

МЕХАНОТЕРМОДИНАМИКА, ТЕОРИЯ ЕДИНОЙ МЕХАНИКИ И ТРИБОЛОГИЯ: ОБЩИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ЭНТРОПИИ

¹Щербаков С. С., ²Сосновский Л. А., ³Басаран К.

¹Белорусский государственный университет, Минск

²Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

³Университет штата Нью-Йорк в Буффало, Буффало

Применение энтропии при описании повреждений. Значение понятия об термодинамической энтропии, введенной в XIX веке, сегодня трудно переоценить [1–15]. В табл. 1 и 2 дано основательное тому подтверждение [16].

Термодинамическая энтропия есть характеристика рассеяния энергии, или мера «бесполезной работы» (см. табл. 1). А между тем понятно, что другая составляющая полной энергии, подведенной к системе, – энергия, поглощенная средой, т. е. мера «полезной работы» имеет несравнимо большее практическое значение, ибо она инициирует зарождение и развитие повреждений в системе, которые в определенных условиях неизбежно ведут ее к критическому состоянию, например, усталостной поломке или к предельному износу. Но задача определения такой меры до нашего времени решена не была, и специалисты вынуждены были использовать то, что есть. Так, в свое время Карно ввел представление о коэффициенте полезного действия тепловых машин, изучая преобразования полной энергии в цикле работы.

Для решения данной задачи в механике повреждений и теории единой механики Басараном и др. [17–26] предложен подход к оценке параметра повреждения на основе показателя неупорядоченности W , связанного с удельной (к единице массы) энтропией s :

$$D = D_{cr} \frac{W}{\Delta W} = D_{cr} \left[1 - e^{-\frac{m_s}{R}(s-s_0)} \right], \quad (1)$$

где удельная энтропия

$$s = \frac{R}{m_s} \ln W, \quad (2)$$

записана по аналогии с энтропией по Больцману $S = k_0 \ln W$; m_s – удельная масса; R – газовая константа.

В трибологии [27–39] подобная задача решается давно и, как кажется, тоже успешно. В этих работах исследовано влияние процессов трения и износа в системе двух твердых тел на изменение термодинамической энтропии S_i . Его производство формулируется как сумма термодинамических сил X_j^k и термодинамических потенциалов J_j^k в виде

$$\frac{d_i S}{dt} = \sum_j \sum_k \left(\frac{\partial_i S}{\partial p_j} \frac{\partial p_j}{\partial \zeta_j^k} \right) \frac{\partial \zeta_j^k}{\partial t} = \sum_j \sum_k X_j^k J_j^k. \quad (3)$$

Брайант и др. предложили концепцию деградации пар трения:

$$\frac{dw}{dt} = \sum_j \sum_k \left(\frac{\partial w}{\partial p_j} \frac{\partial p_j}{\partial \zeta_j^k} \right) \frac{\partial \zeta_j^k}{\partial t} = \sum_j \sum_k Y_j^k J_j^k. \quad (5)$$

Многочисленные частные компоненты энтропии в многообразных процессах трения представлены в табл. 3.

