

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

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

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 $J_1 = -k\nabla T = \mu Nu$; 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).

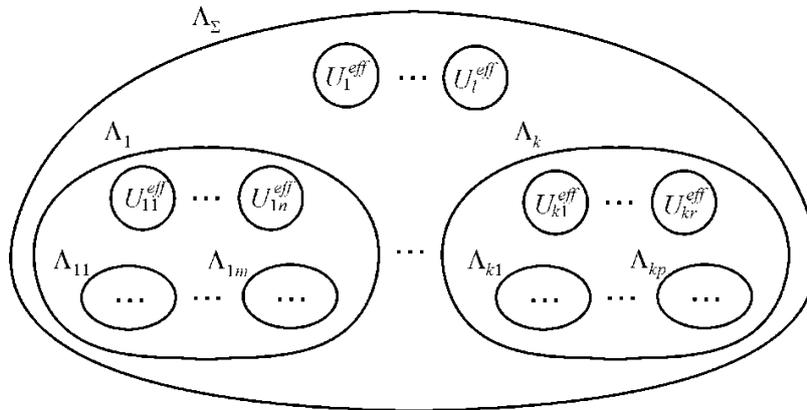


Рис. 1. Общая схема Λ – взаимодействий

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.

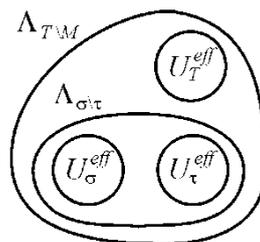


Рис. 2. Схема энергетического взаимодействия

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