

# ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ

УДК 531:536

М.С. ВЫСОЦКИЙ, академик

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

П.А. ВИТЯЗЬ, академик

Президиум НАН Беларуси, Минск

Л.А. СОСНОВСКИЙ, д-р техн. наук

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

## МЕХАНОТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КАК НОВЫЙ ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Показано, что представление о механотермодинамической системе неизбежно ведет к разработке основных положений новой физической дисциплины — механотермодинамики*

Вопрос о возможности построения механотермодинамики обсуждался в работах [1–3] и др. Он был поставлен в связи с анализом иерархической структуры объектов, изучаемых в механике [1], исходя из того положения, что возникновение новой научной дисциплины связано с появлением очередного объекта для изучения, как правило, более сложного, чем предыдущий [3–5]. Согласно рисунку 1, изучение материального объекта в виде движущейся точки привело к созданию *теоретической механики*. Когда было понято, что под воздействием многообразных нагрузок происходит своеобразное движение системы взаимосвязанных точек внутри твердого тела, возникла *механика деформируемого твердого тела*.

Деформируемое твердое тело — лишь один из компонентов многочисленных и разнообразных *механических систем*. Уже простейший случай *сжатия двух неподвижных твердых тел* вызвал развитие нового подхода в теории упругости — его назвали *контактной задачей*. Она стала началом *механики контактного взаимодействия тел* (компонентов) при статическом, ударном, циклическом и других нагружениях. Очередной объект — *пара трения*, главной особенностью которой является *относительное движение двух твердых тел*, находящихся под действием контактной нагрузки. И появилась специальная научная дисциплина — *трибология*, основной задачей которой стало изучение закономерностей и особенностей трения и поверхностного повреждения различных материалов при скольжении, качении, проскальзывании, ударе и т.д. По существу, любая пара трения — *многокомпонентная система*: в ней неизбежно организуется так называемое *третье тело*, формируемое в области подвижного контакта за счет смазочного материала и/или продуктов трибодеструкции тонких поверхностных слоев контактирующих тел.

Более сложным, чем пара трения, является своеобразный объект — *силовая система*, представление о которой введено совсем недавно (в конце XX века) [6]. Так называют всякую механическую систему, которая *воспринимает и транзитно передает рабочую циклическую нагрузку и в которой одновременно реализуется процесс трения в любом его проявлении* — при скольжении, качении, ударе и т.д. Другими словами, силовая система — это пара трения, хотя бы один из элементов которой подвергает-



Рисунок 1 — Иерархическая структура некоторых объектов, изучаемых в механике: от простого к сложному

ся объемному повторно-переменному деформированию. Для таких систем характерно комплексное — износосталостное повреждение; оно обусловлено кинетическим взаимодействием явлений усталости, трения, изнашивания, эрозии, коррозии и др. Естественно, что обнаружение нового и специфического объекта привело к возникновению очередной научной дисциплины, которая получила краткое название: *трибофатика* (от греч. *tribo* — *трение*, франц. *fatigue* — *усталость*) [7]. Другое (более длинное) ее название — *механика износосталостных повреждений*, или, в более широкой трактовке, *механика трибофатических систем*.

Наконец, если силовая система помещается в сплошную (например, газообразную) среду и с ней взаимодействует, образуется еще более сложная — *механотермодинамическая система* [1, 7]. Ее возможные состояния оказываются многообразными; это и *термодинамическое состояние* среды, и *напряженно-деформированное состояние* твердых тел, и *состояние поврежденности* (сплошности) системы, а также ее *критические* и *закритические* состояния [7]. Естественно, что указанные состояния должны изучаться комплексно, с позиций не только дисциплин прочностного цикла, но и с позиций термодинамики. Это приводит к необходимости изучения сложных *механотермодинамических систем*, опираясь на апробированные концепции, разработанные в рамках упомянутых выше научных дисциплин, являющихся базой и плодотворным источником для наших исследований.

Рассмотрим возможные состояния системы.

### Термодинамическое состояние

Для описания состояния термодинамических систем используют функции:

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

в которых температура  $T$ , объем  $V$ , число молей химических компонентов  $N_k$  — макроскопические переменные состояния.

