



МЕХАНИКА ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 539.3

Л.А. СОСНОВСКИЙ, д-р техн. наук, профессор

директор

E-mail: tribo-fatigue@mail.ru

ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», г. Гомель, Республика Беларусь

М.А. ЖУРАВКОВ, д-р физ.-мат. наук, профессор

Министр образования Республики Беларусь

Министерство образования Республики Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь

С.С. ЩЕРБАКОВ, д-р физ.-мат. наук

доцент кафедры теоретической и прикладной механики механико-математического факультета¹

А.В. БОГДАНОВИЧ, д-р техн. наук, профессор

профессор кафедры теоретической и прикладной механики¹

¹Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Н.А. МАХУТОВ, член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор

главный научный сотрудник²

В.В. ЗАЦАРИННЫЙ, канд. техн. наук, доцент

ведущий научный сотрудник лаборатории механики разрушения и живучести²

²Институт машиноведения РАН им. А.А. Благонравова, г. Москва, Россия

Статья поступила 29.04.2015.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДОСТИЖЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ОБЪЕКТОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННЫХ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ СИЛОВЫХ ФАКТОРОВ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ. ЧАСТЬ II

Обзорно-аналитическая статья, в которой описан ряд критериев предельного состояния (ПС) сложных объектов и указаны методы определения всех параметров, необходимых для их практического использования. Изложена энергетическая теория ПС трибофатических и механотермодинамических (МТД) систем, учитывающая диалектику взаимодействия эффективных энергий и, следовательно, необратимых повреждений при усталостном нагружении, трении и температурном воздействии. Проанализированы фундаментальные закономерности достижения ими ПС при комбинированных многопараметрических воздействиях силовых факторов и среды. Представлена экспериментально обоснованная (более 600 результатов экспериментов) МТД функция прогнозной оценки различных ПС (статическое, усталостное, контактное разрушение) для чистых металлов, цветных сплавов, конструкционных сталей и полимерных материалов.

Ключевые слова: ПС, трибофатическая система, МТД система, теории прочности, критерии ПС, эффективная энергия потенциальной деформации, Λ -взаимодействия эффективных энергий (повреждений), МТД функция критических состояний, многокритериальная диаграмма ПС силовых систем

Трибофатическая и механотермодинамическая система. Общие положения. Магистральный путь совершенствования машин и оборудования — повышение

их производительности с обеспечением требуемой эксплуатационной надежности. А повышение производительности — это рост нагрузок, скоростей и

мощности, следовательно, возможное снижение надежности, а ее восстановление, поддержание и желательное дальнейшее повышение — это дополнительные и значительные материальные затраты в сфере производства. Но практика XX века показала, что рост технического уровня (параметров) современных машин и оборудования неизбежно приводит к огромным материальным потерям в сфере их эксплуатации. Статистика показывает, что износ, усталостные поломки, комплексные износоусталостные повреждения «обеспечивают» до 90...92 % преждевременных эксплуатационных отказов наиболее ответственных и массовых деталей и узлов современных машин и оборудования — их тяжело нагруженных трибофатических систем. Так, ~ 10 млрд долларов США ежегодно затрачивается во всем мире на борьбу с износом; ~ 10 млрд рублей РФ ежегодно расходует ОАО «РЖД» на борьбу с контактно-усталостными повреждениями только одной системы колесо/рельс; ~ 20 млн бел. рублей — цена отказа коробки передач с/х комбайна по критериям усталости и износа зубчатых колес.

Практика машиностроения потребовала разработки новых — инновационных подходов для обеспечения требуемой эксплуатационной надежности подобных систем. И одна из главных здесь задач — разработка практически приемлемой теории ПС сложных систем при комбинированном многопараметрическом воздействии силовых факторов и среды.

Решение такой задачи ищется в рамках и методами трибофатики [15–25 и др.].

В рамках трибофатики (а затем и МТД) разработан нетрадиционный подход к анализу критериев и условий, которые приводят к новой методологии построения теории ПС трибофатических и МТД систем. Основные ее положения таковы.

1. Ввиду того, что элементы МТД системы воспринимают нагрузки разной природы — механические, тепловые и электрохимические, традиционный анализ их повреждаемости и ПС при действии только механических напряжений или деформаций [1–13 и мн. др.] может служить основой исследований, но оказывается недостаточным и, следовательно, неэффективным. Это означает, что необходим анализ состояний МТД системы с наиболее общих — энергетических представлений.

2. Зарождение и развитие комплексного повреждения как генератора ПС определяется, главным образом, *четырьмя частными явлениями: механической усталостью, трением и изнашиванием, термодинамическими и электрохимическими процессами*. Эти явления называются частными в том смысле, что каждое из них может быть реализовано как независимое и отдельное, и оно ведет к соответствующему энергетическому состоянию и повреждаемости по частным (отдельным) критериям.

3. В общем случае все эти частные явления и процессы в МТД системе возникают одновременно

и в одной зоне, и тогда ее состояния обусловлены не одним каким-либо из указанных явлений, а их *совместным (совокупным) развитием и, следовательно, взаимодействием*.

4. Если физическое состояние МТД системы описывается всей подводимой к ней энергией u_{Σ} , то состояние ее повреждаемости определяется лишь эффективной (опасной) частью $u_{\Sigma}^{eff} \ll u_{\Sigma}$, которая затрачивается на генерирование, движение и взаимодействие необратимых повреждений.

5. Эффективная энергия u_{Σ}^{eff} в случае объемного деформирования твердых тел может быть представлена функцией четырех составляющих: тепловой u_T^{eff} , силовой $u_{n(\sigma)}^{eff}$, фрикционной u_{τ}^{eff} и электрохимической u_{ch}^{eff} энергий:

$$u_{\Sigma}^{eff} = F_{\Lambda} (u_T^{eff}, u_{n(\sigma)}^{eff}, u_{\tau}^{eff}, u_{ch}^{eff}), \quad (44)$$

где F_{Λ} учитывает необратимое кинетическое взаимодействие частных повреждающих явлений.

6. Обобщенным критерием предельного (критического) состояния служит условие достижения удельной эффективной энергией u_{Σ}^{eff} предельного значения — критической величины u_0 в некоторой области ограниченных размеров — в опасном объеме МТД системы:

$$u_{\Sigma}^{eff} = u_0. \quad (45)$$

7. Удельная энергия u_0 считается фундаментальной для данного вещества константой; она не должна зависеть от условий испытания, видов подводимой энергии, механизмов повреждения.

8. В общем случае критическое (предельное) состояние МТД системы достигается не в результате простого роста составляющих эффективной энергии и, следовательно, накопления необратимых повреждений, обусловленных отдельными воздействиями (нагрузками) разной природы, но в результате их *диалектического взаимодействия, направленность которого характеризуется развитием явлений самопроизвольного упрочнения-разупрочнения материалов* в данных условиях эксплуатации или испытаний.

Таким образом, гипотезу о критическом (предельном) состоянии МТД системы можно представить в следующем общем виде:

$$\Phi(u_{n(ch)}^{eff}, u_{\tau(ch)}^{eff}, u_{T(ch)}^{eff}, \Lambda_{k \setminus \setminus q}, m_k, u_0) = 0, \quad (46)$$

где $m_k, k = 1, 2, \dots$ — некоторые характеристические свойства (упрочнения-разупрочнения) контактирующих материалов; $\Lambda_{k \setminus \setminus q} \geq 1$ — три класса функций (параметров) диалектического взаимодействия эффективных энергий (необратимых повреждений), обусловленных нагрузками разной природы. Это означает, что при $\Lambda_k > 1$ прогнозируется (и реализуется) ускорение процессов повреждаемости, при $\Lambda_1 < 1$ — их замедление, а при $\Lambda_q = 1$ — их стабильное развитие.

9. Гипотеза (46) должна быть (с физической точки зрения) многокритериальной, т. е. она должна описывать не только состояния системы как целого, но и ее отдельных элементов по разным критериям потери работоспособности (износ, усталостное разрушение, выкрашивание, коррозионное повреждение, тепловое повреждение и др.). В частных случаях возможно достижение соответствующих критических (предельных) состояний по одному или двум, трем или нескольким критериям одновременно.

Как видно, изложенные выше представления не укладываются в гипотезу Надаи (42). По существу, они кладут начало очередному — *четвертому периоду* развития теорий прочности, принципиальной особенностью которого является учет *диалектического взаимодействия* необратимых повреждений, обусловленных нагрузками разной природы. Это означает, что в механике развиваются, дополнительно к факторному анализу, принципы и методы *феноменологического анализа* [16–24, 30, 31]. Следовательно, гипотеза (46) является не только обобщенной, но и фундаментальной.

Практически это приводит, в частности, к тому, что правая часть условия (4) должна быть формализована с учетом взаимодействия исследуемых факторов (k_m) и явлений (λ_n)

$$\sigma_{\text{экв}} \approx [\sigma] \leq \frac{\sigma_{\text{lim}}(k_m, \lambda_n)}{n_\sigma} \quad (47)$$

Таким образом универсальная характеристика ПС (σ_{lim}) становится фундаментальной ($\sigma_{\text{lim}}(k_m, \lambda_n)$).

Нетрудно видеть: конкретизация гипотезы (46) возможна только в том случае, если, прежде всего, имеется методика определения тензоров напряжений (деформаций) в любой точке трибофатической системы (см. рисунок 1), в том числе в области контактного взаимодействия двух ее элементов. Такую методику дает механико-математическая модель Сосновского–Журавков–Щербакова [24, 27]:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \sigma_{ij}^{(n)} + \sigma_{ij}^{(\tau)} + \sigma_{ij}^{(b)} = \left[\sigma_{ij}^{(hs)} \nu_z^{(surf)} \right] + \sigma_{ij}^{(\tau)} + \sigma_{ij}^{(b)} = \\ &= \left[\iint_{S(\xi, \eta)} p(\xi, \eta) \sigma_{ij}^{(B)}(\xi - x, \eta - y, z) d\xi d\eta \nu_z^{(S)}(x, y) \right] + \\ &+ \iint_{S(\xi, \eta)} q(\xi, \eta) \sigma_{ij}^{(C)}(\xi - x, \eta - y, z) d\xi d\eta + \sigma_{ij}^{(M)}(x, y, z) + \\ &+ \sigma_{ij}^{(N)}(x, y, z) + \sigma_{ij}^{(O)}(x, y, z). \end{aligned} \quad (48)$$

Объединенное напряженное состояние σ_{ij} описывается в этой модели суперпозицией напряжений, обусловленных как контактной (тензор нормальных $\sigma_{ij}^{(n)}$ и сдвиговых $\sigma_{ij}^{(\tau)}$ напряжений), так и внеконтактными ($\sigma_{ij}^{(b)}$) нагрузками. Поэтому, с точки зрения трибофатики, анализ (48) ведется с двух позиций. С одной стороны, можно интересоваться, как поле напряжений,

обусловленных объемным деформированием, возмущается в локальной области, в которой одновременно возбуждается поле контактных напряжений (рисунок 5). Такой анализ полезен, когда в трибофатической системе реализуется *прямой эффект* [16], называемый эффектом Сосновского–Серенсена [32, 33]. По существу, это *задачи теории упругости, освобожденные от принципа Сен-Венана* [16, 33]. С другой стороны, можно интересоваться, как изменяется локальное поле контактных напряжений, когда на него накладывается поле напряжений, обусловленных объемным деформированием (рисунок 6). Такой анализ полезен, когда в трибофатической системе реализуется *обратный эффект* [16], называемый эффектом Сосновского–Шарая [32, 33]. По существу, это *новый класс задач в механике контактного взаимодействия* [16, 33]. Понятно, что уравнение (48) позволяет делать подобные анализы как в количественном отношении, так и в качественном плане практически при любых условиях нагружения.

Ниже дается решение задачи (46) и (47) с использованием модели (48).

Общее решение. Пусть трибофатическая система работает в среде с повышенной температурой и находится под воздействием как контактной нагрузки, так и любых неконтактных нагрузок, которые сводятся к соответствующей системе внутренних силовых факторов (см. рисунок 1 и таблицу 1).

