму (інтегруванням по W). Якщо $\omega_\Sigma = 0$, то (8) зводиться до (2).

Функція (8) механотермодинамічного стану принципово відрізняється від функції термодинамічного стану: перше допускає аналіз будь-якого стану системи, тому що в загальному випадку $0 \leq \omega_\Sigma \leq \infty$. Отже, згідно (8) саме зростання виробництва трибофатичної ентропії (7), обумовлене термомеханічним станом системи, може привести її і до руйнування, і до розкладання; в термодинамічній функції (3) про подібні стани мови не йде. Але не можна не визнати, що стан будь-якої системи в чималому ступені залежить, наприклад, від того, зруйнується чи ні деякий елемент, що в ній утримується. А він повинен зруйнуватися, якщо виробництво ентропії в ньому стане критичним. Проблема критичних і закритичних рівнів ентропії, обумовлених пошкодженням і руйнуванням систем, поки не досліджена [1].

Таким чином, процеси незворотного пошкодження в небезпечному об'ємі силової системи породжують трибофатичну ентропію, зміна якої припиняється тільки після загибелі системи.

Узагальнюючи, запишемо (7) через тензор L_{ω_Σ} пошкоджень системи [2]

$$(d_i S)_{TF} = \frac{L_{\omega_\Sigma}}{T_\Sigma} dW_{P\gamma}, \quad (9)$$

$$L_{\omega_\Sigma} = \begin{vmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \omega_{23} \\ \omega_{31} & \omega_{32} & \omega_{33} \end{vmatrix}, \quad (10)$$

який може складатися з такого числа компонентів (ω), яке відповідає числу врахованих компонентів тензора напружень, що впливають на зміну стану пошкодження системи.

Тепер відоме зведення [1, 2] термодинамічних потоків і сил в деяких часто спостережуваних процесах можна доповнити уявленням про трибофатичну ентропію (таблиця 1).

Таблиця 1. Термодинамічні потоки і сили в деяких часто спостережуваних необоротних процесах

Явище	Потік	Сила	Характер
Теплоперенос	Тепловий потік, J_{th}	$\nabla(1/T)$	Вектор
Дифузія	Потік маси компонента i , $J_{d,i}$	$-\left[\nabla(\mu_i/T) - F_i\right]$	Вектор
В'язкий плин	Дисипативна частина тензора тиску, P	$\nabla v(1/T)$	Тензор 2-го рангу
Хімічна реакція	Швидкість реакції ρ , ω_ρ	Спорідненість реакції, ділена на T , A_ρ/T	Скаляр
Пошкодження	Потік пошкоджень, $J_{W_{P\gamma}}$	$L_{\omega_\Sigma}(1/T_\Sigma)$	Тензор 2-го рангу

T - температура; μ_i - хімічний потенціал компонента i ; F_i - зовнішня сила, що діє на одиницю маси компонент i ; v - гідродинамічна швидкість.

Спорідненість A_ρ пов'язана з μ_i співвідношенням

$$A_\rho = -\sum_i \nu_{i\rho} \mu_i,$$

де стехіометричні коефіцієнти ν_i дають повне число молекул, що утворюються ($\nu > 0$) або зникаючих ($\nu < 0$) в реакції

Таким чином, внутрішнє незворотне пошкодження - фундаментальна властивість і обов'язок рухомої і деформованої системи, а трибофатична ентропія (7), (9) є захід поглинання енергії, що витрачається на генерування і розвиток таких пошкоджень. Трибофатична ентропія породжується як в силовий, так і в механотермодинамічній системі. Модель (8) як і (7), (9), прогнозує загибель системи (наприклад, шляхом її розкладання на атоми), якщо вона еволюціонує по станах пошкодження (5), описаних в таблиці 1. Аналіз еволюції такого типу даний в роботі [2].

Нагадаємо, що в механіці суцільного середовища [2, 3] тензор напружень розкладають на дві частини

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(c)} + \sigma_{ij}^{(d)}, \quad (11)$$

де індекс (c) вказує тензор консервативних напружень, а індекс (d) - тензор дисипативних напружень.