В общем случае открытой системы изменение  $dU$  внутренней энергии  $U$  представляется [8] в виде:

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

так что изменение энтропии:

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

где  $dQ$  — количество тепла;  $dA$  — количество механической энергии;  $dU_{sub}$  — количество вещества, которым система обменялась с окружающей средой за интервал времени  $dt$ ;  $p$  — давление;  $\mu_k$  — химические потенциалы. Планк особо подчеркивал, что в формуле (2)  $dU$  есть бесконечно малая разность, тогда как  $dQ$ ,  $dA$ ,  $dU_{sub}$  — бесконечно малые количества.

Таким образом, в термодинамике энтропия  $S$  — это мера необратимого рассеяния энергии [9], которая характеризует состояние системы с точки зрения ее внутренней упорядоченности, или структуры.

Приращение энтропии (3), по Пригожину, может быть представлено как сумма ее изменения  $d_e S \geq 0$ , обусловленного обменом системы энергией и веществом с внешней средой, и изменения  $d_i S \geq 0$ , обусловленного необратимыми процессами внутри системы:

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

В (2) и (3) не принимаются во внимание многие процессы, например, изменение внутренней энергии при повреждении движущихся и деформируемых твердых тел и силовых систем [8]. А обмен веществом рассматривается лишь в результате некоторых процессов (таблица 1) [10], тогда как обмен веществом при поверхностном изнашивании и объемном (например, усталостном) разрушении не учитывается. Поэтому возникает задача об оценке изменения энтропии в связи с развитием многообразных явлений деформирования и повреждаемости.

### Термомеханическое состояние

В *механике сплошной среды* [11, 12] тензор напряжений разлагают на две части:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(c)} + \sigma_{ij}^{(d)}, \quad (5)$$

где индекс (c) указывает *тензор консервативных напряжений*, а индекс (d) — *тензор диссипативных напряжений*.

И тогда, проведя соответствующий энергетический анализ, получают *термомеханическую функцию*:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{T} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{\rho T} \sigma_{ij}^{(d)} \dot{\epsilon}_{ij}, \quad (6)$$

где  $dq/dt$  — скорость притока тепла к среде на единицу массы;  $\frac{1}{\rho} \sigma_{ij}^{(d)} \dot{\epsilon}_{ij}$  — скорость диссипации энергии в единице массы ( $\rho$  — плотность среды).

Уравнение (6) справедливо лишь для сплошной среды. Если сплошность деформируемого твердого тела нарушается, оно не может быть использовано. Кроме того, по имеющимся сведениям, до сих пор не разработаны обоснованные процедуры (5) разделения напряжений.

В *трибологии* [13, 14] изменение энергии (мощности) трения и изнашивания обычно записывается в виде многочлена в связи с необходимостью учета влияния многих факторов, однако термомеханическая функция, которую можно было бы связать с энтропией, не установлена. Аналогична ситуация в *механике усталостного разрушения* [15].

В *трибофатике* [7, 16] термомеханическое состояние описывается на базе обобщенного представления о повреждении. Оно трактуется как изменение состава, строения, структуры, размеров, формы, объема, массы, сплошности и, следовательно, соответствующих физико-химических, механических, электромагнитных и других свойств объекта; в конечном счете, повреждение связывают с нарушением сплошности и целостности тела, вплоть до его разложения (например, на атомы) [17]. Таким образом, повреждаемость трактуется как фундаментальное свойство (и обязанность) движущихся и деформируемых систем, а разрушение рассматривается как специфический тип повреждения — соответствующее нарушение их сплошности и целостности.

Согласно [7, 17] для трибофатических систем необратимая повреждаемость  $\omega_\Sigma$  есть функция эффективных механической  $U_M^{eff}$ , тепловой  $U_T^{eff}$  и электрохимической  $U_{ch}^{eff}$  энергий, при этом различается механическая энергия, обусловленная изменением размеров тела ( $U_\sigma^{eff}$ ), и механическая энергия, обусловленная изменением его формы ( $U_\tau^{eff}$ ):

$$\begin{aligned} \omega_\Sigma &= \omega_\Sigma(U_\sigma^{eff}, U_\tau^{eff}, U_T^{eff}, U_{ch}^{eff}) = \\ &= \omega_\Sigma(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}, T_\Sigma, v_{ch}(m_v), \Lambda_{\sigma/p}, \Lambda_{T/M}) = \omega_\Sigma(U_\Sigma^{eff}). \end{aligned} \quad (7)$$