Таблица 1 – Некоторые «энтропийные» закономерности

<p>Всякий раз, когда существует разность температур, может быть произведена движущая сила (С. Карно)</p>
<p>Увеличение энтропии отличает будущее от прошлого, поэтому существует стрела времени</p>
<p>Теплота не может самопроизвольно переходить от более холодного тела к более нагретому (Р. Клаузиус)</p>
<p>Построить вечный двигатель невозможно</p>
<p>Энтропия Вселенной стремится к максимуму (Р. Клаузиус)</p>
<p>Прогнозируется «тепловая смерть» Вселенной (Гельмгольц)</p>
<p>Сумма изменений энтропии системы и внешней среды не может убывать</p>
<p>Для любого необратимого процесса энтропия должна увеличиваться (неравенство Клаузиуса), тогда как для обратимого процесса она остается постоянной (равенство Клаузиуса)</p>
<p>При температуре абсолютного нуля энтропия любого химически однородного твердого или жидкого тела принимает нулевое значение (Нернст)</p>
<p>Энтропию порождают необратимые процессы</p>
<p>Необратимые процессы являются источником порядка внутри системы</p>
<p>Состояние равновесия характеризуется либо минимумом (ноль) производство энтропии, либо максимумом энтропии</p>
<p>Низкий энтропийный порядок постепенно, но неуклонно вырождается в хаос, поскольку Вселенная стремится к термодинамическим равновесию</p>
<p>Необратимые процессы приводят к новым пространственно-временным структурам, которые играют фундаментальную конструктивную роль</p>
<p>Необратимые процессы, происходящие с ростом энтропии, соответствует эволюции к наиболее вероятным состояниям</p>
<p>Существуют ли в природе обратимые процессы или не существуют, априори не очевидно (Планк)</p>
<p>Гипотеза локального равновесия: термодинамические переменные можно рассматривать как функции положения в пространстве и времени</p>
<p>Термодинамические потоки вызываются термодинамическими силами</p>
<p>Идет ли речь об изолированных, закрытых или открытых системах, всегда выполняется неравенство $d_i S \geq 0$</p>
<p>В состоянии равновесия все необратимые процессы прекращаются</p>
<p>Энтропия, «вытекающая» из системы, всегда больше, чем энтропия, поступающая в систему; разность возникает из-за энтропии, производимой необратимыми процессами внутри системы</p>
<p>Необратимые процессы служат той движущей силой, которая создает порядок</p>
<p>Системы, обменивающаяся энтропией с внешней средой, не просто увеличивают энтропию внешней среды, но могут претерпевать весьма сильные спонтанные преобразования, переходя в режим «самоорганизации»</p>
<p>Эволюция к состоянию равновесия характеризует не теплота химической реакции, а другая термодинамическая величина – «свободная энергия» Гиббса</p>
<p>Энтропия охватывает все аспекты превращения вещества: изменение энергии, объема и химического состава. следовательно, любая система в природе, будь то газ, водный раствор или живая клетка, характеризуется некоторой энтропией</p>
<p>Порядок может поддерживаться только с помощью самоорганизации. Самоорганизующиеся системы делают возможной адаптацию к превалирующей окружающей среде</p>
<p>Увеличение энтропии отличает будущее от прошлого, поэтому существует стрела времени</p>
<p>Без необратимых процессов жизнь была бы невозможной</p>

Общее содержание изложенных решений таково. Мера рассеяния энергии – термодинамическая энтропия приравнивается фактически к мере поврежденности трибологической системы по многим и разным физико-механо-химическим параметрам.

По нашему мнению, более предпочтителен и обоснован следующий простой подход: многочисленные и разнообразные процессы необратимой повреждаемости корректно связывать с трибофатической энтропией S_{TF} :

$$S_{TF} = \sum_1^n \omega_i, \quad i = 1, \dots, n. \quad (5)$$

Напомним, что трибофатическая энтропия S_{TF} определяется энергией, поглощаемой в системе [40–46]. Именно она расходуется на возникновение, развитие и накопление необратимых повреждений в любых системах. И именно она ведет к новому пониманию второго закона термодинамики: трибофатическая энтропия возрастает неограниченно: $S_{TF} \rightarrow \infty$ [40–43]. Таким образом, классическая формулировка второго закона термодинамики (энтропия Вселенной стремится к максимуму) заменяется современными физическими и философскими воззрениями [48].

Таблица 2 – Понятие об энтропии в различных разделах науки (аддитивные системы)

Р. Клаузиус	Термодинамика $dS = \frac{\delta Q}{T} = \frac{1}{T}(dU + pdV) \geq 0$	[1, 2]
Дж. Гиббс	Химическая термодинамика $dS = \frac{1}{T} \sum_1^n \mu_k dN_k \geq 0$	[11]
Л. Больцман, А. Эйнштейн	Статистическая механика $S = k \log W;$ $P(\Delta S) = Ze^{-\Delta S/k}$	[2, 7]
П. Ковиней	Классическая динамика $\int_{\Gamma} d\mu_r M \rho_r$	[12]
Дж. фон Нейман	Квантовая механика $S = -k_B \cdot tr(\rho \log \rho)$	[13]
Л. Седов, Дж. Мейз	Механика сплошной среды $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(e)} + \sigma_{ij}^{(d)};$ $\frac{dS}{dt} = \frac{1}{T} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{\rho T} \sigma_{ij}^{(d)} \dot{\epsilon}_{ij}$	[14, 15]
К. Шеннон	Информатика $H(X) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log p(x_i),$	[9]