Тоді, провівши відповідний енергетичний аналіз, одержують термомеханічну функцію

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{T} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{\rho T} \sigma_{ij}^{(d)} \dot{\varepsilon}_{ij}, \quad (12)$$

де dq / dt - швидкість припливу тепла до середовища на одиницю маси;
 $\frac{1}{\rho} \sigma_{ij}^{(d)} \dot{\varepsilon}_{ij}$ - швидкість дисипації енергії в одиниці маси (ρ - щільність середовища).

Рівняння (12) справедливо лише для суцільного середовища. Якщо суцільність деформованого твердого тіла порушується, воно не може бути використане, тобто воно не здатне описувати поза межні (закритичні) стани системи. В цьому - принципова відмінність між рівняннями (12) і (8).

Взаємозв'язок руху, пошкодження та інформації Було показано, що процеси незворотного пошкодження в механотермодинамічній системі породжують трибофатичну ентропію. Це означає, що повинен існувати зв'язок між рухом і пошкодженням - з однієї сторони. З іншого боку, представляється очевидним, що пошкодження системи, що рухається, змінює її інформаційний стан. Отже, виникає спільне завдання про пошук взаємозв'язку

$$Mot \Leftrightarrow Inf \Leftrightarrow Dam, \quad (13)$$

в якому *Mot* означає рух, *Inf* - інформацію, а *Dam* - пошкодження.

Будемо конкретизувати завдання (13) послідовно.

Спочатку знайдемо функцію взаємозв'язку руху та інформації, тобто

$$Mot \Leftrightarrow Inf. \quad (14)$$

В загальному випадку функція перетворення руху має вигляд

$$\dot{X} = F(t, X, U), \quad (15)$$

де U - вектор-функція керування.

Дамо розв'язок завдання (14) стосовно до некерованих лінійних стаціонарних динамічних систем. Для таких систем математична модель (15) стає найпростішою:

$$\dot{X} = BX, \quad (16)$$

де матриця розмірності $n \times n$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix},$$

тренд tr матриці B

$$tr B = b_{11} + b_{22} + \dots + b_{nn}.$$

Для системи (16) функціонал перетворення інформації Вавилова приводиться до наступного виразу:

$$\log_2 P(0, X(0)) - \log_2 P(T, X(T)) = k \int_0^T tr B dt, \quad (17)$$

де $k = \ln 2$ - постійна.

Якщо в (17) звільнити момент часу T , тобто покласти $T = t$, то замість (17) в розгляд можна ввести інформаційну функцію динамічної системи

$$\Delta I - I_2 - I_1 = -k tr B \times t. \quad (18)$$

Функція Вавилова - Приймакова (18) і є розв'язок завдання (14): вона характеризує перетворення інформації в найпростішій динамічній системі (16) при її переході з одного стану в інший.

Тепер для того, щоб конкретизувати (13), залишилося дослідити пошкоджуваність системи в часі. Будемо вважати, що основні типи кінетичних процесів пошкодження $\omega_{\Sigma t}$ об'єкта (твердого тіла, силової системи) можна описати найпростішим степеневим рівнянням [1, 6]:

$$\omega_{\Sigma t} = \left[1 - \left(1 - \frac{t}{T_{\otimes}} \right)^h \right]^q, \quad (19)$$

де T_{\otimes} - ресурс (довговічність); $h \geq 1$, $q \geq 1$ - параметри.

В [5, 6] зазначене: якщо $h \geq 1$, $q = 1$, то переважними виявляються явища втрати міцності матеріалу (опукла крива на рис. 2), а при $q > 1$, $h = 1$ - навпроти, явища зміцнення (увігнута крива на рис. 2). При $h = 1$, $q = 1$ система стабільна (пунктир на рис. 2). В загальному ж випадку $h > 1$, $q > 1$ процеси її зміцнення-втрати міцності визначаються співвідношенням параметрів h / q і описуються більш складними (S -подібними) кривими.