Рассмотрим *работу внутренних сил в элементарном объеме dV трибофатической системы*. В общем случае дифференциал работы внутренних сил и температуры dT_Σ запишем с учетом правила раскрытия бискалярного произведения *тензоров напряжений и деформации T и E* :

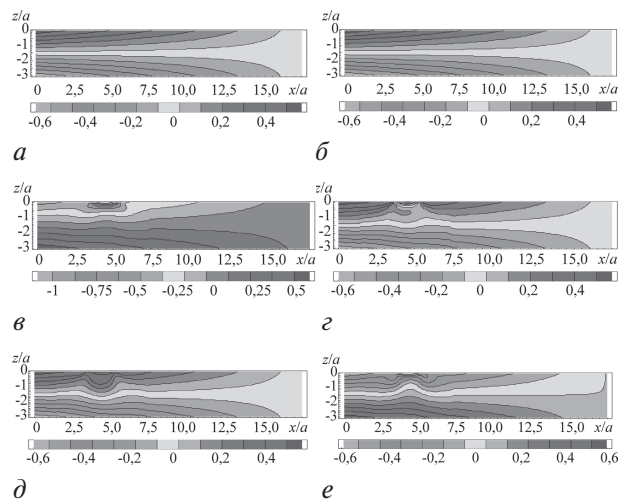


Рисунок 5 — Распределение напряжений $\sigma_{xx}^{(b)}$ (а), $\sigma_{xx}^{(n)} + \sigma_{xx}^{(b)}$ ($F_b < 0$) (б), $\sigma_{xx}^{(n)} - \sigma_{xx}^{(b)}$ ($F_b > 0$) (в), отнесенных к p_0 и деформаций $\varepsilon_{xx}^{(b)}$ (д), $\varepsilon_{xx}^{(n)} + \varepsilon_{xx}^{(b)}$ ($F_b < 0$) (е), $\varepsilon_{xx}^{(n)} - \varepsilon_{xx}^{(b)}$ ($F_b > 0$) (е), отнесенных к p_0 / E (E — модуль упругости), в плоскости $y = 0$ при $a / b = 0,5$

$$du = T \cdot dE + kdT_{\Sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d\varepsilon_{xx} & d\gamma_{xy} & d\gamma_{xz} \\ d\gamma_{yx} & d\varepsilon_{yy} & d\gamma_{yz} \\ d\gamma_{zx} & d\gamma_{zy} & d\varepsilon_{zz} \end{pmatrix} + kdT_{\Sigma} = \sigma_x d\varepsilon_x + \sigma_y d\varepsilon_y + \sigma_z d\varepsilon_z + \tau_{xy} d\gamma_{xy} + \tau_{xz} d\gamma_{xz} + \tau_{yz} d\gamma_{yz} + kdT_{\Sigma}, \quad (49)$$

где k — постоянная Больцмана.

Будем исходить из того положения, что в общем случае, в соответствии с классическими представлениями, определяющую роль в формировании износоусталостного повреждения играют и нормальные и касательные напряжения, которые обуславливают соответственно процессы *сдвига* (вследствие трения) и *отрыва* (вследствие растяжения-сжатия).

В этой связи обобщенный тензор T целесообразно разделить на две части: T_{τ} — *совмещенный тензор фрикционно-сдвиговых напряжений*, или, ко-

роче, *тензор сдвига*, и T_{σ} — *объединенный тензор нормальных напряжений (растяжения-сжатия)*, или, короче, *тензор отрыва*. Итак, в (49) выделим отрывную T_{σ} и сдвиговую T_{τ} части тензора T :

$$du = T^{(V,W)} \cdot dE^{(V,W)} + kdT_{\Sigma} = (T_{\sigma}^{(V,W)} + T_{\tau}^{(V,W)}) \cdot dE^{(V,W)} + kdT_{\Sigma} = T_{\sigma}^{(V,W)} \cdot dE^{(V,W)} + T_{\tau}^{(V,W)} \cdot dE^{(V,W)} + kdT_{\Sigma} = du_{\sigma} + du_{\tau} + du_T. \quad (50)$$

Дадим следующее представление тензоров T и E :

$$T = T^{(V,W)} = T(T^{(V)}, T^{(W)}); E = E^{(V,W)} = E(E^{(V)}, E^{(W)}). \quad (51)$$

Здесь тензоры напряжений и деформаций с индексом V обусловлены действием объемных нагрузок (общие случаи трехмерного изгиба, кручения, растяжения-сжатия), а с индексом W обусловлены контактным взаимодействием элементов системы.

И тогда выражение (50) с учетом (51) можно представить в виде

$$du = T^{(V,W)} \cdot dE^{(V,W)} + kdT_{\Sigma} = (T_{\sigma}^{(V,W)} + T_{\tau}^{(V,W)}) \cdot dE^{(V,W)} + kdT_{\Sigma} = T_{\sigma}^{(V,W)} \cdot dE^{(V,W)} + T_{\tau}^{(V,W)} \cdot dE^{(V,W)} + kdT_{\Sigma} = du_{\sigma} + du_{\tau} + du_T. \quad (52)$$

В случае линейной зависимости между напряжениями и деформациями (56) примет вид

$$T = T^{(V,W)} = T^{(V)} + T^{(W)} = \begin{pmatrix} \sigma_x^{(V)} + \sigma_x^{(W)} & \tau_{xy}^{(V)} + \tau_{xy}^{(W)} & \tau_{xz}^{(V)} + \tau_{xz}^{(W)} \\ \tau_{yx}^{(V)} + \tau_{yx}^{(W)} & \sigma_y^{(V)} + \sigma_y^{(W)} & \tau_{yz}^{(V)} + \tau_{yz}^{(W)} \\ \tau_{zx}^{(V)} + \tau_{zx}^{(W)} & \tau_{zy}^{(V)} + \tau_{zy}^{(W)} & \sigma_z^{(V)} + \sigma_z^{(W)} \end{pmatrix}; \quad (53)$$

$$E = E^{(V,W)} = E^{(V)} + E^{(W)} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x^{(V)} + \varepsilon_x^{(W)} & \gamma_{xy}^{(V)} + \gamma_{xy}^{(W)} & \gamma_{xz}^{(V)} + \gamma_{xz}^{(W)} \\ \gamma_{yx}^{(V)} + \gamma_{yx}^{(W)} & \varepsilon_y^{(V)} + \varepsilon_y^{(W)} & \gamma_{yz}^{(V)} + \gamma_{yz}^{(W)} \\ \gamma_{zx}^{(V)} + \gamma_{zx}^{(W)} & \gamma_{zy}^{(V)} + \gamma_{zy}^{(W)} & \varepsilon_z^{(V)} + \varepsilon_z^{(W)} \end{pmatrix}; \quad (54)$$

а (52) будет

$$du = u = \frac{1}{2} T \cdot E + kdT_{\Sigma} = \frac{1}{2} (T^{(V)} + T^{(W)}) \cdot (E^{(V)} + E^{(W)}) + kdT_{\Sigma} = \frac{1}{2} [(T_{\sigma}^{(V)} + T_{\sigma}^{(W)}) + (T_{\tau}^{(V)} + T_{\tau}^{(W)})] \cdot (E^{(V)} + E^{(W)}) + kdT_{\Sigma} =$$

$$= \frac{1}{2} \left[\begin{pmatrix} \sigma_x^{(V)} + \sigma_x^{(W)} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^{(V)} + \sigma_y^{(W)} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z^{(V)} + \sigma_z^{(W)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \tau_{xy}^{(V)} + \tau_{xy}^{(W)} & \tau_{xz}^{(V)} + \tau_{xz}^{(W)} \\ \tau_{yx}^{(V)} + \tau_{yx}^{(W)} & 0 & \tau_{yz}^{(V)} + \tau_{yz}^{(W)} \\ \tau_{zx}^{(V)} + \tau_{zx}^{(W)} & \tau_{zy}^{(V)} + \tau_{zy}^{(W)} & 0 \end{pmatrix} \right] \cdot$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x^{(V)} + \varepsilon_x^{(W)} & \gamma_{xy}^{(V)} + \gamma_{xy}^{(W)} & \gamma_{xz}^{(V)} + \gamma_{xz}^{(W)} \\ \gamma_{yx}^{(V)} + \gamma_{yx}^{(W)} & \varepsilon_y^{(V)} + \varepsilon_y^{(W)} & \gamma_{yz}^{(V)} + \gamma_{yz}^{(W)} \\ \gamma_{zx}^{(V)} + \gamma_{zx}^{(W)} & \gamma_{zy}^{(V)} + \gamma_{zy}^{(W)} & \varepsilon_z^{(V)} + \varepsilon_z^{(W)} \end{pmatrix} + kdT_{\Sigma}.$$

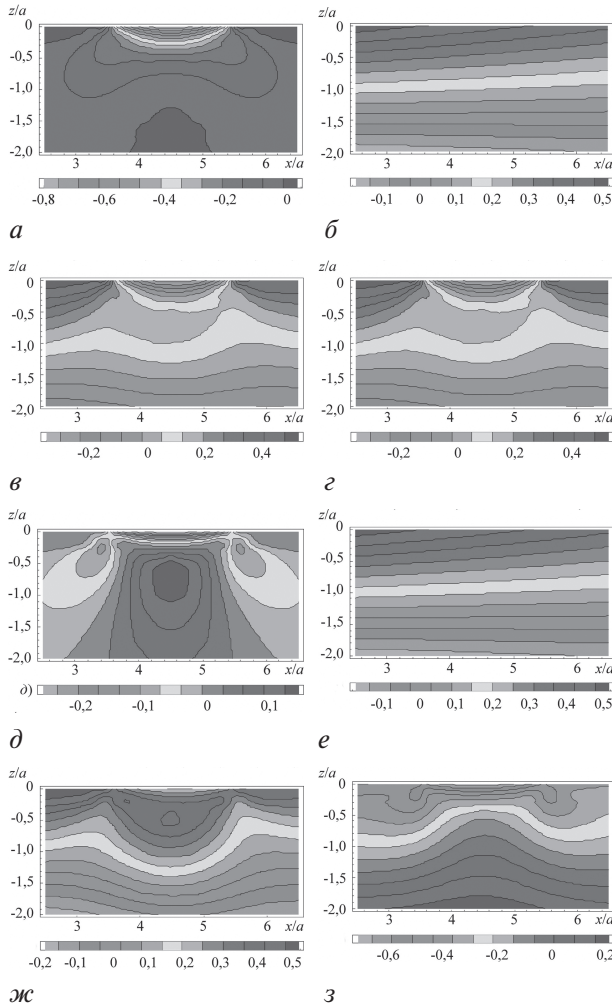


Рисунок 6 — Распределения напряжений $\sigma_{xx}^{(n)}$ (а), $\sigma_{xx}^{(b)}$ (б), $\sigma_{xx}^{(n)} + \sigma_{xx}^{(b)}$ ($F_b < 0$) (в), $\sigma_{xx}^{(n)} - \sigma_{xx}^{(b)}$ ($F_b > 0$) (з), отнесенных к p_0 , и деформаций $\varepsilon_{xx}^{(n)}$ (д), $\varepsilon_{xx}^{(b)}$ (е), $\varepsilon_{xx}^{(n)} + \varepsilon_{xx}^{(b)}$ ($F_b < 0$) (ж), $\varepsilon_{xx}^{(n)} - \varepsilon_{xx}^{(b)}$ ($F_b > 0$) (з), отнесенных к p_0/E (E — модуль упругости), в окрестности контакта в плоскости $y = 0$ при $a/b = 0,5$

Из (55) видно, что отрывная часть T_σ тензора T представляет собой сумму отрывных частей тензоров при объемном деформировании $T_\sigma^{(V)}$ и поверхностном нагружении (трении) $T_\sigma^{(W)}$, а сдвиговая T_τ — сумму сдвиговых частей $T_\tau^{(V)}$ и $T_\tau^{(W)}$. В этом и состоит *принципиальное отличие* обобщенного подхода к построению критерия ПС трибофатических систем.

Из общей энергии (55) выделим ее *эффективную часть* в соответствии с работами [15, 16]. Для этого введем коэффициенты $A_\sigma(V)$, $A_\tau(V)$ и $A_T(V)$ соответствующей размерности, которые определяют долю поглощенной энергии

$$du_\Sigma^{eff} = \Lambda_{M \setminus T}(V) \{ \Lambda_{\tau \setminus \sigma}(V) [A_\sigma(V) T_\sigma \cdot dE + A_\tau(V) T_\tau \cdot dE] + A_T(V) k dT_\Sigma \} \quad (56)$$

или

$$du_\Sigma^{eff} = \Lambda_{M \setminus T}(V) \{ \Lambda_{\tau \setminus \sigma}(V) [A_\sigma(V) du_\sigma + A_\tau(V) du_\tau] + A_T(V) du_T \}, \quad (57)$$

где $\Lambda_{\tau \setminus \sigma}(V)$, $\Lambda_{M \setminus T}(V)$ — функции взаимодействия между энергиями различной природы. Индекс $\tau \setminus \sigma$ означает, что функция Λ описывает взаимодействие между сдвиговой (τ) и отрывной (σ) составляющими эффективной энергии, а индекс $M \setminus T$ означает, что функция Λ описывает взаимодействие между механической (M) и тепловой (T) частями эффективной энергии. То, что коэффициенты A могут быть, вообще говоря, различными для различных точек объема V , позволяет учитывать неоднородность материала.

