

О МЕТОДОЛОГИИ ФЕНОМЕНОАНАЛИЗА В МЕХАНИКЕ*

д.ф.-м.н. ¹Журавков М.А., д.ф.-м.н. ¹Щербаков С.С.,
член-корр. РАН, д.т.н. ²Махутов Н.А., д.т.н. ³Сосновский Л.А.

¹Белорусский государственный университет, Минск

²ИМАШ РАН им. А.А. Благодирова, Москва, Россия

³ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Гомель

Развитие исследований в механике усталостного повреждения и разрушения и в трибологии шло по пути выявления и анализа многочисленных факторов (металлургических, конструкционных, технологических, эксплуатационных и др.), которые так или иначе влияют на изменение основных характеристик работоспособности соответствующих объектов. Схема такого факторного анализа представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Схема анализа факторов, которые влияют на изменение характеристик сопротивления усталости (а) либо износостойкости (б)

Так, предел выносливости элемента конструкции σ_{-1} (см. рисунок 1, а) существенно уменьшается с ростом его размеров, уровня концентрации напряжений, ухудшением шероховатости поверхности и т. д. (коэффициент влияния $K_i < 1$), и он увеличивается ($K_i > 1$), когда применяют определенные методы упрочнения (поверхностный наклеп, специальные способы термо- и термомеханической обработки и т. д.). Но каково бы ни было изменение величины σ_{-1} , ее всегда можно расположить на единой прочностной шкале (σ) – на рисунке 1, а это проиллюстрировано вертикальной двусторонней стрелкой. Аналогично варьируется и значение предельного контактного давления p_f для исследуемой пары трения (см. рисунок 1, б). И снова, каково бы ни было изменение величины p_f , ее всегда можно расположить на одной трибологи-

ческой шкале (p_a) – на рисунке 1, б это проиллюстрировано горизонтальной двусторонней стрелкой.

Ситуация оказывается принципиально иной, когда изучается (в соответствии с работами [1-5]) взаимодействие явлений механической усталости и трения (в том числе с изнашиванием) в силовой системе (рисунок 2).

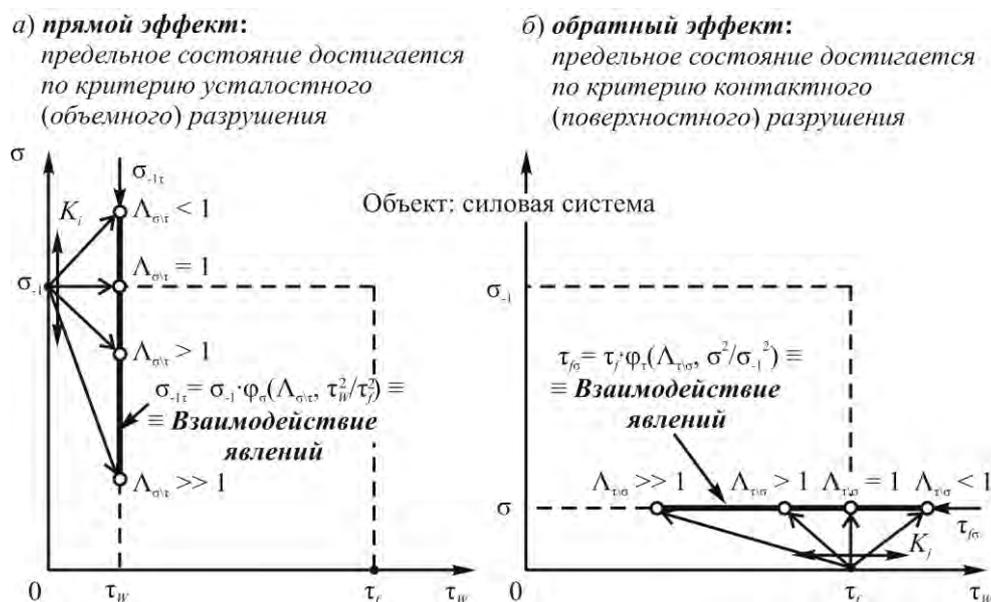


Рис. 2. Схема анализа взаимодействия явлений на изменение характеристик предельного состояния силовых систем при прямом (а) и обратном (б) эффектах