Конечно, здесь возникает и еще одна сложная задача. Многочисленные (множественные) необратимые повреждения (трибологические, усталостные, коррозионные, химические и мн. др.) развиваются в единой области, критическое состояние которой достигается не вследствие простого суммирования необратимых повреждений, обусловленных нагрузками разной природы, а в результате их сложнейших диалектических неаддитивных взаимодействий [49].

Таблица 3 – Сводка составляющих энтропии в процессе трения

$\Delta S' = \frac{\gamma}{T_m} \Delta A_S$	(6)	<p>Адгезия поверхностей и пленок, связанная с адгезионным износом и адгезионным трением, с изменением энтропии. Здесь поверхностная энергия интерфейса γ – это работа на единицу площади для создания новой площади поверхности ΔA_S и T_m – локальная температура среды.</p>
$\Delta S' = \frac{U_c}{T_m} \Delta V$	(7)	<p>Пластическая деформация, связанная с абразивным износом, фрикционной вспашкой и/или резанием, с изменением энтропии. Здесь U_c – это работа (пластическая деформация или резание) затрачено на единицу затронутого объема ΔV, а T_m – температура воздействующей материальной среды.</p>
$\Delta S' = \frac{G - 2\gamma_o}{T_{cr}} da$	(8)	<p>Разрушение, связанное с усталостным износом и повреждением поверхности, с изменением энтропии. Здесь a – длина трещины, $G = -\partial U_S / \partial a$ – скорость выделения энергии, зависящая от энергии деформации U_S, γ_o – поверхностная энергия, а T_{cr} – температура треснувшего материала на вершине трещины.</p>
$\Delta S' = \frac{\Delta H}{T_{phase}}$	(9)	<p>Фазовые переходы, связанные с поверхностным плавлением и перекристаллизацией металлов, с изменением энтропии. Здесь ΔH – изменение энтальпии – скрытого тепла, поглощенного или пролитого во время фазового перехода, а T_{phase} – температура, связанная с фазовым переходом.</p>
$\Delta S' = \frac{\bar{A}}{T_{cr}} d\xi,$ $\bar{A} = \sum_{\text{reactants}} \kappa_i \eta_i - \sum_{\text{products}} \kappa_i \eta_i$	(10)	<p>Химические реакции, связанные с химическим и окислительным износом, с изменением энтропии. Здесь химическое сродство A зависит от химических потенциалов η_i и стехиометрических коэффициентов κ_i реакции. Поскольку стехиометрия реакции связывает изменения молярных масс dN'_i реагентов и продуктов, степень реакции ξ имеет дифференциальное изменение $d\xi = \pm dN'_i / \kappa_i$, где минус относится к реакциям, а плюс – к продуктам.</p>
$\Delta S' = -R \sum_i^n \frac{N_i}{N} \ln \frac{N_i}{N},$ $N = \sum_i^n N_i$	(11)	<p>Смешивание, которое для трибологии включает в себя смешивание материала третьего тела [22, 23], захваченного между поверхностями, с молярным изменением энтропии. Здесь R – универсальная газовая постоянная, N_i – молярные массы n видов, а соотношения N_i/N – молярные доли.</p>
$\Delta S' = \left(\frac{1}{T_l} - \frac{1}{T_h} \right) dQ$	(12)	<p>Теплопередача, связанная с диффузией тепла dQ из области более высокой температуры T_h в область более низкой температуры T_l, с изменением энтропии.</p>