Принимая во внимание (57), можно сформулировать критерий ПС в следующем виде:

$$\Lambda_{M \setminus T}(V) \{ \Lambda_{\tau \setminus \sigma}(V) [du_\sigma^{eff} + du_\tau^{eff}] + du_T^{eff} \} = u_0. \quad (58)$$

где u_0 — независимая от условий и механизмов нагружения энергия активации процессов разрушения.

В случае линейной зависимости между напряжениями и деформациями выражения (56) и (57) будут соответственно

$$u_\Sigma^{eff} = \Lambda_{M \setminus T}(V) \left\{ \Lambda_{\tau \setminus \sigma}(V) \left[\frac{1}{2} A_\sigma(V) T_\sigma \cdot E + \frac{1}{2} A_\tau(V) T_\tau \cdot E \right] + A_T(V) k T_\Sigma \right\}, \quad (59)$$

или

$$\begin{aligned} u_\Sigma^{eff} &= \Lambda_{M \setminus T}(V) \{ \Lambda_{\tau \setminus \sigma}(V) [A_\sigma(V) u_\sigma(V) + A_\tau(V) u_\tau(V)] + A_T(V) u_T(V) \} = \\ &= \Lambda_{M \setminus T}(V) \{ \Lambda_{\tau \setminus \sigma}(V) [u_\sigma^{eff}(V) + u_\tau^{eff}(V)] + u_T^{eff}(V) \}. \end{aligned} \quad (60)$$

С учетом (51) критерий (58) можно представить следующим образом:

$$u_\Sigma^{eff} = \left\{ \left[u_\sigma^{eff}(T_\sigma^{(V,W)}, E_\sigma^{(V,W)}) + u_\tau^{eff}(T_\tau^{(V,W)}, E_\tau^{(V,W)}) \right] \Lambda_{\sigma \setminus \tau} + u_\tau^{eff} \right\} \Lambda_{T \setminus M} = u_0. \quad (61)$$

В случае, когда необходимо учесть временные эффекты, критерий (61) примет вид:

$$u_\Sigma^{eff} = \int_0^t \left\{ \left[u_\sigma^{eff}(T_\sigma^{(V,W)}, E_\sigma^{(V,W)}, t) + u_\tau^{eff}(T_\tau^{(V,W)}, E_\tau^{(V,W)}, t) \right] \Lambda_{\sigma \setminus \tau}(t) + u_T^{eff}(t) \right\} \Lambda_{T \setminus M}(t) dt = U_0. \quad (61a)$$

Критерий в формах (61) и (61a) гласит: *когда сумма взаимодействующих эффективных составляющих (компонент) энергии, обусловленной действием комплекса силовых, фрикционной и тепловой (термодинамической) нагрузок, достигнет критической (предельной) величины u_0 , реализуется критическое (или предельное) состояние МТД системы* (как отдельных элементов, так и системы в целом). Физически оно определяется многими и разными повреждениями.

Критерий (60) и (61a) являются обобщенными и фундаментальными, так как они построены на основе наиболее общего — энергетического подхода описания механического состояния системы и ее элементов; анализа произвольного НДС обоих элементов системы и с учетом многообразных Λ -взаимодействий необратимых повреждений в трибофатической системе. Отметим, что процессы электрохимической повреждаемости в этих критериях нами не анализируются; такая специфическая и сложная задача выходит за рамки данной статьи.

Укажем на фундаментальный характер параметра u_0 . Следуя работам [34–39], параметр u_0 будем трактовать как *начальную энергию активации процесса разрушения*. Было показано, что величина u_0 примерно совпадает с *теплотой сублимации для металлов и кристаллов с ионными связями, а также с энергией активации термодеструкции для полимеров*:

$$u_0 \approx u_T.$$

С другой стороны, величина u_0 определяется как *энергия активации механического разрушения*:

$$u_0 \approx u_M.$$

Следовательно, энергию u_0 можно считать *константой вещества*:

$$u_0 \approx u_M \approx u_T = \text{const}. \quad (62)$$

Принимая во внимание физико-механические и термодинамические представления о процессах повреждаемости и разрушения [35, 37, 38], запишем (62) в виде

$$u_M = s_k \frac{\sigma_{ih} C_a}{E \alpha_V} = u_0 = k T_S \ln \frac{k \theta_D}{h} = u_T, \quad (63)$$

где s_k — коэффициент приведения; σ_{ih} — теоретическая прочность; E — модуль упругости; C_a — атомная теплоемкость; α_V — коэффициент термического расширения объема; k — постоянная Больцмана; T_S — температура плавления; θ_D — температура Дебая; h — постоянная Планка. В соответствии с левой частью (63) приближенно можно принять [34]

$$u_0 \approx \varepsilon_* \frac{C_a}{\alpha_V}, \quad (64)$$

где $\varepsilon_* \approx 0,6$ — предельная деформация межатомной связи. Вычисления по (64) не представляют затруднений, однако разработаны и методы экспериментального определения величины u_0 (см., например, [36]).

Из равенств (63) следует, что u_0 — энергия активации данного вещества, по порядку величины равная $1 \dots 10$ эВ в расчете на одну частицу, атом или молекулу ($\sim 10^2 \dots 10^3$ кДж/ моль), т. е. *величина, близкая к энергии разрыва межатомной связи в твердом теле* [39]. И ее уровень не зависит от того, каким способом достигается разрушение — механическим, тепловым либо их совокупным действием. В работе [36] можно найти таблицы, содержащие величины U_0 для различных материалов.

В соответствии с работами [16, 26], функция $\Lambda_{k \setminus \setminus n}$ взаимодействия повреждений в трибофатической системе определяется параметрами ρ_{jT} соотношения эффективных энергий u_{jT}^{eff} :

$$\Lambda_{k \setminus \setminus n} = \Lambda_{k \setminus \setminus n}(\rho_{M \setminus T}, \rho_{\tau \setminus \sigma}) \geq 1; \quad (65)$$

$$\rho_{\tau \setminus \sigma} = u_{\tau}^{eff} / u_{\sigma}^{eff}, \quad \rho_{M \setminus T} = u_M^{eff} / u_T^{eff}. \quad (66)$$

Величины Λ , вычисляемые по (65) с учетом (66), описывают влияние уровня соотношений нагрузочных параметров на характер и направленность взаимодействия необратимых повреждений, обусловленных нагрузками разной природы [16, 26]. Если $\Lambda > 1$, система является саморазупрочняющейся, т. к. в балансе явлений упрочнение-разупрочнение преимущественное развитие получают процессы разупрочнения, а если $\Lambda < 1$, то она самоупрочняется, т. к. в балансе явлений упрочнение-разупрочнение превалируют процессы упрочнения. При $\Lambda = 1$ система оказывается стабильной — самопроизвольные явления упрочнения-разупрочнения в ней находятся в равновесии.

Частные случаи. Полученные общие решения не могут быть проверены из-за отсутствия результатов соответствующих испытаний. Поэтому рассмотрим далее частный случай, когда в (60) принимается $A_n(V) = A_n = \text{const}$, $A_{\tau}(V) = A_{\tau} = \text{const}$, $A_T(V) = A_T = \text{const}$, $A_{\tau \setminus n}(V) = A_{\tau \setminus n} = \text{const}$, $A_{M \setminus T}(V) = A_{M \setminus T} = \text{const}$.

В таком случае напряженное состояние, во-первых, обусловлено объемным деформированием, для которого можно пренебречь всеми компонентами тензора напряжений, кроме одного σ (одномерное растяжение-сжатие, чистый изгиб). Во-вторых, напряженное состояние обусловлено поверхностным трением, для которого можно пренебречь всеми компонентами тензора напряжений, кроме одного τ_w . Тогда

$$u_{\Sigma}^{eff} = \Lambda_{M \setminus T} \left[a_{\Sigma} T_{\Sigma} + \Lambda_{n \setminus \tau} (a_n \sigma^2 + a_{\tau} \tau_w^2) \right] = u_0, \quad \Lambda \geq 1. \quad (67)$$

Уравнение (67) получено (из простейших соотношений) и исследовано в работах [16, 18]. Оно слу-

жит, в частности, для разработки методики оценки параметров a_T , a_n , a_{τ} , которые «выделяют» из полной энергии ее эффективные части. В самом деле, при $\Lambda_{M \setminus T} = \Lambda_{\tau \setminus n} = 1$ имеем граничные условия:

$$\left. \begin{aligned} T_{\Sigma} = 0, \tau_w = 0; & \quad a_n \sigma_d^2 = u_0; \quad a_n = u_0 / \sigma_d^2; \\ T_{\Sigma} = 0, \sigma = 0; & \quad a_{\tau} \tau_d^2 = u_0; \quad a_{\tau} = u_0 / \tau_d^2; \\ \sigma = 0, \tau_w = 0; & \quad a_{\tau} \sigma_d = u_0; \quad a_T = u_0 / T_d, \end{aligned} \right\} \quad (68)$$

где σ_d , τ_d — нормальное и фрикционное предельные напряжения при $T \rightarrow 0$, называемые *пределами* (механической) *деструкции*; T_d — температура деструкции (при $\sigma = 0$, $\tau_w = 0$), или *предел термодеструкции* [15].

Эффективную («опасную») часть полной энергии деформации можно определить и исходя из следующих физических соображений. Будем считать, что *поток энергии деформации* U , генерируемый в образце материала при его циклическом деформировании ($\varepsilon = \varepsilon_{\max} \sin \omega t$) в условиях однородного (линейного) напряженного состояния в известной мере *аналогичен световому потоку*. В самом деле, он непрерывно возбуждается в связи с повторением цикла нагружения с частотой $\omega = 1 / \lambda$, что позволяет рассматривать его как волну (с длиной λ). Некоторая часть генерируемой таким образом энергии U может поглощаться атомами и структурными образованиями материала, что ведет к его повреждению. Обозначим поглощаемую часть энергии через U^{eff} , тогда очевидно, что

$$U = U^{eff} + U_{cons}, \quad (69)$$

где U_{cons} — непоглощенная (называемая здесь *консервативной*) часть генерируемой энергии U .

Если аналогия света и энергии деформации правомерна, то закон поглощения деформации может быть аналогичным закону поглощения света Бугера. Следовательно, уравнение, связывающее энергию U_{cons} , прошедшую через объем V деформируемого материала, с генерируемой энергией U имеет вид

$$U_{cons} = U \exp(-\chi_{\varepsilon} V), \quad (70)$$

или, по Ламберту, в дифференциальной форме

$$\frac{dU}{U} = -\chi_{\varepsilon} V. \quad (71)$$

Здесь независимый от U коэффициент χ_{ε} является, как и в уравнении Бугера–Ламберта, параметром поглощения энергии.

Учитывая (70) в (69), получаем закон поглощения энергии деформации

$$U^{eff} = U [1 - \exp(-\chi_{\varepsilon} V)], \quad (72)$$

откуда следует, что при $U = 0$ или $V = 0$ будет и $U^{eff} = 0$. А при $V \rightarrow \infty$ оказывается, согласно (70), что $U_{cons} \rightarrow U$, т. е. вся подведенная энергия рассеивается в таком объеме.

С физической точки зрения процесс поглощения энергии деформации обусловлен многими явлениями:

- переходом электронов в поглощающих атомах с более низких уровней энергии на более высокие уровни (квантовая теория [40]);
- возникновением и развитием дислокационных структур (теория дислокаций [41]);
- возникновением остаточных деформаций (напряжений) II и III рода (теория упругости [42]);
- образованием и развитием любых несовершенств (дефектов) состава и строения материала — точечных, плоских, объемных (физическое материаловедение [43]);
- явлениями упрочнения-разупрочнения (в том числе деформационного старения), развивающимися во времени (теория усталости [44]);
- изменением (внутренней) трибофатической энтропии (механика износоусталостного повреждения [45]).