Таблица 1 — Термодинамические потоки и силы в некоторых часто наблюдаемых необратимых процессах

Явление	Поток	Сила	Характер
Теплоперенос	Тепловой поток, $J_{th}$	$\nabla(1/T)$	Вектор
Диффузия	Поток массы компонента $i$ , $J_{d,i}$	$-\nabla(\mu_i/T) - F_i$	Вектор
Вязкое течение	Диссипативная часть тензора давления, $P$	$\nabla v(1/T)$	Тензор 2-го ранга
Химическая реакция	Скорость реакции $\rho$ , $\omega_\rho$	Сродство реакции, деленное на $T$ , $A_\rho/T$	Скаляр

$T$  — температура;  $\mu_i$  — химический потенциал компонента  $i$ ;  $F_i$  — внешняя сила, действующая на единицу массы компонента  $i$ ;  $v$  — гидродинамическая скорость.  
Сродство  $A_\rho$  связано с  $\mu_i$  соотношением:

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

где стехиометрические коэффициенты  $\nu_i$  дают полное число молекул, образующихся ( $\nu > 0$ ) или исчезающих ( $\nu < 0$ ) в реакции.

Здесь  $\Lambda$ -функции характеризуют взаимодействие необратимых повреждений, обусловленных разными нагрузками (силовой и контактно-фрикционной — индекс  $\sigma/p$ ; тепловой и механической — индекс  $T/M$ ).

В (7) принимаются известные связи энергии с соответствующими силовыми факторами ( $\sigma_{ij}$  и  $\tau_{ij}$  — тензоры нормальных и фрикционных напряжений,  $v_{ch}$  — скорость электрохимических процессов с учетом свойств ( $m_v$ ) материала). Эффективной называют энергию, непосредственно расходуемую на образование и развитие необратимых повреждений, т.е.  $U^{eff}$  — это поглощенная часть энергии, подведенной к системе. Методика ее определения изложена в работах [7, 16]. Там же можно найти и формулы для оценки  $\omega_\Sigma$  в различных условиях работы силовых систем. Согласно (7), поврежденность  $\omega_\Sigma$  является термомеханической функцией, поскольку учитывает как силовые факторы, так и температуру  $T_\Sigma$ , обусловленную всеми источниками тепла.

Как правило, необратимые повреждения образуются и накапливаются не во всем (геометрическом) объеме деформируемого твердого тела, а лишь в некоторой его конечной области с критическим состоянием; эту область называют опасным объемом. Модель тела с опасным объемом разработана в [18], а в работах [4, 5, 7] дано ее обобщение применительно к силовым системам.

Поскольку внутренние необратимые повреждения термомеханической природы возникают вследствие изменения эффективной энергии в опасном объеме  $W_{p\gamma}$  системы, то в общем случае [2]:

$$dU_\Sigma^{eff} = \gamma_1^{(w)} \omega_\Sigma dW_{p\gamma}, \quad (8)$$

где  $\gamma_1^{(w)}$  — напряжение (давление), которое приводит к повреждению единичного опасного объема ( $W_{p\gamma} = 1$ ).

И тогда, в соответствии с (2)–(4), можно ввести представление о трибофатической энтропии [2, 19], изменение которой:

$$(d_i S)_{TF} = \frac{\gamma_1^{(w)}}{T_\Sigma} \omega_\Sigma dW_{p\gamma}. \quad (9)$$

Таким образом, трибофатическая энтропия служит мерой необратимого поглощения энергии  $U_\Sigma^{eff}$  в опасном объеме  $W_{p\gamma}$  силовой системы.

Обобщая, запишем (9) через тензор  $L_{\omega_\Sigma}$  поврежденной системы:

$$(d_i S)_{TF} = \gamma_1^{(w)} \frac{L_{\omega_\Sigma}}{T_\Sigma} dW_{p\gamma}; \quad (10)$$

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

который может состоять из нескольких компонент ( $\omega$ ) — соответственно числу явлений (событий, ситуаций), влияющих на изменение состояния поврежденности системы. Понятие о тензоре повреждений (11) введено в [7, 16].