$\frac{d_i S}{dt} = \frac{(pu)^2 \mu^2 A^2}{kT^2} + \frac{\gamma_D (\nabla \varphi)^2}{T}$	(13)	<p>Для двух диссипативных процессов: трения с силами $X_1 = -\nabla T/T^2$ и потоками $J_1 = -k\nabla T = \mu N u$; и диффузии с $X_2 = -\nabla \varphi/T$ и $J_2 = -\gamma_D \nabla \varphi$, уравнение (11) приводит к данному выражению для получения энтропии. Здесь p и A – давление и номинальная площадь контакта, φ – химический потенциал, $p = N/A$, γ_D – коэффициент переноса, N – нормальная нагрузка, μ – коэффициент трения и u – скорость.</p>
$\left(\frac{d}{d(pu)} \right)_T \frac{d_i S}{dt} = \frac{2(pu)^2 \mu^2 A^2}{kT^2} + \frac{d\gamma_D (\nabla \varphi)^2}{T}$	(14)	<p>В работе [24] предполагается, что в неравновесном стационарном состоянии износ трибопленки пропорционален γ_D, а продукт pu является характеристикой трения. Поэтому для стационарной работы анализ проводится для условий минимума γ_D в зависимости от pu.</p>
$\gamma_D = \gamma_{D0} - \frac{(pu)^2 \mu^2 A^2}{kT(\nabla \varphi)^2}$	(15)	<p>Если (14) равно нулю и интегрировано, то получается данное выражение, где γ_{D0} – константа интегрирования.</p>

Второй принцип механотермодинамики. В соответствии со вторым принципом механотермодинамики [40, 42] потоки эффективной энергии U_{Σ}^{eff} (энтропии S_i), обусловленные источниками разной природы, неаддитивны и взаимодействуют между собой во времени. Принцип указывает движущую силу и основную причину возникновения и развития внутренней повреждаемости MTD-системы – это диалектические Λ -взаимодействия составляющих эффективной энергии в поглощающей среде. Такие функции взаимодействия должны принимать три класса значений ($\Lambda \gtrless 1$), чтобы отражать не только единство и борьбу, но и направленность процессов физического упрочнения ($\Lambda < 1$) – разупрочнения ($\Lambda > 1$) в системе. Поскольку упрочнение всегда конечно, тогда как интенсивность разупрочнения может быть неограниченно высокой, то взаимодействие таких процессов неизбежно приводит механотермодинамическую систему к критическим и предельным по поврежденности состояниям.

Очевидно, стоит новая и практически важная задача – плодотворно использовать ее для успешного и корректного решения задач трибологии. В качестве первого примера рассмотрим $\Delta S'$ по формулам (7)–(9)

$$\Delta S' = \frac{U_c}{T_m} \Delta V, \quad \Delta S' = \frac{G - 2\gamma_0}{T_{cr}} da, \quad \Delta S' = \frac{\Delta H}{T_{phase}}. \quad (16)$$

С точки зрения теории Λ -взаимодействий на самом деле имеем

$$\Delta S_{MTD} = \Lambda_{D \setminus PH} \left[\left(\frac{U_c}{T_m} \Delta V + \frac{G - 2\gamma_0}{T_{cr}} \right) \Lambda_D + \frac{\Delta H}{T_{phase}} \right], \quad (17)$$

где Λ_D – функция (коэффициент) взаимодействия между компонентами энтропии при поверхностном пластическом деформировании и трещинообразовании, $\Lambda_{D \setminus PH}$ – функция (коэффициент) взаимодействия между компонентами энтропии при механическом разрушении и изменении свойств материала во время фазового перехода.

В общем случае Λ -взаимодействия потоков эффективной энергии (энтропии), обусловленные источниками разной природы описываются выражениями [43, 44]

$$U_{\Sigma}^{eff} = U_{\Sigma}^{eff} (\Lambda_1, \dots, \Lambda_m, U_1^{eff}, \dots, U_n^{eff}), \quad m < n, \quad (18)$$

$$S_i = S_i (\Lambda_1, \dots, \Lambda_m, S_i^{(1)}, \dots, S_i^{(n)}), \quad m < n, \quad (19)$$

которые для простоты восприятия могут быть представлены в виде соответствующего гиперграфа (см. рис. 1).