Заметим, что подход (72) можно распространить и на случай трения, поскольку всякий индентор гонит перед собой волну деформации в тонком поверхностном слое сопряженного с ним под давлением твердого тела [14]; параметр поглощения энергии в таком случае будет χ_γ , где индекс γ указывает на деформацию сдвига. Аналогично можно рассмотреть и поглощение тепла в твердом деформируемом теле. Наконец, нетрудно решить задачу о поглощении энергии деформации в условиях неоднородного (в том числе и сложного) напряженного состояния, вводя в (70)–(72) опасный объем $V = V_{Py}$ [46, 47].

Хотя критерий (67) и является частным, но он имеет принципиальный и общий характер. Общий характер его обусловлен тем, что здесь приняты во внимание все основные явления, определяющие МТД состояние системы (пусть и в упрощенной, по напряженно-деформированному состоянию, постановке). Принципиальный характер его состоит в том, что здесь, как в полном решении (61), $\Lambda_{n\tau}$ учитывает взаимодействие эффективных частей механической энергии, обусловленных нормальными σ и фрикционными τ_w напряжениями, а $\Lambda_{M,T}$ —

взаимодействие тепловой и механических составляющих эффективной энергии. Эффективная часть тепловой энергии определяется изменением суммарной температуры $T_\Sigma = T_2 - T_1$ в зоне силового контакта, обусловленной всеми источниками тепла, в том числе выделяемого при механическом (объемном и поверхностном) деформировании, структурных превращениях и т. п.

Из (67) нетрудно получить ряд важных для практики формул. Так, условия *чисто теплового* (или *термодинамического*, когда $\sigma = 0$ и $\tau_w = 0$), либо *чисто механического* (когда $T_\Sigma \rightarrow 0$) разрушения будут соответственно следующими:

$$a_\tau T_\Sigma = u_0; \tag{73}$$

$$\Lambda_{n\tau} (a_n \sigma^2 + a_\tau \tau_w^2) = u_0. \tag{74}$$

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

$$\Lambda_{M,T} (a_\tau T_\Sigma + a_n \sigma^2) = u_0, \tag{75}$$

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

$$\Lambda_{M,T} (a_\tau T_\Sigma + a_\tau \tau_w^2) = u_0. \tag{76}$$

Общий анализ описанных выше частных критериев позволяет сделать три основных вывода.

1. Рост нагрузочных параметров (σ, τ_w, T_Σ) ведет к соответствующему ускорению достижения ПС (u_0).

2. ПС системы может быть достигнуто и за счет увеличения только одного (любого) из нагрузочных параметров (при сохранении неизменными величин остальных параметров).

3. Если $\Lambda > 1$, то повреждаемость системы соответственно усиливается (т. е. преобладают процессы ее разупрочнения), а при $\Lambda < 1$ она замедляется (т. е. преимущественными оказываются процессы ее упрочнения), по сравнению с повреждаемостью, обусловленной совокупным действием одних только нагрузочных параметров (без учета

Таблица 6 — Сводка основных физических признаков предельного состояния

Обозначение	Физическое состояние и его характеристика	Условие достижения предельного (критического) состояния
M	Механическое состояние σ_{ij}	$u_n^{eff} \xrightarrow{\sigma_i \rightarrow \sigma_{lim}} u_0$
T	Термодинамическое состояние T_Σ	$u_T^{eff} \xrightarrow{T_\Sigma \rightarrow T_s} u_0$
MTD	Механотермодинамическое состояние σ_{ijT}, T_Σ	$u_\Sigma^{eff} \xrightarrow[\begin{smallmatrix} T_\Sigma \rightarrow T_s \\ \sigma_{ijT} \rightarrow \sigma_{lim}(T) \end{smallmatrix}]{\sigma_{ijT} \rightarrow \sigma_{lim}(T)} u_0$
tMTD	Механотермодинамическое состояние во времени $\sigma_{ijT}, T_\Sigma, t$	$u_\Sigma^{eff} \xrightarrow[\begin{smallmatrix} T_\Sigma \rightarrow T_s \\ t \rightarrow t_{lim} \end{smallmatrix}]{\sigma_{ijT} \rightarrow \sigma_{lim}(T)} u_0$

Обозначения: σ_{lim} — предельное напряжение; T_s — температура плавления; t_{lim} — долговечность; σ_{ij} — тензоры напряжений (деформаций); T_Σ — температура, обусловленная всеми источниками тепла; σ_{ijT} — тензор напряжений при изотермическом ($T_\Sigma = \text{const}$) состоянии; σ_{ijT}, T_Σ — напряженно-деформированное и термодинамическое состояние; $\sigma_{ijT}, T_\Sigma, t$ — напряженно-деформированное и термодинамическое состояние во времени

диалектического взаимодействия необратимых повреждений).

Как уже отмечалось, последний вывод и есть результат *принципиально нового подхода* к построению критерия ПС МТД систем [30]. Согласно этому подходу, *не взаимное влияние факторов, а взаимодействие ($\Lambda \geq 1$) явлений — вот что определяет процессы повреждаемости и достижения ПС в МТД системе* [26–29, 31].

В таблицах 6 и 7 дана сводка физических признаков различных (часто встречающихся на практике) признаков ПС, которая может быть полезной специалистам в соответствующих областях исследований. Характеристики ПС, представленные в таблице 7, предназначены для использования в условии (47).

В качестве примера изучим температурную зависимость пределов выносливости (критериальное условие L8 в таблице 7). На рисунке 7 представлены в соответствующих координатах результаты 136 усталостных испытаний различных конструкционных сталей в широком диапазоне температур от 20К до 1273К, полученных многими авторами. Нетрудно видеть: выявить здесь какие-либо закономерности (а тем более дать их обобщение) не представляется возможным. Выполним анализ приведенных экспериментальных данных, используя одно из изложенных частных решений.

Из (75) следует

$$\lg \sigma_{-1T} = \frac{1}{2} \lg C_T; C_T = [u_0 / \Lambda_{MVT} - a_T T_\Sigma] \cdot \frac{1}{a_n}. \quad (77)$$

Таблица 7 — Конкретизация характеристик и соответствующих им физических признаков предельного состояния

Обозначение критериального условия	Условие достижения предельного состояния	Физический признак
L1	$\sigma_{lim} = \sigma_b$, σ_b — предел прочности при растяжении	Статическое разрушение
L2	$\sigma_{lim} = \sigma_{-1}$, σ_{-1} — предел выносливости при механической усталости	Усталостное разрушение (на части)
L3	$\sigma_{lim} = p_f$, p_f — предельное контактное давление при качении	Ямки выкрашивания критической плотности (критической глубины), недопустимый износ
L4	$\sigma_{lim} = \tau_f$, τ_f — предельное фрикционное напряжение при скольжении	Износ предельной величины
L5	$\sigma_{lim} = \begin{cases} \sigma_{-1p} \\ \sigma_{-1\tau} \end{cases}$, $\sigma_{-p}, \sigma_{-1\tau}$ — предельные напряжения при реализации прямого эффекта	Усталостное разрушение (на части) в зависимости от контактного давления (индекс p) при качении или фрикционного напряжения (индекс τ) при скольжении (прямой эффект в трибофатике)
L6	$\sigma_{lim} = \begin{cases} p_{f\sigma} \\ \tau_{f\sigma} \end{cases}$, $p_{f\sigma}, \tau_{f\sigma}$ — предельные напряжения при реализации обратного эффекта	Ямки выкрашивания критической плотности (критической глубины) или недопустимый износ (при качении или скольжении) в зависимости от уровня циклических напряжений (индекс σ) (обратный эффект в трибофатике)
L7	$\sigma_{lim} = \sigma_{-1q}$, σ_{-1q} — предел выносливости при фреттинг-усталости	Усталостное разрушение при фреттинг-коррозии и (или) фреттинг-износе
L8	$\sigma_{lim} = \sigma_{-1T}$, σ_{-1T} — предел выносливости при изотермической усталости	Предельное состояние в зависимости от температуры (изотермическая усталость)
L9	$T_{lim} = T_s$, T_s — температура плавления	Тепловое (термодинамическое) разрушение
L10	$t_{lim} = t_c$, t_c — долговечность	Время (физическое) до наступления предельного состояния по любому признаку

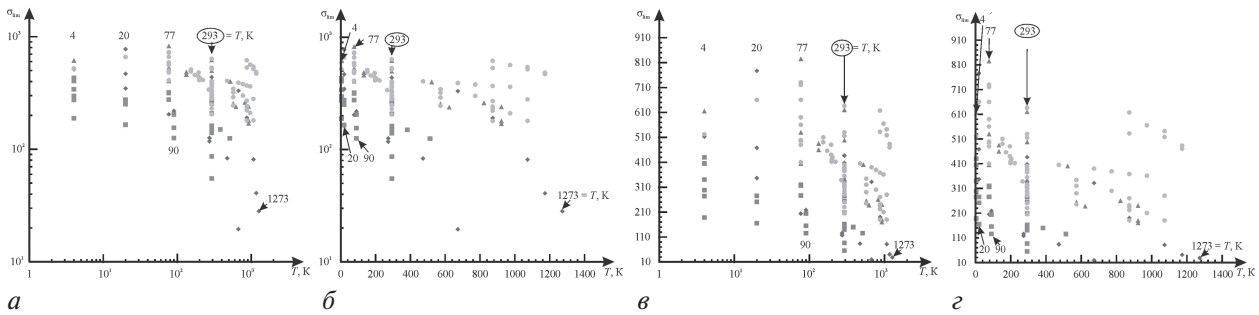


Рисунок 7 — Явные зависимости предела выносливости от температуры для конструкционных сталей в логарифмических (а) и полулогарифмических (б), (в) и равномерных (г) координатах

Согласно (77), зависимость предельных напряжений от параметра термомеханического сопротивления C_T в двойных логарифмических координатах должна быть прямой линией с угловым коэффициентом (1/2). Общая закономерность такова: чем выше значение параметра C_T , тем больше величина σ_{-1T} . На рисунке 8 дано убедительное подтверждение этой зависимости, как указано выше, для многочисленных марок стали, испытанных на усталость в различных условиях. Видно, что значение C_T изменялось более чем на два порядка, т. е. в 100 и более раз, а величины предела выносливости σ_{-1T} — более чем на порядок, т. е. в 10 и более раз, при этом температура испытаний варьировалась в диапазоне от гелиевой до $0,8T_s$. Как следует из рисунка 8, уравнение (77) адекватно описывает результаты более 130 экспериментов.

Далее был выполнен аналогичный анализ результатов испытаний на растяжение при разных температурах (σ_{bT} — предел прочности); в этом случае в уравнении (77) принимается $\sigma_{-1T} = \sigma_{bT}$ (рисунок 9). Видно, что коэффициент корреляции очень высок — не менее $r = 0,722$ (в редких случаях), но в большинстве случаев он превышает $r = 0,9$; анализ включает более 300 результатов испытаний. В работах [18, 48] изложены и другие примеры успешной экспериментальной апробации критерия (77). Это позволяет надеяться, что и более общие критерии окажутся практически приемлемыми. Дальнейшие исследования должны, по нашему мнению, подтвердить эту надежду.

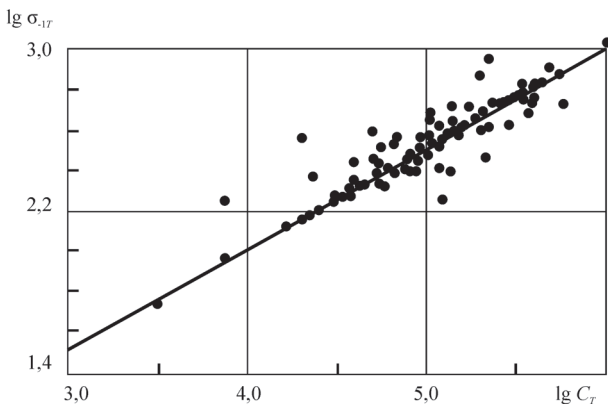


Рисунок 8 — Зависимость пределов выносливости конструкционных сталей от параметра C_T

В заключение была аналогично выполнена обработка более 600 результатов испытаний на растяжение и на усталость материалов разной природы.

Обобщенная экспериментально обоснованная МТД функция предельных (по повреждаемости) состояний дана на рисунке 10. Относительно большие отклонения отдельных экспериментальных точек от прогнозируемого состояния обнаруживаются и на рисунке 8 — по двум причинам: либо в литературных источниках не хватает данных для корректной оценки необходимых параметров, либо в проведенных экспериментах были допущены существенные погрешности или они были не вполне методически корректными. Так это или не так, покажет возможный анализ других исследователей.