### Механотермодинамическое состояние

Теперь рассмотрим открытую термодинамическую систему, содержащую повреждаемое твердое тело; это — механотермодинамическая система. Полное изменение энтропии в такой системе, очевидно, определяется суммой (3) и (10) термодинамической и трибофатической энтропии:

$$(dS)_T + (d_i S)_{TF} = \left( \frac{dU + \Delta p dV}{T} - \frac{1}{T} \sum_k^n \mu_k dN_k \right)_T + \left( \frac{\gamma_1^{(w)}}{T_\Sigma} \omega_\Sigma dW_{p\gamma} \right)_{TF}. \quad (12)$$

Если  $\omega_\Sigma = 0$ , то (12) сводится к (2).

Функция (12) механотермодинамического состояния принципиально отличается от функции (3) термодинамического состояния: она допускает анализ любого состояния системы (в том числе  $A$ -,  $B$ -,  $C$ -,  $D$ - и  $E$ -состояний поврежденности (таблица 2) [17]), так как в общем случае  $0 \leq \omega_\Sigma \leq \infty$  [7, 17]. Следовательно, согласно (12), именно рост производства трибофатической энтропии (10), обусловленный термомеханическим состоянием системы, может привести ее и к разрушению, и к разложению; в термодинамической функции (3) о подобных состояниях речи не идет. Проблема критических уровней энтропии, обусловленных повреждением и разрушением систем, пока не исследована [8].

Из изложенного следует, что долговечность механотермодинамической системы в общем случае определяется интенсивностью процессов необратимого изменения энтропии — термодинамической и трибофатической.

При анализе поведения термодинамических систем проблема взаимодействия энергий разной природы, по имеющимся сведениям, не ставилась [8–10]. Естественно, что не изучено и возможное взаимодействие энтропии, порождаемой термодинамическими силами и потоками при реализации различных необратимых процессов (см. (2) и (3) и таблицу 1). Но, поскольку связь  $S(U)$  энтропии и энергии является органической [8], то, используя принцип взаимодействия эффективных частей энергий разной природы [2, 7], запишем (12) с учетом возможных  $\Lambda$ -взаимодействий, при этом перейдем от приращения энтропии к изменению ее абсолютных значений во времени:

$$S_{total}(t) = [S_T(t) + S_{TF}(t)]\Lambda_{T/TF}. \quad (13)$$

Элементы теории  $\Lambda$ -взаимодействия необратимых повреждений в силовых системах к настоящему времени сформулированы и в некоторой степени разработаны [7, 16, 17]. А их физическая картина представлена на рисунках 2, 3, 4 по результатам экспериментальных исследований [2, 20]. Как показано на рисунке 2, увеличение контактного давления ведет к образованию ориентированных по дорожке качения ямок выкрашивания; при  $p_0 = 2130$  МПа их глубина достигает 0,4 мкм (см. рисунок 2, гистограмма). Но когда в паре трения дополнительно возникает изгиб (вала), картина повреждения существенно изменяется даже при небольших значениях циклических напряжений ( $\sigma_a = 110$  МПа), при этом протяженные и глубокие ямки выкрашивания не образуются, а глубина повреждения уменьшается до 0,2 мкм. Таково следствие взаимодействия эффективных энергий, обусловленных разными нагрузками — контактной и изгибной.

На рисунке 3 видно, что если при механической усталости на поверхности образуются экструзии и интрузии, а при контактной усталости формируется ориентированная зеренная топография поверхностных повреждений, то в случае контактно-механической усталости — вследствие взаимодействия эффективных энергий — образуется иной тип деградации: рассеянная картина множественных микросдвигов, пересекающихся в двух плоскостях.

Интегрально подобные взаимодействия формируют и принципиально различающуюся макроструктуру разрушения (рисунок 4).