Отметим, что в механотермодинамической системе [40, 42] концептуально можно анализировать две составляющие полной удельной энергии (u_i): эффективную (u_{Σ}^{eff}) и консервативную ($u_{\Sigma}^{cons} = u_i - u_{\Sigma}^{eff}$). Эффективной называют ту часть полной энергии, которая затрачивается на производство необратимых повреждений, обусловленных воздействиями разной природы (силовыми, фрикционными, тепловыми)

$$u_i^{eff} = A_i u_i, \quad (20)$$

где u_i – плотности внутренней энергии в элементарном объеме массы Δm для случаев сдвига (u_{τ}), отрыва (u_n) и теплового нагружения (u_T); A_i – коэффициенты, которые выделяют из полной энергии ее эффективную часть. Методики определения величин A_i разработаны [40, 42].

При оценке полной (суммарной – индекс Σ) эффективной энергии системы имеет место неаддитивный характер взаимодействия между ее компонентами, обусловленными воздействиями различной природы. Эти взаимодействия учитывают на макроуровне Λ -функциями в соответствии с [40, 42] и (17)–(19):

$$u_{\Sigma}^{eff} = \Lambda_{\alpha} (u_i^{eff}) = \Lambda_{M \setminus T} (\Lambda_{\tau/n}, A_i u_i) = \Lambda_{M \setminus T} \{ \Lambda_{\tau/n} [A_n u_n + A_{\tau} u_{\tau}] + A_T u_T \}. \quad (21)$$

где $\Lambda_{\alpha} \geq 1$ – комбинации возможных взаимодействий компонент необратимой энергии (необратимых повреждений).

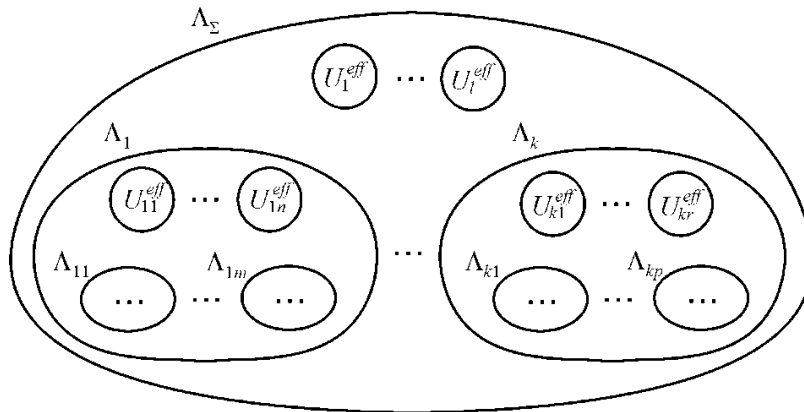


Рис. 1. Общая схема Λ – взаимодействий

Такие взаимодействия определяются нелинейными функциями вида $\Lambda_{\alpha} = \Lambda_{\alpha} [(\sigma / \sigma_{lim})^2, (\tau / \tau_{lim})^2, (T / T_{kp})^2, \dots] \geq 1$, где σ_{lim} , τ_{lim} , T_{kp} – критические значения параметров σ , τ , T , и могут быть представлены как частный случай рис. 1 в виде рис. 2.

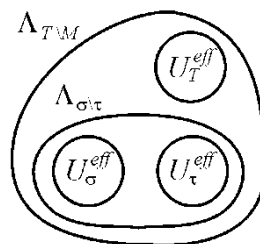


Рис. 2. Схема энергетического взаимодействия

Важнейшей особенностью механотермодинамической модели является учет предельного состояния, например, при наступлении пластичности или усталостном разрушении:

$$u_{\Sigma}^{\text{eff}} = u_0, \quad (22)$$

где предельная плотность внутренней энергии u_0 трактуется как начальная энергия активации процесса разрушения [40, 42].