Таким образом, анализ результатов более 600 испытаний материалов разной природы (в изотермических условиях), выполненных многими авторами, показал, что термодинамическая зависимость предельных напряжений может быть представлена в координатах $\lg \sigma_{\text{lim}} - \lg C_T$ (см. рисунки 8 и 9 и формулу (77)), где функция

$$C_T = C_T(T, u_0, a_n, a_T, \Lambda_{MT}) \quad (78)$$

удовлетворительно работает и в условиях статического растяжения ($\sigma_{\text{lim}} = \sigma_b$), и в условиях усталостного разрушения ($\sigma_{\text{lim}} = \sigma_{-1}$) для многих и разных материалов (стали; алюминиевые, титановые и др. сплавы, полимеры и т. д.). При этом взаимосвязь (77) оказывается справедливой практически в полных интервалах возможного изменения температуры ($T_\Sigma \leq T \leq T_s$) и напряжений ($\sigma \leq \sigma_b$) с коэффициентом корреляции $r = 0,7$ в отдельных случаях, обычно же $r > 0,9$. Таким образом, модель (77) представляется фундаментальной (рисунок 11). С теоретической точки зрения можно высказать следующие соображения в пользу такого заключения. Модель (77) имеет четыре параметра (см. (78)), причем один из них (u_0) есть фундаментальная константа вещества (см. формулы (62), (63)), а два других (a_T, a_n) определяются из условий (68) как соотношения u_0 и физических констант σ_d и T_d данного материала:

$$a_n = u_0 / \sigma_d^2; a_T = u_0 / T_d. \quad (79)$$

Методики определения σ_d и T_d описаны в литературе [16, 48]. Здесь же напомним, что предел

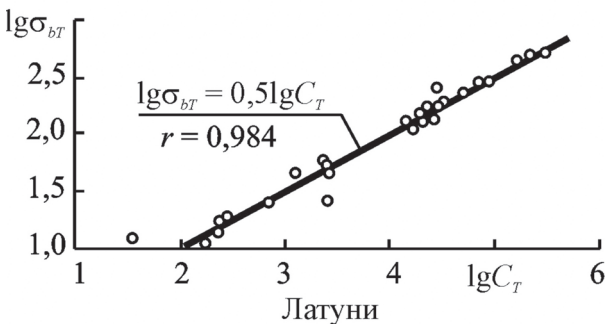
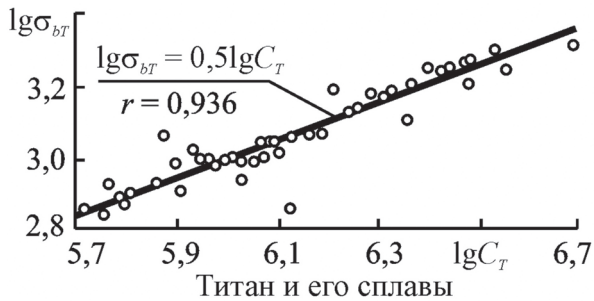
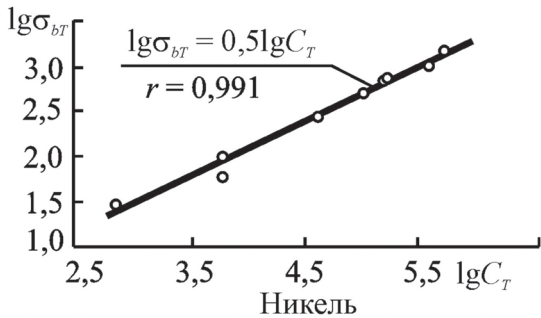
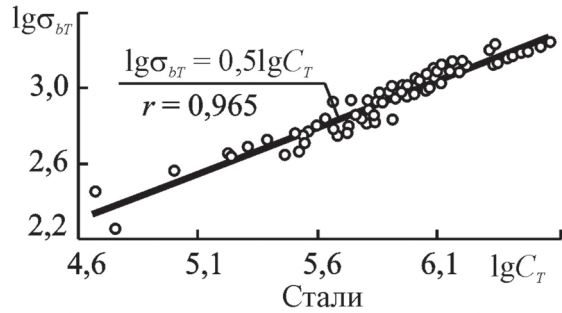
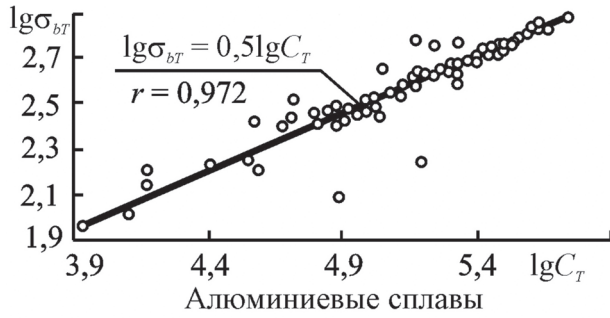


Рисунок 9 — Зависимости $\sigma_b(C_T)$ для различных металлических материалов

деструкции σ_d материала определяют при растяжении в условиях, когда $T_\Sigma \rightarrow 0$, а температуру деструкции T_d при нагреве тела — в условиях, когда $\sigma = 0$. Таким образом, в общем случае учитывается двойственная природа процессов накопления повреждений и разрушения, обусловленных механи-

ческой напряженностью и тепловой активацией этой напряженности во времени [34–36]. Наконец, функция $\Lambda_{M\setminus T} \geq 1$, как кратко описано выше и изложено в литературе [16, 17], учитывает взаимодействие повреждений в связи с изменением соотношений $\sigma \geq \sigma_{lim}$; как хорошо известно, именно это соотношение определяет характер и механизмы повреждений при упругом, неупругом, упруго-пластическом и пластическом деформировании. При этом роль тепловых флуктуаций ($T_\Sigma < T_d$) детально исследована, например, в работах [35, 36].

Таким образом, модель (77) может служить для прогнозирования (показано стрелками от $T_k \sigma_{lim}$ на рисунке 11) механического поведения материалов в термодинамической среде:

$$T \xrightarrow[\frac{u_0, \Lambda_{M\setminus T}}{a_n, a_T}]{} \lg C_T \rightarrow \rightarrow \lg \sigma_{lim}(T, u_0, a_n, a_T, \Lambda_{M\setminus T}) \rightarrow \sigma_{lim}(T). \quad (80)$$

Состояние среды в (80) описывается параметрами $T, a_T, \Lambda_{M\setminus T}$.

Как видно, прогнозы по (77) и (80) применимы для материалов различной природы с разной структурой — независимо от механизмов повреждения и разрушения при статическом и циклическом нагружениях. Было бы интересно выполнить подобный

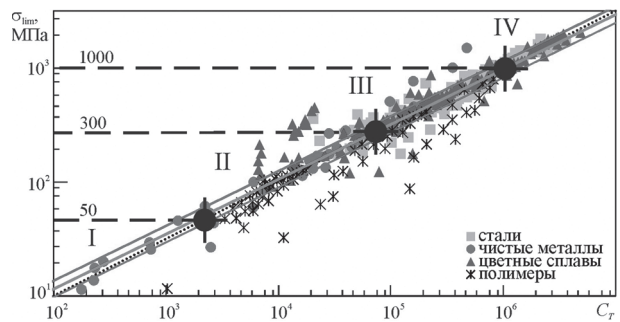


Рисунок 10 — Экспериментально обоснованная МТД функция критических по повреждаемости состояний для материалов разной природы

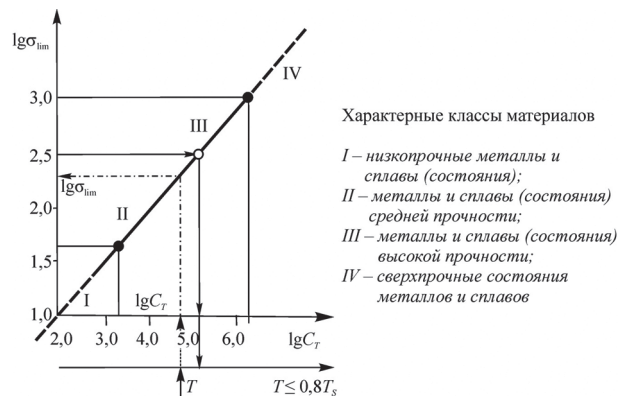


Рисунок 11 — Обобщенная МТД функция предельных состояний металлов и сплавов ($\sigma_{lim} \leq \sigma_b; T_\Sigma \leq 0,8 T_s$)

анализ результатов испытаний при ударе, но такой анализ выходит за рамки данной работы.

Конечно, ввиду линейности функции (77), оказывается возможным и эффективным и *обратное прогнозирование*: если надо иметь заданное механическое состояние материала (определяемое параметрами $u_0, \sigma_{\text{lim}(T)}, a_n$), то можно сформулировать требования к среде (определяемые параметрами $T, a_T, \Lambda_{M \setminus T}$), в которой может работать система (на рисунке 11 показано стрелками от σ_{lim} к T):

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{lim}(T)} \rightarrow \lg \sigma_{\text{lim}(T)} &\xrightarrow[\frac{a_n, a_T}{u_0, \Lambda_{M \setminus T}}]{} \lg C_T \rightarrow \\ &\rightarrow C_T(T, u_0, a_n, a_T, \Lambda_{M \setminus T}) \rightarrow T. \end{aligned} \quad (81)$$

Характеристика ПС $\sigma_{\text{lim}(T)}$ (см. рисунок 10), содержащаяся в (81), как и ряд других аналогичных параметров (см. таблицу 7), по существу возводят условие (46) в ранг фундаментальных.

Проанализируем еще одно из частных решений — более общее, чем (75): ПС трибофатической системы, которое описывается формулой (74). Графический анализ этой формулы дан на рисунке 12 в виде диаграммы Сосновского–Махутова–Богдановича [16, 18, 49].

Здесь схематично представлены диаграммы ПС типичных (кривые 1–5) объектов и систем.

Ось ординат служит прочностной шкалой, а ось абсцисс — трибологической шкалой.

В результате обычных испытаний на усталость (трение отсутствует, так что $\tau_w = 0$) определяют предел выносливости образца σ_{-1} (см. рисунок 12). При износоусталостных испытаниях трибофатической системы его значение изменяется вследствие влияния процессов трения и изнашивания (на рисунке 12 *a* обозначено $\sigma_{-1\tau}$ в соответствии с условием (L5) в таблице 7). Это изменение определяет основные законо-

мерности прямого эффекта. Они могут быть описаны характерными кривыми 1–5 (см. рисунок 12 *a*) в зависимости от типа трибофатической системы и условий ее эксплуатации. Так, кривые 1 и 2 характерны для контактно-механической усталости (КМУ), кривые 2, 3 и 4 — для фрикционно-механической усталости (ФМУ), кривые 3, 4 и 5 — для фреттинг-усталости (ФУ) при различных условиях испытания.

В результате обычных испытаний пары трения (циклические напряжения отсутствуют, т. е. $\sigma = 0$) находят предельную величину фрикционного напряжения τ_f , которую называют также пределом фрикционной усталости (либо предельную величину контактного давления p_f , которая соответствует значению τ_f) (см. рисунок 12). При износоусталостных испытаниях трибофатической системы его значение изменяется вследствие влияния уровня циклических напряжений (на рисунке 12 *b* обозначено $\tau_{f\sigma}$ в соответствии с условием (L6) в таблице 7). Это изменение определяет основные закономерности обратного эффекта. Они аналогично могут быть описаны характерными кривыми 1–5 (см. рисунок 12 *b*) в зависимости от типа трибофатической системы и условий ее эксплуатации. Здесь кривые 1–5 имеют тот же смысл, что и кривые 1–5 на рисунке 12 *a*. Существенное различие состоит в том, что при прямом эффекте, как уже отмечалось, ПС системы достигается по критериям сопротивления механической усталости, тогда как при обратном эффекте — по критериям трения и изнашивания.

Наиболее важные выводы, которые можно сделать при анализе рисунка 12, таковы.