Так, в случае реализации прямого эффекта (см. рисунок 2, а) при заданной величине фрикционного напряжения $\tau_w = \text{const}$ (которое интегрально описывает процессы трения и изнашивания) обнаруживается, что комплексная характеристика износоусталостного повреждения $\sigma_{-1\tau}$ может изменяться в широком интервале значений – это обусловлено разнообразными условиями взаимодействия изучаемых явлений. И параметр $\Lambda_{\sigma/\tau}$ отражает изменения таких условий в процессе эксплуатации или испытаний силовой системы. При этом результат взаимодействия может быть, по сути, противоположным: либо упрочнение (и тогда $\Lambda_{\sigma/\tau} < 1$), либо разупрочнение (и тогда $\Lambda_{\sigma/\tau} > 1$). Такова диалектика взаимодействия повреждений в силовой системе. В случае реализации обратного эффекта ситуация аналогична (см. рисунок 2, б) – различие лишь в том, что, наоборот, при заданной величине циклического напряжения $\sigma = \text{const}$ (которое интегрально описывает процессы механической усталости) обнаруживается, что другая комплексная характеристика износоусталостного повреждения (а именно: $\tau_{j\sigma}$) аналогично может изменяться в широком интервале значений, что отражает параметр $\Lambda_{\tau/\sigma} \cong 1$. Заметим: в обоих этих случаях возможно и «обычное» влияние факторов – например, тех, о которых говорилось при анализе рисунка 1.

Обобщение рисунка 2 представлено на обобщенной диаграмме предельных состояний силовых систем (рисунок 3). Проиллюстрируем роль (и значение) функций взаимодействия явлений.

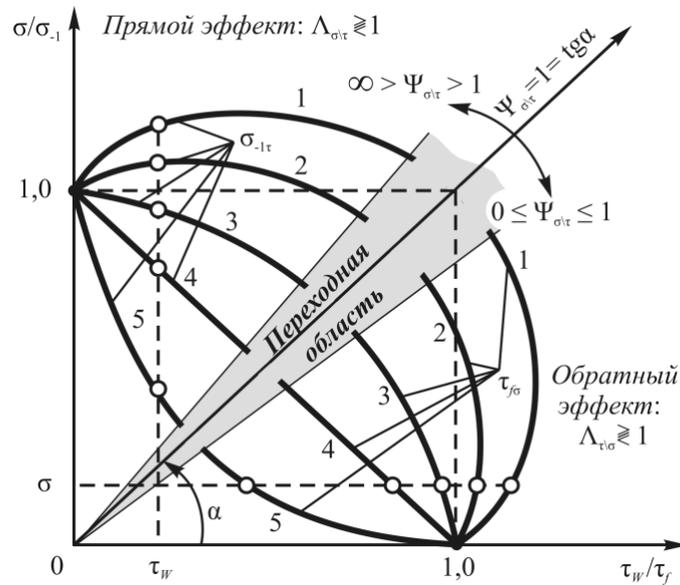


Рис. 3. Многокритериальная диаграмма предельных состояний (σ_{-1P} , $\tau_{f\sigma}$) типичных силовых систем, построенная с учетом необратимого взаимодействия ($\Lambda_{\sigma/\tau}$, $\Lambda_{\tau/\sigma}$) повреждений, обусловленных контактной (τ_w/τ_f) и внеконтактной (σ/σ_{-1}) нагрузками: 1–2 – $\Lambda > 1$; 3–5 – $\Lambda < 1$

Представим критериальное уравнение предельных состояний (62) (см. отчет по этапу № 4) так:

$$\Lambda_{T\setminus M} \left\{ \left[\frac{1}{1-D_\sigma} \left(\frac{\sigma}{\sigma_d} \right)^2 + \frac{1}{1-D_\tau} \left(\frac{\tau_w}{\tau_d} \right)^2 \right] \Lambda_{\sigma\setminus\tau} + \frac{1}{1-D_T} \frac{T_\Sigma}{T_d} \right\} = 1. \quad (1)$$

Графический анализ уравнения (1) дан на рисунке 4. Согласно рисунку 4, а, положение предельных поверхностей силовой системы при одновременном и совокупном действии всех нагрузочных параметров (σ , τ_w , T_Σ , D) сильно зависит от процессов взаимодействия повреждающих явлений в силовой системе. Так, изменение величин $\Lambda_{\sigma\setminus\tau}$ и $\Lambda_{T\setminus M}$ от 0,5 до 1,0 уже приводит к двукратной (и более) потере ею несущей способности, поскольку преимущественно развиваются процессы разупрочнения.

Роль взаимодействия явлений в случае, когда действие температуры не учитывается, показано на рисунке 4, б. Основная закономерность такова: любые значения $\sigma > 0$ и $\tau_w > 0$ могут привести к достижению предельного состояния системы, если процессы взаимодействия явлений окажутся достаточно сильными. Чем меньше величины σ и τ_w , тем большим должно быть значение параметра взаимодействия повреждений $\Lambda_{\sigma\setminus\tau}$, чтобы привести систему к предельному состоянию. И еще: если величины σ и τ_w приближаются к своим предельным значениям ($\sigma \rightarrow \sigma_d$, $\tau_w \rightarrow \tau_d$), роль процессов взаимодействия (при прочих равных условиях) снижается (величина $\Lambda_{\sigma\setminus\tau} \rightarrow 0$). Это естественно, так как, например, при $\sigma = \sigma_{-1}$ предельное состояние системы достигается по одному этому критерию.