Покажем практическую полезность критерия (22), обратившись к одному из частных его случаев – изотермической механической усталости (когда $\tau_w = 0$):

$$\Lambda_{M/T} (a_T T_{\Sigma} + a_{\sigma} \sigma^2) = u_0. \quad (23)$$

Из (23) следует, что

$$\lg \sigma_{-1T} = \frac{1}{2} \lg C_T; \quad C_T = [u_0 / \Lambda_{M/T} - a_T T] \cdot \frac{1}{a_{\sigma}}. \quad (24)$$

Проверка этой механотермодинамической функции выполнена по результатам более 600 испытаний материалов разной природы при типичных способах нагружения [40, 42]. Открывающиеся возможности прогнозирования работоспособности материалов переоценить трудно. Практически можно решать любую из двух задач: для заданных температурных условий (T) установить требования к материалу ($\sigma_{\text{lim}(T)}$), который планируется применять в заданных условиях, либо, имея новый конструкционный материал с определенными свойствами ($\sigma_{\text{lim}(T)}$), определить область температур (T), в которых он может успешно применяться. Такого рода мощная функция впервые получена в механотермодинамике. Известные температурные зависимости предельных напряжений [50] имеют, как правило, ограниченное по температурам (высокие, низкие, нормальные), условиям нагружения (статическое, растяжение, усталость и др.) и классу материалов (стали, полимеры, титановые и др. сплавы) применение.

Выводы. При описании состояния системы в терминах энергии либо энтропии обнаруживается важный недостаток – известная нереальность энергии и, следовательно, энтропии: материальные носители энергии не обнаружены и, по-видимому, не существуют. И их нельзя, как образно говорил Фейнман в упомянутых выше лекциях, пощупать. Совсем иное дело – повреждения: они физически реальны, их можно пощупать, они в действительности определяют состояния сплошности (целостности) материальных тел и систем; кинетический процесс их накопления, как и течение времени, является неизбежным и однонаправленным. Это означает: для данной системы стрела времени \vec{t} есть, по существу, и стрела повреждения $\vec{\omega}_{\Sigma}$. И если механотермодинамика принимает во внимание повреждаемость системы как ее фундаментальное физическое свойство (и обязанность), то можно надеяться, что на ее базе удастся создать непротиворечивую общую теорию эволюции любых систем, в том числе живых и разумных.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № T19MC-020.

ЛИТЕРАТУРА

1. Clausius, R. Mechanical Theory of Heat / R. Clausius. – London : John van Voorst, 1867.
2. Kondepudi, D. Modern Thermodynamics (From Heat Engines to Dissipative Structures) / D. Kondepudi, I. Prigogine. – John Wiley & Sons, 1998. – 486 p.
3. Физический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1983. – 928 с.
4. Лыков, А. В. Теплообмен : справочник / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
5. Эткинс, П. Порядок и беспорядок в природе / П. Эткинс. – М.: Мир, 1987. – С. 88, 90.