Исходя из изложенного, уравнение (13), в совокупности с представленными выше результатами (см. формулы

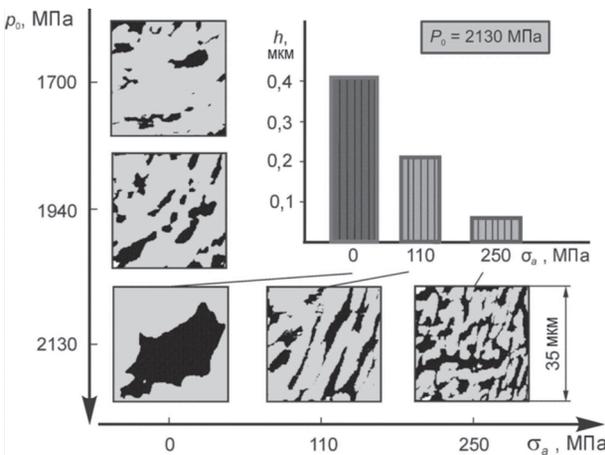


Рисунок 2 — Взаимодействие повреждений на субмикроруревне: микрофотографии поверхностного повреждения при трении качения (вертикальный столбец рисунков) и при контактно-механической усталости (горизонтальная строка рисунков)

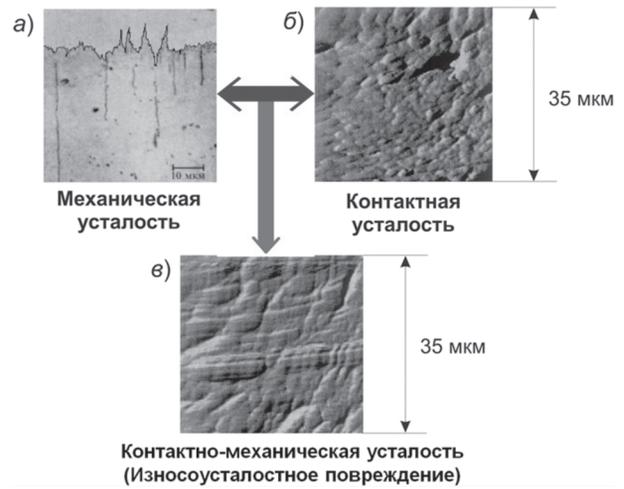


Рисунок 3 — Микроруревне: результат (в) необратимого взаимодействия поверхностных повреждений (а, б), обусловленных механической и контактной усталостью



Рисунок 4 — Макроруревне: результат (в, д) необратимого взаимодействия повреждений (а, б) вала, обусловленных механической и контактной усталостью

(8–12) и таблицу 2), позволяет приступить к анализу механотермодинамического состояния систем по крайней мере в первом приближении. Для анализа (13) воспользуемся тремя параметрами, приведенными в таблице 3 [2, 7].

Теперь мы можем построить, например, рисунок 5. При определенных соотношениях функций состояния и параметров уравнение (13) прогнозирует разнообразные и сложные «траектории» энтропии. В процессе эволюции система может входить, например, в устойчивые и равновесные состояния и выходить из них — так много раз, как это возможно в конкретных условиях ее существования; наблюдаемые точки  $A_1, A_2$  системы могут сближаться и расходиться либо двигаться практически параллельно; система может претерпевать бифуркации и другие (более сложные) преобразования. И далее естественно возникает вопрос: в чем состоит различие механотермодинамических и термодинамических процессов?

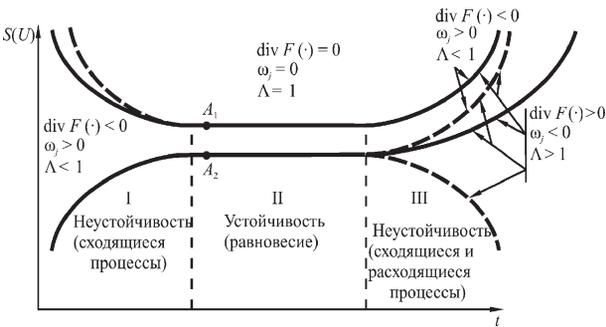
Один из возможных ответов на этот вопрос иллюстрирует рисунок 6. Здесь сплошными линиями показано прогнозируемое поведение термодинамической системы, для которой в (13) принимается  $S_{TF} = 0$  и  $\Lambda_{T/TF} = 1$ ; пусть энтропия  $S_T$  такой системы стремится к некоторому (локальному) максимуму. Поведение аналогичной механотермодинамической системы представлено на рисунке 3 пунктирными линиями в предположении, что в (13) имеем  $\Lambda_{T/TF} > 1$ . Принимается, что начальное состояние обеих систем оди-