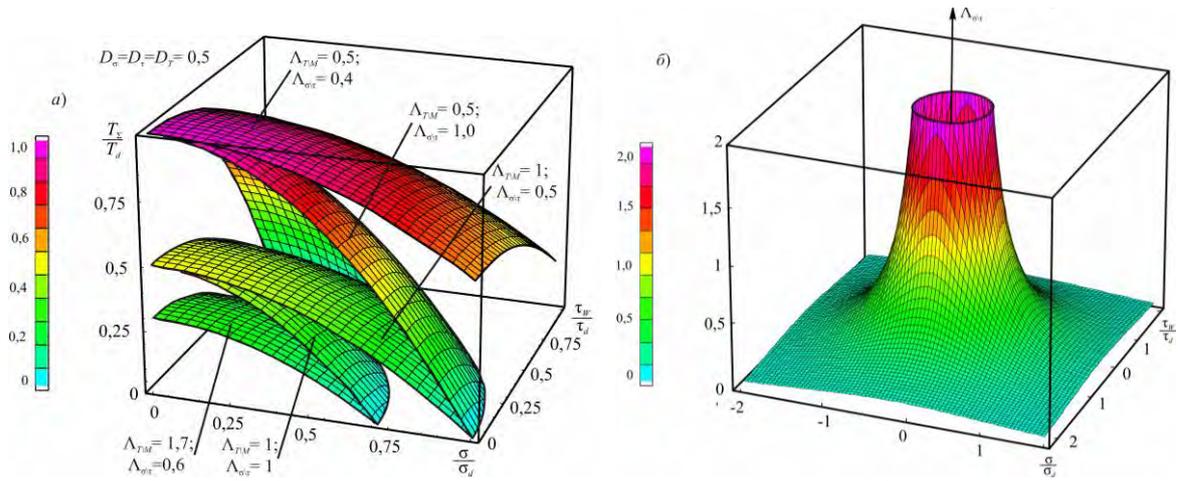


Рис. 4. Предельные поверхности при различных условиях взаимодействия необратимых повреждений

Сделаем необходимые обобщения. Из изложенного следует, что могут быть приняты три подхода к анализу взаимодействия явлений.

(1) Изучение закономерностей взаимодействия во времени эффективных энергий, обусловленных нагрузками разной природы:

$$u_{\Sigma}^{eff} = \Phi_1(u_{\sigma}^{eff}, u_{\tau}^{eff}, u_T^{eff}, \Lambda_{\sigma \setminus \tau}, \Lambda_{T \setminus M}, D_{\sigma}, T, \tau, m_k, t). \quad (2)$$

В общем случае величина u_{σ}^{eff} определяется отрывными частями тензоров напряжения и деформации при объемном деформировании и контактном взаимодействии:

$$u_{\sigma}^{eff} = u_{\sigma}^{eff}(T_{\sigma}^{(V, W)}, E_{\sigma}^{(V, W)}). \quad (3)$$

А величина u_{τ}^{eff} в общем случае определяется сдвиговыми частями тензоров напряжения и деформации при объемном деформировании и контактном взаимодействии:

$$u_{\tau}^{eff} = u_{\tau}^{eff}(T_{\tau}^{(V, W)}, E_{\tau}^{(V, W)}). \quad (4)$$

В формуле (2) явно учитываются два типа взаимодействий: взаимодействия между эффективными составляющими тепловой и механической энергий ($\Lambda_{M \setminus T}$), а также между эффективными составляющими энергий, обусловленных контактной и внеконтактной нагрузками ($\Lambda_{\sigma \setminus \tau}$).

(2) Изучение закономерностей взаимодействия во времени повреждений, обусловленных нагрузками разной природы:

$$\omega_{\Sigma} = \Phi_2(\omega_{\sigma(ch)}, \omega_{\tau(ch)}, \omega_T(ch), \Lambda_{\sigma \setminus \tau}, \Lambda_{T \setminus M}, D_{\sigma}, T, \tau, m_k, t). \quad (5)$$

В общем случае частные повреждения

$$\omega_{\sigma(ch)} = \omega_{\sigma(ch)}(u_{\sigma}^{eff}, D_{\sigma}, u_0, m_{\sigma}), \quad (6)$$

$$\omega_{\tau(ch)} = \omega_{\tau(ch)}(u_{\tau}^{eff}, D_{\tau}, u_0, m_{\tau}), \quad (7)$$

$$\omega_T(ch) = \omega_T(ch)(T_{\Sigma}, D_T, u_0, m_T) \quad (8)$$

являются не только функциями напряженно-деформированного состояния, но зависят от физико-механических свойств материалов, из которых изготовлены элементы силовой системы, а также условий их эксплуатации (испытаний).