1. Процессы трения и изнашивания, в зависимости от условий их реализации, могут не только значительно снижать (см. кривые 3, 4 и 5 на рисунке 12 *a*), но и существенно повышать (см. кривые 1 и 2 на рисунке 12 *a*) сопротивление усталости трибофатической системы. Это означает, что в определенных усло-

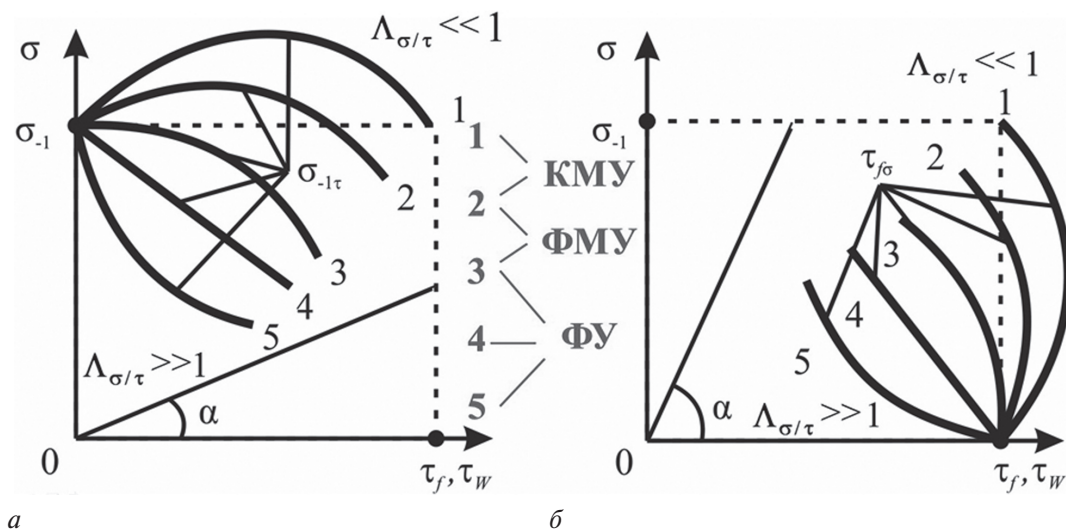


Рисунок 12 — Схемы диаграмм предельных состояний трибофатических систем различных типов: *a* — прямой эффект; *b* — обратный эффект

виях ее эксплуатации трение и изнашивание полезны. И еще: изменяя условия трения и изнашивания должным образом, можно *эффективно управлять* процессами износоусталостного повреждения конкретной трибофатической системы.

2. Циклические напряжения, в зависимости от условий испытания, могут не только значительно снизить (см. кривые 3, 4 и 5 на рисунке 12 б), но и существенно повышать (см. кривые 1 и 2 на рисунке 12 б) износостойкость трибофатической системы. Это означает, что в определенных условиях ее эксплуатации циклические напряжения благоприятны. И еще, изменяя условия циклического нагружения должным образом, можно эффективно управлять процессами износоусталостного повреждения конкретной трибофатической системы.

В обоих случаях — при прямом и обратном эффектах — управляющим параметром износоусталостного повреждения служит соотношение

$$\psi_{\sigma/\tau} = \sigma / \tau_w = \operatorname{tg} \alpha, \quad (82)$$

которое имеет критическое значение

$$\Psi_{-1f} = \sigma_{-1} / \tau_f = \operatorname{tg} \alpha_{-1f}. \quad (83)$$

При $\psi_{\sigma/\tau} > \Psi_{-1f}$ реализуется прямой эффект, а при $\psi_{\sigma/\tau} < \Psi_{-1f}$ реализуется обратный эффект.

Экспериментальная проверка диаграммы по рисунку 12 представлена на рисунке 13 для двух важнейших случаев, когда нетрадиционно утверждается, что при комплексном износоусталостном повреждении сопротивление усталости трибофатической системы может быть выше, чем элемента конструкции (кривая 1 на рисунке 12 а) и пары трения (кривая 1 на рисунке 12 б). Анализ ведется в соответствии с критериями (L5) и (L6) в таблице 7.

На рисунке 13 представлены результаты обширных лабораторных испытаний трибофатической системы «вал — ролик» на контактно-механическую усталость. Диаграмма ABCD построена в координатах: давление p_0 в центре контактной площадки при трении качения (ось абсцисс) — амплитуда σ_a циклических напряжений при изгибе (ось ординат). Если ролик изготовлен из значительно более прочной стали, чем вал, то характер повреждения и разрушения последнего оказывается разным в различных зонах диаграммы ABCD; он проиллюстрирован схемами, расположенными вокруг этой диаграммы. По данным рисунка 13 можно сделать три общих заключения.

Первое. Вал имеет предел выносливости при изгибе $\sigma_{-1} = 165$ МПа. Но если дополнительно возбуждается трение качения, его сопротивление усталости существенно растет с увеличением контактного давления до ~ 1500 МПа, достигая наибольшего значения 268 МПа (рост в 1,62 раза). На рисунке 13 это указано широкой стрелкой, направленной вверх.

Второе. Когда циклические напряжения в системе отсутствуют ($\sigma = 0$), то данная пара трения обнаруживает предельное контактное давление $p_f = 1760$ МПа. Но если в ней дополнительно возбуждаются циклические напряжения до $\sigma = 130$ МПа, система оказывается работоспособной и при значительно более высоких контактных давлениях, достигающих наибольшего значения ~ 2200 МПа (рост примерно в 1,2 раза). На рисунке 13 это показано широкой стрелкой, направленной слева направо.

Таким образом, в оптимальной области контактных давлений ($p_0 \approx 400\text{--}1300$ МПа) и циклических напряжений ($\sigma_a \approx 50\text{--}130$ МПа) процесс изнашивания при качении и циклического деформирования при изгибе ведет к существенному повышению надежности системы по обоим критериям сопротивления усталости. Одна из важнейших причин этого — реализация *рассеянного эффекта множественного микросдвига* (РЭММС) [23], называемого эффектом Сосновского–Махутова–Чижикиа [24].

Третье. ПС системы в принципе оказываются многокритериальными (см. схемы типичных повреждений вала на рисунке 13 в зависимости от величины управляющего параметра (82)).

В заключение приведем результаты анализа применимости критерия L4 (см. таблицу 7) в случае реализации процессов трения скольжения — при фрикционной и фрикционно-механической усталости. Исходные данные для анализа приведены в таблице 8. Выполнив экспериментальную проверку критериев L4 и L6 в таблице 7 для трех серий испытаний с амплитудой циклической изгибающей нагрузки σ_a , равной 0, 160 и 256 МПа. Решая (74) относительно фрикционных напряжений $\tau_w = \tau_{\sigma}$ и логарифмируя его, аналогично (77) получаем

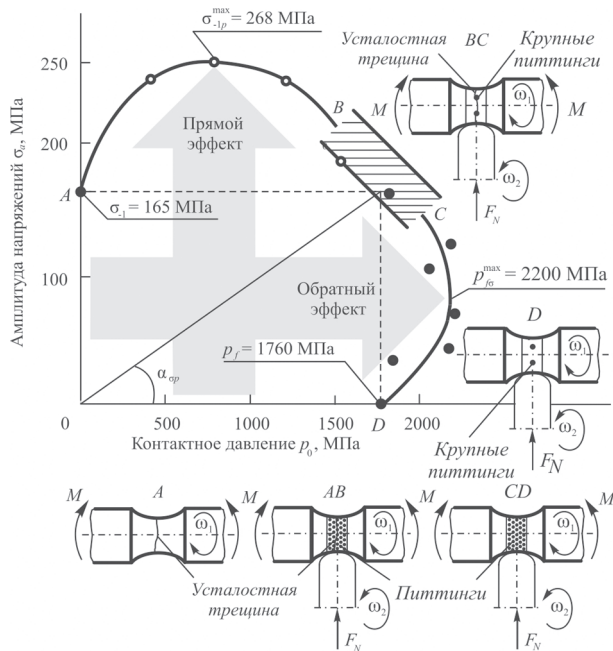


Рисунок 13 — Диаграмма предельных состояний трибофатической системы «сталь 45 (вал) — сталь 25ХГТ (ролик)» при контактно-механической усталости

Таблица 8 — Исходные данные

Параметр	Значение параметра	
	сталь 45	силумин
u_0 , кДж/моль	419	222
$T_{пл}$, К	1773	830
σ_{-1} , МПа	280	42
τ_{-1} , МПа	170	30
a_T	0,236	0,267
a_σ	0,005	0,126
a_τ	0,014	0,247

$$\lg \tau_{f\sigma} = \frac{1}{2} \cdot \lg \left[\frac{1}{a_\tau} \cdot \left(\frac{u_0/\Lambda_{T/M} - a_T}{\Lambda_{\sigma/\tau}} - a_\sigma \sigma^2 \right) \right] = \frac{1}{2} \cdot \lg C_T. \quad (84)$$

Согласно (84), зависимость предела фрикционной усталости $\tau_{f\sigma}$ от параметра C_T в двойных логарифмических координатах является прямой линией с коэффициентом наклона, равным 0,5. Эта закономерность хорошо согласуется с экспериментальными данными (рисунок 14): коэффициенты корреляции здесь превышают $r > 0,95$.

Таким образом, сравнительный анализ результатов механико-математического моделирования с экспериментальными результатами показал, что разработанная теория удовлетворительно работает и в условиях статического нагружения, и в условиях усталостного разрушения, и в условиях поверхностного контактного повреждения для материалов разной природы в широких интервалах возможного изменения температуры ($T_\Sigma \leq T_S$) и напряжений ($\sigma \leq \sigma_b$).

Заключение. 1. Изложен принципиально новый подход к построению и анализу критериев повреждаемости и наступления ПС сложных систем. Согласно этому подходу, не взаимное влияние факторов, а взаимодействие ($\Lambda \gtrsim 1$) явлений — вот что определяет процессы повреждаемости и разрушения в таких системах. Это означает, что в

механике деформирования и разрушения эффективной оказывается методология феноменоанализа (в дополнение к традиционной методологии факторного анализа).

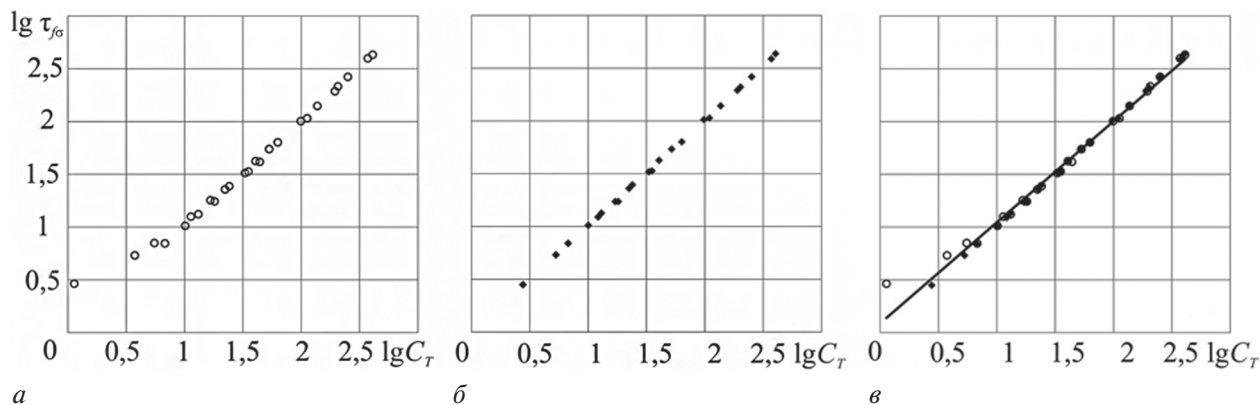
2. Фундаментальные закономерности достижения ПС сложной системы при комбинированных воздействиях силовых факторов и термодинамической среды таковы.

2.1. ПС трибофатических и МТД систем при таких воздействиях обусловлено и формируется не одним каким-либо повреждающим явлением, но их совокупностью, и поэтому реализуется как многокритериальное по различным физическим признакам (объемного механического разрушения, критического поверхностного (контактного) повреждения, тепловой деструкции).

2.2. Все возможные механизмы повреждения и достижения ПС трибофатической и МТД систем определяются совмещенным тензором фрикционно-сдвиговых и объединенным тензором нормальных напряжений, формируемых за счет соответствующих компонент НДС при одновременном объемном и контактном деформировании их элементов.

2.3. ПС анализируемых систем обусловлено только эффективной частью возбуждаемой в них потенциальной энергии, определяемой указанными в п.2.2 тензорами напряжений (деформаций). Именно эта часть энергии поглощается ею и расходуется непосредственно на накопление необратимых повреждений и достижение разрушения; обоснован закон поглощения эффективной энергии в системе.