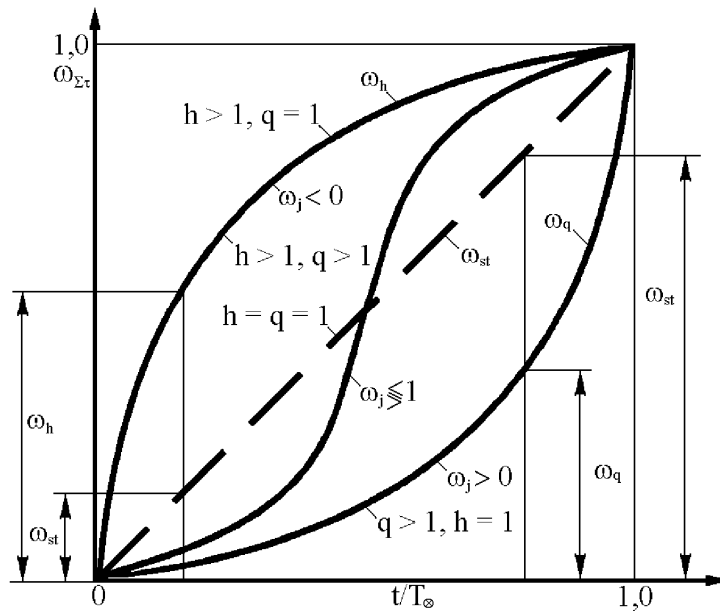


Рис. 2. Схеми можливих кінетичних процесів незворотних пошкоджень

Для будь-якого фіксованого моменту часу $t/T_{\infty} = \text{const}$ введемо єдину характеристику систем - індекс пошкоджуваності

$$\omega_j(t) = \omega_{st} - \omega_{\Sigma t}, \quad (20)$$

де $\omega_{\Sigma t} = \omega_h$ або $\omega_{\Sigma t} = \omega_q$ є рівень пошкоджуваності реальної системи, а ω_{st} - відповідний їй рівень пошкодження деякої ідеальної системи.

Тоді виявляється, що значення індексу (20) можуть становити три характерні класи: $\omega_j > 0$; $\omega_j < 0$ і $\omega_j = 0$ (див. рис. 2). Підсумовуючись індекс пошкоджуваності за часом, рівняння (18) можна продовжити так:

$$\Delta I(t) = -k \text{tr} B t = a_s \sum \omega_j(t), \quad (21)$$

де a_s - перехідна функція.

Це і є розв'язок завдання (13).

Висновки: в основі механотермодинаміки лежить явище тропі, як і для трибофатики, а розрахунковою основою служить “видалення” зайвих об’ємів і визначення міри пошкодження; комбінація механотермодинамічної ентропії з внутрішньою енергією силової системи визначають начала механотермодинаміки; теорія зносостійкої витривалості є основною, ключовою частиною трибофатики; комбінація трибофатики з механотермодинамікою дозволяє визначити інтегральну надійність силових механічних систем.

Список використаних джерел

1. Сосновский Л.А. Механика износоусталостного повреждения. – Гомель: изд. БелГУТ, 2007. – 434 с.
2. Богданович А.В. Методика прогнозирования долговечности силовых систем по критериям износоусталостного повреждения. – Заводская лаборатория. – 2002. – № 68. – С. 47 – 51.
3. Приймаков О.Г. Системне прогнозування працездатності несучих елементів авіаційних конструкцій. - Автореферат дис. ... докт. техн. наук. - Харків: вид. ПМаш ім. А.М. Підгорного, 2007. - 38 с.
4. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О. Теорія зносостійкої витривалості та її застосування в машинобудуванні. - Харків: Оберіг, 2009. - 336 с.
5. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О. Витривалість конструкційних матеріалів при абразивному зношуванні. - Харків: Оберіг, 2009. - 383 с.
6. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О., Приймаков Г.О. Прогнозування витривалості та загальної працездатності несучих елементів авіаційних конструкцій. - Харків: Оберіг, 2010. - 247 с.

Аннотация

ОСНОВЫ И ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАНОТЕРМОДИНАМИКИ

Сосновский Л.А., Приймаков А.Г., Градыский Ю.А.

В статье рассмотрено трибофатическую энтропию произвольной силовой механической системы, и через нее получено тензор меры повреждаемости для консервативных и диссипативных напряжений этих систем. Созданы схемы возможных кинетических процессов необратимых механических повреждений.

Abstract

BASES AND ELEMENTS MECHANOTHERMODYNAMICS

Sosnovskij L.A., Prijmakov A.G., Gradyskij J.A.

In article it is considered tribofatigue entropy of any power mechanical system, and through it is received a tensor of a measure of damageability for conservative and dissipative pressure of these systems. It is created schemes of possible kinetic processes of irreversible mechanical damages.