Таблица 2 — Характеристика состояний объектов

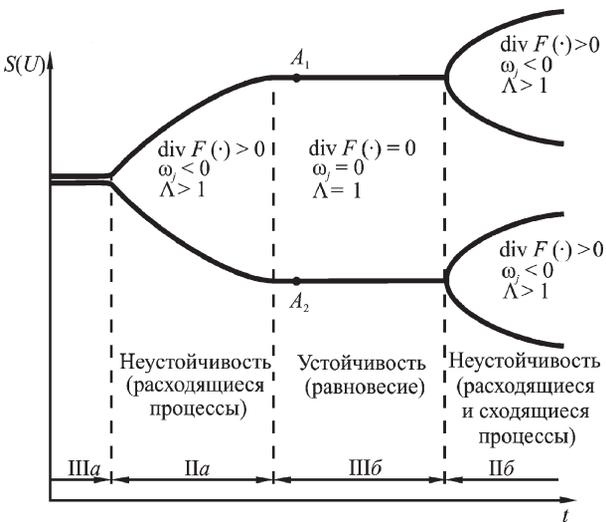
A-состояние	Неповрежденное	$\omega_\Sigma=0=\omega_0$	A-эволюция: характерные состояния системы
B-состояние	Поврежденные	$0 < \omega_\Sigma < 1$	
C-состояние	Критическое	$\omega_\Sigma=1=\omega_c$	
D-состояние	Закритические	$1 < \omega_\Sigma < \infty$	
E-состояние	Разложение	$\omega_\Sigma=\infty=\omega_\infty$	

Таблица 3 — Параметры, описывающие механотермодинамическое состояние различных систем

Параметр	Характеристика
Дивергенция $\text{div } F(\bullet) \gtrless 0$	относительного движения физических точек материи или элементов системы (сходящиеся, расходящиеся и другие процессы)
Индекс поврежденности $\omega_j \gtrless 0$	природы процессов необратимой повреждаемости (упрочнение, разрушение и т.д.)
Параметр взаимодействий $\Lambda \gtrless 1$	направленности и интенсивности взаимодействия необратимых повреждений любой природы

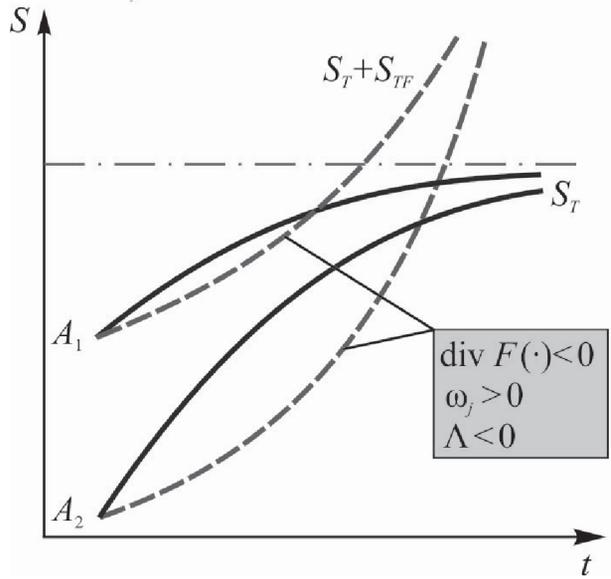


а)

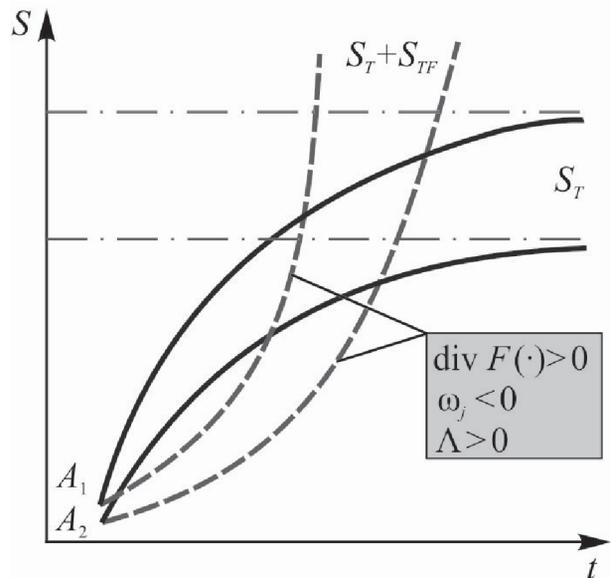


б)