2.4. В реализации многообразных условий и направленности процессов упрочнения ($\Lambda < 1$), разупрочнения ($\Lambda > 1$), стабильного поведения ($\Lambda = 1$) в трибофатической и МТД системе определяющая роль принадлежит фундаментальным Λ -взаимодействиям эффективных энергий, обусловленных нагрузками разной природы и, следовательно, необратимыми повреждениями, накопление которых и определяет неизбежность достижения ею ПС. Потоки эффективной энергии, обусловленные источниками разной природы, не аддитивны — они взаимодействуют диалектически.

Рисунок 14 — Зависимости $\tau_{f\sigma}(C_T)$ для стали 45 (а), силумина (б) и их совмещение (в)

2.5. Существует фундаментальная для данного вещества критическая константа, определяемая по любому критерию достижения ПС, которая не зависит от условий нагружения, механизмов повреждения и разрушения, видов подводимой к системе энергии.

3. Выполнен сравнительный анализ результатов механико-математического моделирования ПС с экспериментальными результатами. Показано, что разработанная теория удовлетворительно работает в условиях статического и усталостного разрушения, трения и изнашивания, для многих и разных материалов.

Представлена экспериментально обоснованная (по данным более 600 результатов испытаний) МТД функция критических по повреждаемости состояний для чистых металлов, цветных сплавов, конструкционных сталей и полимерных материалов, которая имеет фундаментальный характер. При этом данная функция оказывается справедливой практически в полных интервалах возможного изменения температуры ($T_{\Sigma} \leq T_{\beta}$) и напряжений ($\sigma \leq \sigma_{\beta}$) с коэффициентом корреляции $r = 0,7$ в отдельных случаях, обычно же $r > 0,9$. С ее помощью выполняется прогнозирование механического поведения материалов в термодинамической среде. Оказывается возможным и эффективным и обратное прогнозирование: если задано механическое состояние материала, то можно сформулировать требования к среде, в которой он может эффективно работать.

4. В работе описаны методики: построения тензоров фрикционно-сдвиговых и нормальных напряжений (деформаций); выделения из полной подводимой к системе энергии, обусловленной нагрузками разной природы, ее эффективных частей; определения функции (параметров) Λ -взаимодействий эффективных энергий и, следовательно, необратимых повреждений; расчета (экспериментальной оценки) фундаментальной константы вещества (u_0). Указаны методики определения и других параметров, необходимых для реализации изложенной теории и критериев ПС.

Работа выполнена при поддержке Белорусского и Российского фондов фундаментальных исследований (гранты №Т14Р-033 от 23.05.2014 и №14-08-90003-Бел_а (РФ)).

Список литературы

- Giurgiutiu, V. Development of Strength Theories for Random Fiber Composites / V. Giurgiutiu, K. L. Reifsnider // Journal of Composites Technology & Research. — JCTRE, April 1994. — Vol. 16, № 2. — Pp. 103–114.
- Hibbeler, R.C. Technical mechanics 2 – strength theory 5 / R.C. Hibbeler. — Munich, 2005. — 792 p.
- Mao-Hong, Yu. Unified Strength Theory and Its Applications / Yu. Mao-Hong. — Berlin: Springer, 2004. — 448 p.
- Писаренко, Г.С. Сопrotивление материалов деформированию и разрушению при сложном напряженном состоянии / Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев. — Киев: Наук. думка, 1969. — 212 с.

- Журавков, М.А. Математическое моделирование деформационных процессов в твердых деформируемых средах (на примере задач механики горных пород и массивов). — Минск: БГУ, 2002. — 456 с.
- Писаренко, Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. — Киев: Наук. думка, 1975. — 704 с.
- Гольденблат, И.И. Критерии прочности конструкционных материалов / И.И. Гольденблат, В.А. Копнов. — М., 1968. — 191 с.
- Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии: справ. / А.А.Лебедев [и др.]. — Киев, 1983. — 366 с.
- Журавков, М.А. Теоретические основы деформационной механики блочно-слоистого массива соляных горных пород / М.А. Журавков, М.Д. Мартыненко. — Минск: БГУ, 1995. — 255 с.
- Сосновский, Л.А. Теории предельных напряженных состояний / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелИИЖТ, 1991. — 63 с.
- Филин, А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Т. 1: Сопrotивление материалов с элементами теории сплошных сред и строительной механики / А.П. Филин. — М.: Наука, 1975. — 832 с.
- Филоненко-Бородич, М.М. Механические теории прочности / М.М. Филоненко-Бородич. — М.: Изд-во МГУ, 1961. — 91 с.
- Поль, Б. Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения. Разрушение / ред. Г.Либовиц. — Т. 2: Математические основы теории разрушения. — М.: Мир, 1975. — С. 336–515.
- Сысоев, П.В. Деформация и износ полимеров при трении / П.В. Сысоев, П.Н. Богданович, А.Д. Лизарев. — Минск: Наука и техника, 1985. — 239 с.
- Сосновский, Л.А. Основы трибофатики / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2003. — Т. 1. — 246 с.; Т. 2. — 234 с.
- Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2007. — 434 с.
- Щербаков, С.С. Механика трибофатических систем / С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский. — Минск: БГУ, 2010. — 407 с.
- Богданович, А.В. Прогнозирование предельных состояний силовых систем / А.В. Богданович. — Гродно: ГрГУ им. Я. Купалы, 2008. — 372 с.
- Журавков, М.А. Фундаментальные задачи трибофатики и их практическое применение в машиностроении / М.А. Журавков, С.С. Щербаков // Изв. Самарского науч. центра РАН. — 2011. — Т. 13, № 4(3). — С. 726–732.
- Sherbakov, S.S. Interaction of Several Bodies as Applied to Solving Tribo-Fatigue Problems / S.S. Sherbakov, M.A. Zhuravkov // Acta Mechanica. — 2013. — Vol. 224, № 3. — Pp. 1541–1553.
- Сосновский, Л.А. Трибофатика: износоусталостные повреждения в проблемах ресурса и безопасности машин / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов. — Москва; Гомель: ФЦНТП «Безопасность»: НПО «ТРИБОФАТИКА», 2000. — 304 с.
- Износоусталостные повреждения и их прогнозирование (трибофатика) / Л.А. Сосновский [и др.]; науч. ред. Л.А. Сосновский. — Гомель; Киев; Москва; Ухань, 2001. — 170 с.
- Сосновский, Л.А. Введение в трибофатику: пособие для студ. мех.-мат. факультетов / Л.А. Сосновский, М.А. Журавков, С.С. Щербаков. — Минск: БГУ, 2010. — 77 с.
- Сосновский, Л.А. Фундаментальные и прикладные задачи трибофатики: курс лекций / Л.А. Сосновский, М.А. Журавков, С.С. Щербаков. — Минск: БГУ, 2010. — 488 с.
- Надежность. Риск. Качество / Л.А. Сосновский [и др.]; науч. ред. Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2012. — 358 с.
- Сосновский, Л.А. Принципы механотермодинамики / С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2013. — 150 с.
- Сосновский, Л.А. О возможности построения механотермодинамики / С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский // Наука и инновации. — 2008. — № 2 (60). — С. 24–29.
- Высоцкий, М.С. Механотермодинамическая система как новый объект исследования / М.С. Высоцкий, П.А. Витязь, Л.А. Сосновский // Механика машин, механизмов и материалов. — 2011. — № 2 (15). — С. 5–10.
- Sosnovskiy L.A., Sherbakov S.S. Mechanothermodynamical System and Its Behavior. Continuum Mech. Thermodyn. — 2012. — Vol.24, Issue 3. — Pp. 239–256.
- Слово о трибофатике / Стражев В.И. [и др.]; ред.-сост. А.В. Богданович. — Гомель; Минск; Москва; Киев: Remika, 1996. — 132 с.

31. Сосновский Л.А. Сюрпризы трибофатиги / Л.А. Сосновский, С.С. Щербаков. — Гомель: БелГУТ, 2005. — 192 с.
32. Новые подходы в механике износоусталостного повреждения и разрушения / М.С. Высоцкий [и др.] // Механика-2007: материалы III Белорус. конгр. по теоретич. и прикладной механике, Минск, 16–18 окт. 2007 г. — Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2007. — С. 38–114.
33. Высоцкий, М.С. Новое слово в механике / М.С. Высоцкий // Наука и инновации. — 2010. — № 9 (91). — С. 17–19.
34. Журков, С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел / С. Н. Журков // Вестн. АН СССР. — 1968. — № 3. — С. 46–52.
35. Журков, С.Н. Дилатонный механизм прочности твердых тел / С.Н. Журков // Физика прочности и пластичности. — Л.: Наука, 1986. — С. 5–11.
36. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. — М.: Наука, 1974. — 560 с.
37. Габар, И.Г. Термоактивационный анализ разрушения ОЦК-и ГЦК-металлов и концепции взаимосвязи параметров кривой усталости // Проблемы прочности. — 1989. — № 11. — С. 61–64.
38. Иванова, В.С. Природа усталости металлов / В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев. — М.: Metallurgy, 1975. — 456 с.
39. Черепанов, Г.П. Механика разрушения и кинетическая теория прочности / Г.П. Черепанов // Проблемы прочности. — 1989. — № 11. — С. 3–8.
40. Киттель, Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель. — М.: Наука, 1978. — 789 с.
41. Фридель, Ж. Дислокации : перев. с англ. под ред. А.Л. Ройтбурда / Ж. Фридель. — М.: Мир, 1967. — 660 с.
42. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. — М.: Наука, 1975. — 576 с.
43. Шульце, Г. Металлофизика / Г. Шульце. — М.: Мир, 1971. — 503 с.
44. Трошенко, В.Т. Усталость и неупругость металлов / В.Т. Трошенко. — Киев: Наук. думка, 1971. — 268 с.
45. Сосновский, Л.А. Об одном виде энтропии как мере поглощения энергии, расходуемой на производство повреждений в механотермодинамической системе / Л.А. Сосновский // Докл. НАН Беларуси. — 2007. — Т. 51, № 6. — С. 100–104.
46. Журавков, М.А. Анализ повреждаемости силовой системы с помощью модели деформируемого твердого тела с опасным объемом / М.А. Журавков, С.С. Щербаков // Теоретическая и прикладная механика: межвед. сб. науч.-методич. статей. — Минск: БНТУ, 2010. — Вып. 25. — С. 44–49.
47. Журавков, М.А. Опасные объемы в силовой системе / М.А. Журавков, С. С. Щербаков // X Белорус. математич. конф.: тез. докл. междунар. науч. конф., Минск, БГУ, 3–7 нояб. 2008 г. — Минск: Инст. математики НАНБ, 2008. — Ч. 2. — С. 121–122.
48. Трибофатига-98/99: ежегодник / под общ. ред. Л.А. Сосновского // Вып. 1: Теория накопления износоусталостных повреждений / под ред. Н.А. Махутова; авт.: Л.А. Сосновский, А.В. Богданович. — Гомель: Трибофатига, 2000. — 60 с.
49. Диаграмма предельных состояний стали 45 при контактно-механической усталости / Л.А. Сосновский [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 1996. — № 2. — С. 39–42.

SOSNOVSKIY Leonid A., Dr. Techn. Sc., Professor

Director

E-mail: tribo-fatigue@mail.ru

S&P Group Tribofatigue Ltd, Gomel, Republic of Belarus

ZHURAVKOV Michael A., Dr. Phys.-Math. Sc., Professor

Minister of Education of the Republic of Belarus

Ministry of Education of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

SHERBAKOV Sergei S., Dr. Phys.-Math. Sc.

Associate Professor of the Theoretical and Applied Mechanics Department of the Mechanical and Mathematical Faculty¹

BOGDANOVICH Alexander V., Dr. Techn. Sc.

Professor of the Theoretical and Applied Mechanics Department¹

¹Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

MAKHUTOV Nikolay A., Corresponding Member of the RAS, Dr. Techn. Sc., Professor

Chief Researcher²

ZATSARINNYI Vladimir V., Cand. Techn. Sc.

Leading Researcher of the Laboratory of Mechanics of Failure and Liveness²

²Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov of the RAS, Moscow, Russia

Received 29 April 2015.