6. Eddington, A. S. *The Nature of Physical World (Gifford Lectures)* / A. S. Eddington. – Brooklyn: AMS Press, 1927.
7. Boltzmann, L. *Sitzungsber* / L. Boltzmann // *Acad. Wiss. Wien.* – Vol. 66. – 1872. – P. 275–370.
8. Planck, M. *Treatise on Thermodynamics* / M. Planck. – N.Y.: Dover, 1945. – 3rd ed.
9. Шеннон, К. *Работы по теории информации и кибернетике* / К. Шеннон. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 2002.
10. Tribus, M. *Energy and Information* / M. Tribus, E. C. McIrvine // *Scientific America.* – No. 224. – 1971. – P. 178–189.
11. Gibbs, J. W. *The Scientific Papers of Willard Gibbs* / J. W. Gibbs. – Vol. 1: *Thermodynamics.* – N.Y.: Dover, 1961.
12. Coveney, P. V. *The Second Law of Thermodynamics: Entropy, Irreversibility and Dynamics* / P. V. Coveney // *Nature.* – Vol. 333. – 1988. – P. 409–415.
13. J. von Neumann. *Matematische Grundlagen der Quantenmechanik.*
14. Мейз, Дж. *Теория и задачи механики сплошных сред* / Дж. Мейз. – М.: Мир, 1974. – 318 с.
15. Седов, Л. И. *Механика сплошной среды* / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1973. – Т. 2. – С. 420.
16. Сосновский, Л. А. Развитие понятия об энтропии: от термодинамики до космологии. сообщение 1. Понятие об энтропии: термодинамика, механика, информатика, трибофатика, механотермодинамика / Л. А. Сосновский, С. С. Щербаков // *Механика машин, механизмов и материалов.* – 2020. – № 3(52). – С. 78–88.
17. Basaran, C. *A Thermodynamic Framework for Damage Mechanics of Solder Joints.* *Trans. of ASME* / C. Basaran, Y. CY // *Journal of Electronic Packaging.* – 1998. – Vol. 120. – P. 379–384.
18. Tang, H. *Influence of Microstructure Coarsening on Thermomechanical Fatigue Behavior of Pb/Sn Eutectic Solder Joints* / H. Tang, C. Basaran // *Int. Journal of Damage Mechanics.* – July, 2001. – Vol. 10, No 3. – P. 235–255.
19. Basaran, C. *Thermomechanical Analysis of Solder Joints Under Thermal and Vibrational Loading* / C. Basaran, R. Chandaroy // *Tran. ASME Journal of Electronic Packaging.* – March, 2002. – Vol. 124, No 1. – P. 60–67.
20. Basaran, C. *Implementation of a Thermodynamic Framework for Damage Mechanics of Solder Interconnects in Microelectronic Packaging* / C. Basaran, H. Tang // *International Journal of Damage Mechanics.* – 2002. – Vol. 11. – P. 87–108.
21. Tang, H. *A Damage Mechanics Based Fatigue Life Prediction Model* / H. Tang, C. Basaran // *Trans. Of ASME, Journal of Electronic Packaging.* – 2003. – Vol. 125. – P. 120–125.
22. Basaran, C. *A Thermodynamic Model for Electrical Current Induced Damage* / C. Basaran, M. Lin, H. Ye // *Int. Journal of Solids and Structures.* – 2003. – Vol. 40. – P. 7315–7327.
23. Basaran, C. *An Irreversible Thermodynamic Theory for Damage Mechanics of Solids* / C. Basaran, S. Nie // *International Journal of Damage Mechanics.* – 2004. – Vol. 13. – P. 205–224.
24. Basaran, C. *A Thermodynamics Based Damage Mechanics Model for Particulate Composites* / C. Basaran, S. Nie // *International Journal of Solids and Structures.* – 2007. – Vol. 44.
25. Yao, W. *Computational damage mechanics of electromigration and thermomigration* / W. Yao, C. Basaran // *Journal of Applied Physics.* – 2013. – Vol. 114.
26. Yao W, Basaran C. *Electromigration Analysis of Solder Joints under AC Load: a Mean Time to Failure Model* / W. Yao, C. Basaran // *Journal of Applied Physics.* – 2012. – Vol. 111.
27. Bryant, M. D. *Entropy and Dissipative Processes of friction and Wear* / M. D. Bryant // *FME Trans.* – 2009. – Vol. 37. – P. 55–60.
28. Bryant, M. D. *Unification of Friction and Wear.* In *Recent Developments in Wear Prevention* / M. D. Bryant // *Friction and Lubrication*; Nikas, G., Ed.; Old City Publishing: Philadelphia, PA, USA. – 2010. – P. 159–196.