Рисунок 5 — Возможные переходы системы от неустойчивого к устойчивому состоянию и обратно (а) и возникновение бифуркаций (б)



а)



б)

Рисунок 6 — Эволюция термодинамического ( $S_T$ ) либо механотермодинамического ( $S_T+S_{TF}$ ) состояния системы ( $A_1, A_2$ ): а) колебательные и асимптотические сходящиеся процессы; б) колебательные и асимптотические расходящиеся процессы

наково (точки  $A_1, A_2$ ). Судьба системы в обоих случаях определяется интенсивностью многообразных необратимых внутренних процессов, обусловленных множеством причин. И она будет принципиально разной у сравниваемых систем.

С одной стороны, траектория механотермодинамического состояния ( $S_T+S_{TF}$ ) не может совпадать с траекторией термодинамического состояния ( $S_T$ ), поскольку в первом случае появляется ненулевая добавка трибофатической энтропии ( $S_{TF}>0$ ). Это обуславливает количественные различия в траекториях сравниваемых систем. С другой стороны, обнаруживается и принципиальное различие в их поведении: когда энтропия термодинамической системы достигает, например, локального максимума (равновесное состояние), механотермодинамическая система может не иметь такого — и она будет находиться в неравновесном состоянии. Это наблюдается и в случае схо-

дящихся (см. рисунок 6 а), и в случае расходящихся (см. рисунок 6 б) процессов движения — и для упрочняющихся и для разупрочняющихся во времени систем.

Изложенное позволяет сделать общее заключение, что на основе (12), (13) можно построить *механотермодинамику* — подобно тому, как на основе (1)—(4) построена *термодинамика* (см., например, [8]). При этом путь к механотермодинамике можно рассматривать как новый мост между механикой и термодинамикой (рисунок 7); «сваи» под этот «мост» закладывает трибофатика [22]. Здесь трибофатика трактуется в наиболее общей постановке — как научная дисциплина, изучающая многообразные и сложнейшие взаимодействия в многокомпонентных сплошных средах, при этом одна из взаимодействующих сред — это обязательно деформируемое твердое тело. Только в таких случаях правомерно говорить об образовании и существовании механотермодинамических систем как новых объектов для изучения.

Итак, состояние системы обычно равнозначно описывают в терминах энергии либо энтропии. Главный недостаток таких описаний — известная нереальность энергии и, следовательно, энтропии: материальные носители энергии не обнаружены [21]. И их нельзя, как образно говорил Фейнман в своих лекциях по физике, пощупать. Совсем иное дело — повреждение: они физически реальны, их можно пощупать, они в действительности определяют любое из мыслимых состояний материальных тел и систем; кинетический процесс их накопления, как и течение времени, является неизбежным и однонаправленным. И если принимается во внимание повреждаемость системы как ее фундаментальное физическое свойство (и обязанность), то анализ состояний механотермодинамических систем в терминах изменения энтропии (внутренней энергии) обретает научно-практический интерес. Авторы надеются, что изложенный подход в ближайшее время получит развитие и апробацию.

#### Список литературы

1. Витязь, П.А. Об объектах, изучаемых в механике / П.А. Витязь, М.С. Высоцкий, Л.А. Сосновский // Теоретическая и прикладная механика. — Минск: БНТУ, 2008. — Вып. 23. — С. 3—12.
2. Сосновский, Л.А. О возможности построения механотермодинамики / Л.А. Сосновский, С.С. Щербаков // Наука и инновации. — 2008. — № 2(60). — С. 24—29.
3. Высоцкий, М.С. Новые подходы в механике износоусталостного повреждения и разрушения / М.С. Высоцкий [и др.] // Механика-2007: материалы III Белорус. конгр. по теорет. и прикл. механике, Минск, 16—18 окт. 2007 г. — Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2007. — С. 38—114.
4. Журавков, М.А. Применение методологии механики деформируемого твердого тела в трибофатике / М.А. Журавков, С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский // Методы разв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла: сб. науч. тр. — Днепропетровск: Днепропетров. нац. ун-т, 2009. — Вып. 10. — С. 116—122.
5. Витязь, П.А. Новые подходы в механике деформируемых систем / П.А. Витязь, Л.А. Сосновский, С.С. Щер-