FUNDAMENTAL LAWS OF THE ULTIMATE STATE OF OBJECTS AT THE COMBINED EFFECTS OF MULTI-PARAMETER POWER FACTORS AND THERMODYNAMIC ENVIRONMENT. PART II

It is a survey-analytical article, which describes a number of criteria of limit states (LS) of complex objects and identifies methods to measure all the parameters necessary for it practical use. It presents the energy theory of LS of tribo-fatigue and mechanothermodynamical (MTD) systems, taking into account the interaction dialectics of efficient energies and therefore irreversible damages under fatigue loading, friction and temperature influence. The fundamental laws of the LS at the combined effects of multi-parameter power factors and the environment are analysed. The experimentally grounded (over 600 experimental results) fundamental MTD function of forecast evaluation of different LS (static, fatigue, contact fracture) for pure metals, non-ferrous alloys, constructional steels and polymer materials is presented.

Keywords: LS, tribo-fatigue system, MTD system, theory of strength, criteria of LS, effective energy of potential deformation, Λ -interaction of effective energies (damages), MTD function of critical states, multicriteria diagram of LS of tribo-fatigue systems

References

- Giurgiutiu V., Reifsnider K.L. Development of Strength Theories for Random Fiber Composites. *Journal of Composites Technology & Research*. JCTRER, 1994, vol. 16, no. 2, pp. 103–114.
- Hibbeler R.C. *Technical mechanics 2 – strength theory 5*. Munich, 2005. 792 p.
- Mao-Hong Yu. *Unified Strength Theory and Its Applications*. Berlin, 2004. 448 p.
- Pisarenko G.S., Lebedev A.A. *Soprotivlenie materialov deformirovaniyu i razrusheniju pri slozhnom napryazhennom sostojanii* [Resistance materials deformation and failure under complex stress state]. Kiev, 1969. 212 p.
- Zhuravkov M.A. *Matematicheskoe modelirovanie deformacionnyh processov v tverdyh deformiruemyyh sredah (na primere zadach mehaniki gornyyh porod i massivov)* [Mathematical modeling of deformation processes in deformable solid medium (for example problems in the mechanics of rocks and arrays)]. Minsk, 2002. 456 p.
- Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Spravochnik po soprotivleniju materialov* [Handbook of resistance of materials]. Kiev, 1975. 704 p.
- Goldenblat I.I., Kopnov V.A. *Kriterii prochnosti konstrukcionnyh materialov* [Criteria for strength of structural materials]. Moscow, 191 p.
- Lebedev A.A. [et al.]. *Mechanicheskie svoystva konstrukcionnyh materialov pri slozhnom napryazhennom sostojanii* [The mechanical properties of structural materials under complex stress state]. Kiev, 1983. 366 p.
- Zhuravkov M.A., Martynenko M.D. *Teoreticheskie osnovy deformacionnoj mehaniki blochno-sloistogo massiva soljanyh gornyyh porod* [Theoretical foundations of deformation mechanics block-layered array of rock salt]. Minsk, 1995. 255 p.
- Sosnovskiy L.A. *Teorii predel'nyh napryazhennyh sostojanii* [Theories limit stress states]. Gomel, 1991. 63 p.
- Filin A.P. *Prikladnaya mehanika tverdogo deformiruemogo tela. T. 1: Soprotivlenie materialov s jelementami teorii sploshnyh sred i stroitel'noj mehaniki* [Applied mechanics of deformable body. Vol. 1. Resistance of materials with elements of the theory of continuum mechanics and structural mechanics]. Moscow, 1975. 832 p.
- Filonenko-Borodich M.M. *Mechanicheskie teorii prochnosti* [The mechanical theory of strength]. Moscow, 1961. 91 p.
- Pol B. *Makroskopicheskie kriterii plasticheskogo techenija i hrupkogo razrushenija. Razrushenie. T. 2: Matematicheskie osnovy teorii razrushenija* [Macroscopic criterion for plastic flow and brittle. Destruction. Vol. 2. Mathematical foundations of the theory of fracture]. Moscow, 1975, pp. 336–515.
- Sysoev P.V., Bogdanovich P.N., Lizarev A.D. *Deformacija i iznos polimerov pri trenii* [Deformation and wear of the friction polymers]. Minsk, 1985. 239 p.
- Sosnovskiy L.A. *Osnovy tribofatiki* [Fundamentals of Tribo-Fatigue]. Gomel, 2003, vol. 1. 246 p., vol. 2. 234 p.
- Sosnovskiy L.A. *Mechanika iznosoustalostnogo povrezhdenija* [Mechanics of wear-fatigue damage]. Gomel, 2007. 434 p.
- Sherbakov S.S., Sosnovskiy L.A. *Mechanika tribofaticheskikh sistem* [Mechanics of Tribo-Fatigue systems]. Minsk, 2010. 407 p.
- Bogdanovich A.V. *Prognozirovanie predel'nyh sostojanii silovyyh sistem* [Prediction of limit states of active systems]. Grodno, 2008. 372 p.
- Zhuravkov M.A., Sherbakov S.S. Fundamental'nye zadachi tribofatiki i ih prakticheskoe primenenie v mashinostroenii [The fundamental tasks of Tribo-Fatigue and their practical application in engineering]. *Izv. Samarskogo nauch. centra RAN* [News of Samara Scientific Center of RAS], 2011, vol. 13, no. 4(3), pp. 726–732.
- Sherbakov S.S., Zhuravkov M.A. Interaction of Several Bodies as Applied to Solving Tribo-Fatigue Problems. *Acta Mechanica*, 2013, vol. 224, no. 3, pp. 1541–1553.
- Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A. *Tribofatika: iznosoustalostnye povrezhdenija v problemah resursa i bezopasnosti mashin* [Tribo-fatigue: wear-fatigue damage problem of resources and the safety of machines]. Moscow-Gomel, 2000. 304 p.
- Sosnovskiy L.A. ed. *Iznosoustalostnye povrezhdenija i ih prognozirovanie (tribofatika)* [Wear-fatigue damage and forecasting (Tribo-Fatigue)]. Gomel, Kiev, Moscow, Uhan, 2001. 170 p.
- Sosnovskiy L.A., Zhuravkov M.A., Sherbakov S.S. *Vvedenie v tribofatiku: posobie dlja stud. meh.-mat. Fakul'tetov* [Introduction to Tribo-Fatigue: a guide for students of Mechanics and Mathematics faculty]. Minsk, 2010. 77 p.
- Sosnovskiy L.A., Zhuravkov M.A., Sherbakov S.S. *Fundamental'nye i prikladnye zadachi tribofatiki: kurs lekcij* [Fundamental and applied problems of Tribo-Fatigue: lectures]. Minsk, 2010. 488 p.
- Sosnovskiy L.A. [et al.]. *Nadezhnost. Risk. Kachestvo* [Reliability. Risk. Quality]. Gomel, 2012. 358 p.
- Sosnovskiy L.A., Sherbakov S.S. *Principy mehanotermodinamiki* [Principles of mechanothermodynamics]. Gomel, 2013. 150 p.
- Sosnovskiy L.A., Sherbakov S.S. *O vozmozhnosti postroenija mehanotermodinamiki* [The possibility of constructing of mechanothermodynamics. Science and Innovation], 2008, no. 2(60), pp. 24–29.
- Vysotsky M.S., Vityaz P.A., Sosnovskiy L.A. *Mechanotermodinamicheskaja sistema kak novyy ob'ekt issledovanija* [Mechanothermodynamical system as a new object of study]. *Mechanika mashin, mehanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2011, no. 2(15), pp. 5–10.
- Sosnovskiy L.A., Sherbakov S.S. Mechanothermodynamical System and Its Behavior. *Continuum Mech. Thermodyn.*, 2012, vol. 24, no. 3, pp. 239–256.
- Bogdanovich A.V. ed. *Slovo o tribofatike* [Word about Tribo-Fatigue]. Gomel, Minsk, Moscow, Kiev, 1996. 132 p.
- Sosnovskiy L.A., Sherbakov S.S. *Sjurprizy tribofatiki* [Surprises of Tribo-Fatigue]. Minsk, 2009. 200 p.
- Vysotsky M.S., Makhutov N.A., Sosnovskiy L.A., Troshchenko V.T., Frolov K.V. *Novye podhody v mehanike iznosoustalostnogo povrezhdenija i razrushenija* [New approaches in mechanics wear-fatigue damage and destruction]. *Mechanika–2007: materialy III Belarus. kongr. po teoretich. i prikladnoj mehanike*

- [Mechanics-2007. Proc. of III Belarusian Congress on theoretical and applied mechanics]. Minsk, 2007, pp. 38–114.
33. Vysotsky M.S. Novoe slovo v mehanike [The new word in mechanics]. *Nauka i innovacii* [Science and Innovation], 2010, no. 9(91), pp. 17–19.
 34. Zhurkov S.N. Kineticheskaja koncepcija prochnosti tverdyh tel [Kinetic concept of strength of solids]. *Vestn. AN SSSR* [Journal of the Academy of Sciences of the USSR], 1968, no. 3, pp. 46–52.
 35. Zhurkov S.N. Dilatonnij mehanizm prochnosti tverdyh tel [Dilatation mechanism of strength of solids]. *Fizika prochnosti i plastichnosti* [Physics of strength and plasticity]. Lvov, 1986, pp. 5–11.
 36. Regel V.R., Slutsker A.I., Tomashevsky E.E. *Kineticheskaja priroda prochnosti tverdyh tel* [The kinetic nature of the strength of solids]. Moscow, 1974. 560 p.
 37. Gabar I.G. Termoaktivacionnyj analiz razrushenija OCK- i GCK-metallov i koncepcii vzaimosvjazi parametrov krivoj ustalosti [Thermal activation analysis destruction of metals and concept relationship fatigue curve parameters]. *Problemy prochnosti* [Strength problems], 1989, no. 11, pp.61–64.
 38. Ivanova V.S., Terentyev V.F. *Priroda ustalosti metallov* [The nature of metal fatigue]. Moscow, 1975. 456 p.
 39. Cherepanov G.P. Mehanika razrushenija i kineticheskaja teorija prochnosti [Fracture mechanics and kinetic theory of strength]. *Problemy prochnosti* [Strength of Materials], 1989, no. 11, pp. 3–8.
 40. Kittel Ch. *Vvedenie v fiziku tverdogo tela* [Introduction to Solid State Physics]. Moscow, 1978. 789 p.
 41. Friedel J. *Dislokacii* [Dislocations]. Moscow, 1967. 660 p.
 42. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. *Teorija uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow, Nauka, 1975. 576 p.
 43. Schulze G. *Metallofizika* [Metal physics]. Moscow, 1971. 503 p.
 44. Troshchenko V.T. *Ustalost i neuprugost metallov* [Fatigue and inelastic metals]. Kiev, 1971. 268 p.
 45. Sosnovskiy L.A. Ob odnom vide jentropii kak mere pogloshhenija jenergii, rashoduemoj na proizvodstvo povrezhdenij v mehanotermodinamicheskoj sisteme [A form of entropy as a measure of the absorption of the energy consumed in the manufacture of damage in mechano-thermodynamical system]. *Dokl. NAN Belarusi* [Reports of the National Academy of Sciences of Belarus], 2007, vol. 51, no. 6, pp. 100–104.
 46. Zhuravkov M.A., Sherbakov S.S. Analiz povrezhdaemosti silovoj sistemy s pomoshh'ju modeli deformiruемого tverdogo tela s opasnym ob'emom [Analysis of damage to the power system using the model of deformable solids with a dangerous amount]. *Teoreticheskaja i prikladnaja mehanika: mezhved. sb. nauch.-metodich. statej* [Theoretical and Applied Mechanics: Interdepartmental collection of scientific and methodological articles]. Minsk, 2010, no. 25, pp. 44–49.
 47. Zhuravkov M.A., Sherbakov S.S. Opasnye ob'emy v silovoj sisteme [Dangerous volumes in the active system]. *X Belorus. matematich. konf.: tez. dokl. mezhdunar. nauch. konf.* [X Belarusian Mathematical Conference. Proc. of the International scientific conference], Minsk, BSU, 2008, vol. 2, pp. 121–122.
 48. Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A. eds. *Tribofatika-98/99: ezhegodnik* [Tribo–Fatigue–98/99: Annual]. *Vyp. 1: Teorija nakoplenija iznosoustalostnyh povrezhdenij* [Issue 1: Wear-fatigue damage accumulation theory]. Gomel, 2000. 60 p.
 49. Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A., Bogdanovich A.V., Tyurin S.A. Diagramma predel'nyh sostojanij stali 45 pri kontaktno-mehanicheskoj ustalost [Limiting state diagram of steel 45 at mechano-rolling fatigue]. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov* [Industrial laboratory. Diagnostics of materials], 1996, no. 2, pp. 39–42.