29. Bryant, M. D. On the thermodynamics of degradation / M. D. Bryant, M. M. Khonsari, F. F. Ling // *Proc. R. Soc. Lond. A.* – 2008. – Vol. 464. – P. 2001–2014.
30. Ling, F. F. On Irreversible Thermodynamics for Wear Prediction / F. F. Ling, M. D. Bryant, K. L. Doelling // *Wear.* – 2002. – Vol. 253. – P. 1165–1172.
31. Doelling, K. L. An experimental study of the correlation between wear and entropy flow in machinery components / K. L. Doelling [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2000. – 88. – P. 2999–3003.
32. Bryant, M. D. Application of degradation-entropy generation theorem to dry sliding friction and wear / M. D. Bryant, M. M. Khonsari // In *Proceedings of the STLE/ASME International Joint Tribology Conference, 20–22.10.2008, Miami, FL, USA.* – 20–22 October 2008.
33. Amiri, M. On the Thermodynamics of Friction and Wear / M. Amiri, M. M. Khonsari // *A Review. Entropy.* – 2010. – Vol. 12. – P. 1021–1049.
34. Amiri, M. On the Relationship Between Wear and Thermal Response in Sliding Systems / M. Amiri, M. M. Khonsari, S. Brahmeshwarkar // *Tribol. Lett.* – 2010. – Vol. 38. – P. 147–154.
35. Beheshti, A. On the Prediction of Fatigue Crack Initiation in Rolling/Sliding Contacts with Provision for Loading Sequence Effect / A. Beheshti, M. M. Khonsari // *Tribol. Int.* – 2011. – Vol. 44. – P. 1620–1628.
36. Naderi, M. A Comprehensive Fatigue Failure Criterion Based on Thermodynamic Approach / M. Naderi, M. M. Khonsari // *J. Compos. Mater.* – 2012. – Vol. 46. P. 437–447.
37. Naderi, M. Dissipated Thermal Energy and Damage Evolution of Glass/Epoxy Using Infrared Thermography and Acoustic Emission / M. Naderi, A. Kahirdeh, M. M. Khonsari // *J. Compos. B Eng.* – 2012. – Vol. 43. – P. 1613–1620.
38. Aghdam, A. B. On the fretting crack nucleation with provision for size effect / A. B. Aghdam, A. Beheshti, M. M. Khonsari // *Tribol. Int.* – 2012. – Vol. 47. – P. 32–43.
39. Amiri, M. An Application of Dimensional Analysis to Entropy-Wear Relationship / M. Amiri, M. M. Khonsari, S. Brahmeshwarkar // *J. Tribol.* – 2012. – Vol. 134.
40. Sosnovskiy, L. A. *Mechanothermodynamics* / L. A. Sosnovskiy, S. S. Sherbakov. – Berlin: Springer, 2016. – 155 p.
41. Щербаков, С. С. Модели состояний трибофатических и механотермодинамических систем / С. С. Щербаков // *Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. – Вып. 8.* – Минск : ОИМ НАНБ, 2019. – С. 204–208.
42. Сосновский, Л. А. Принципы механотермодинамики / Л. А. Сосновский, С. С. Щербаков. – Гомель: БелГУТ. – 2013. – 150 с.
43. Sosnovskiy, L. A. Mechanothermodynamical system and its behavior / L. A. Sosnovskiy, S. S. Sherbakov // *Continuum Mech. Thermodyn.* – 2012. – Vol. 24, Issue 3. – P. 239–256.
44. Сосновский, Л. А. Механика износоусталостного повреждения / Л. А. Сосновский // Гомель : БелГУТ, 2007. – 434 с.
45. Щербаков, С. С. Механика трибофатических систем / С. С. Щербаков, Л. А. Сосновский. – Минск : БГУ, 2010. – 407 с.
46. Сосновский, Л. А. Основы трибофатики : учеб. пособие : [доп. Мин-вом образования Респ. Беларусь в качестве учебного пособия для студентов технических высших учебных заведений] / Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2003. – Т. 1. – С. 246.; Т. 2. – 234 с.
47. Sosnovskiy, L. A. Tribo-Fatigue. Wear-Fatigue Damage and Its Prediction / L. A. Sosnovskiy // *Series : Foundations of Engineering Mechanics, Springer.* – 2005. – P. 424.
48. Сосновский, Л. А. Основы теории эволюции неорганических и органических систем, в том числе живых и разумных / Л. А. Сосновский, С. С. Щербаков, А. А. Лазаревич // *Национальная философия в глобальном мире : материалы Первого белорусского философского конгресса, Минск, 18–20 окт. 2017.* – Минск : Беларуская навука, 2018. – С. 155–178.
49. Сосновский, Л. А. Механотермодинамика (об объединении великих конкурентов: 1850-2015) / Л. А. Сосновский // *Механика машин, механизмов и материалов.* – 2016. – № 4(37). – С. 19–41.

50. Форрест, П. Усталость металлов: Пер. с англ. / П. Форрест / Под ред. С. В. Серенсена. – М., 1968. – 352 с.
51. Сосновский, Л. А. Статистическая механика усталостного разрушения / Л. А. Сосновский. – Минск : Наука и техника, 1987. – 288 с.

Поступила: 01.02.2021