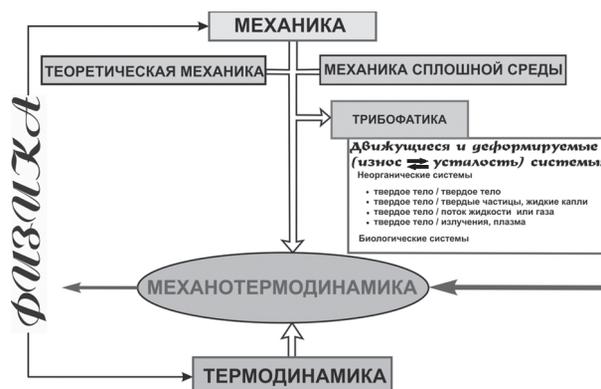


Рисунок 7 — Пути к механотермодинамике

- баков // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. — 2009. — Т. 53. — № 4. — С. 102—110.
6. Трибофатика. Термины и определения: ГОСТ 30638—99. — Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. — 17 с.
  7. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2007. — 434 с.
  8. Кондепуди, Д. Современная термодинамика (от тепловых двигателей до диссипативных структур) / Д. Кондепуди, И. Пригожин. — М., 2002. — 461 с.
  9. Физический энциклопедический словарь. — М., 1983.
  10. Николис, Г. Познание сложного. Введение / Г. Николис, И. Пригожин. — М., 2003. — 342 с.
  11. Мейдз, Дж. Теория и задачи механики сплошных сред / Дж. Мейдз. — М.: Мир, 1974. — 318 с.
  12. Седов, Л.И. Механика сплошной среды / Л.И. Седов. — М.: Наука, 1973. — Т. II. — 473 с.
  13. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / под ред. А.В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 2001. — 663 с.
  14. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.
  15. Трошенко, В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справ. в 2-х т. / В.Т. Трошенко, Л.А. Сосновский. — Киев: Наук. думка, 1987. — Т. 1. — 510 с. — Т. 2. — 825 с.
  16. Sosnovskiy, L.A. Tribo-Fatigue. Wear-fatigue damage and its prediction (Foundations of engineering mechanics). Series: Foundations of Engineering Mechanics / L.A. Sosnovskiy. — Springer, 2005. — 424 p.
  17. Сосновский, Л.А. L-риск / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2004. — 317 с.
  18. Сосновский, Л.А. Статистическая механика усталостного разрушения / Л.А. Сосновский. — Минск: Наука і тэхніка, 1987. — 288 с.
  19. Сосновский, Л.А. Об одном виде энтропии как мере поглощения энергии, расходуемой на производство повреждений в механотермодинамической системе / Л.А. Сосновский // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. — 2007. — Т. 51; № 6. — С. 100—104.
  20. Чижик, С.А. Особенности возникновения и развития малых поверхностных трещин в углеродистой стали при контактно-механической усталости / С.А. Чижик [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 1996. — № 3. — С. 34—38.
  21. Фейнман, Р. Лекции по физике / Р. Фейнман. — М.: Мир, 1963. — Т. 4. — 261 с.
  22. Сосновский, Л.А. О динамических системах с элементами разума / Л.А. Сосновский Л.А.; редкол.: М.А. Журавков (пред.) [и др.] // Тр. VI Междунар. симпоз. по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт.—1 нояб. 2010 г., Минск, Беларусь. — Минск: БГУ, 2010. — Т. 2. — С. 573—582.

Vysotski M.S., Vityaz P.A., Sosnovskiy L.A.  
**Mechanothermodynamic system as the new subject of research**

It is shown that representation about mechanothermodynamic system inevitably conducts to working out of substantive provisions of new physical discipline — mechanothermodynamic.

Поступила в редакцию 17.03.2011