В формуле (5) явно учитываются два типа взаимодействий: взаимодействия поврежденных, определяемых процессами сдвига и отрыва ($\Lambda_{\sigma\tau}$), с учетом влияния термодинамических процессов ($\Lambda_{T\setminus M}$).

(3) Изучение взаимодействия во времени опасных объемов, обусловленных нагрузками разной природы:

$$W_{P\gamma} = \Phi_3(V_{P\gamma}^{(\sigma)}, V_{P\gamma}^{(\tau)}, V_T, \Lambda_{\sigma\tau}, \Lambda_{T\setminus M}, D_{\sigma, T, \tau}, m_k, t). \quad (9)$$

В общем случае величина опасных объемов

$$V_{\sigma}^{(P, \gamma)} = V_{\sigma}^{(P, \gamma)}(T_{\sigma}^{(V, W)}, m_k, P, \gamma) = V_{ij}^{(P\gamma)}, \quad (10)$$

$$V_{\tau}^{(P, \gamma)} = V_{\tau}^{(P, \gamma)}(T_{\tau}^{(V, V)}, m_k, P, \gamma), \quad (11)$$

$$V_{\theta}^{(P, \gamma)} = V_{\theta}^{P\gamma}(\text{Grad } T_{\Sigma}, m_k, P, \gamma), \quad (12)$$

определяется градиентами всех компонент напряжения и температуры, а также зависит от статистических характеристик механических свойств материалов.

Таким образом, изучение взаимодействий эффективных энергий согласно (2), необратимых повреждений согласно (5) или опасных объемов согласно (9) и составляет сущность и содержание феноменоанализа, т. е. анализа взаимодействия явлений. Такой анализ, как видно, может быть выполнен с использованием различных характеристик явлений – эффективной энергии, необратимых повреждений, опасных объемов. Каждая из этих характеристик специфична, но назначение их едино: обеспечить практическую возможность анализа Λ -взаимодействий в системе. Заметим: если эффективная энергия, по существу, не имеет никакого материального содержания (поскольку ее материальные носители не известны), то всякое необратимое повреждение физически конкретно (его можно увидеть, измерить и т. д.), а опасный объем обладает важнейшей особенностью: он характеризует реальный масштаб повреждений с учетом вероятностной природы событий (явлений, ситуаций), т. е. то могущее быть очерченным пространство, в пределах которого и реализуются Λ -взаимодействия.

Укажем еще и на то обстоятельство, что формулы (2), (5) и (9), в сущности, описывают и другие разнообразные типы Λ -взаимодействий, связанные с наличием окружающей среды, характеристиками воздействия которых являются параметры $D_{\sigma, T, \tau}$.

Покажем это на одном примере: роль D_{σ} . Связь u_{σ}^{eff} и D_{σ} дается формулой

$$u_{\sigma}^{eff} = \frac{a_{\sigma}}{1 - D_{\sigma}} \sigma^2 \sim a_{\sigma} \left(\frac{v_{ch(\sigma)}}{v_{ch}} \right)^{m_{v(\sigma)}} \sigma^2, \quad (13)$$

при этом, как правило, $v_{ch(\sigma)}/v_{ch} > 1$. Согласно (13) величина u_{σ}^{eff} быстро растет соответственно увеличению показателя степени $m_{v(\sigma)} > 1$, но может, напротив, и резко падать, если $m_{v(\sigma)} < 1$. Параметр $m_{v(\sigma)}$, таким образом, характеризует чувствительность материалов, из которых изготовлены элементы силовой системы, к действию окружающей среды в данных условиях эксплуатации (в анализируемом случае – при коррозии под напряжением или при коррозионно-механической усталости). Иными словами, он характеризует специфическое взаимодействие среды с силовой системой – это и есть своеобразный тип Λ -взаимодействий. Еще два таких типа подобных взаимодействий – коррозия трения и термическая коррозия, или более общее: электрохимические Λ -взаимодействия.

Заметим еще: параметры D не только либо увеличивают, либо уменьшают соответствующую эффективную энергию – они соотносятся с численными величинами

$\Lambda_{\sigma\tau}$ и $\Lambda_{T\backslash M}$, т. е. непосредственно влияют на результат и направленность Λ -взаимодействий в силовой системе.

Как видно, здесь изложены лишь начала феноменоанализа; можно ожидать, что в недалеком времени она получит ускоренное развитие.

Из критерия типа (1) (см., например, [3]) получают термодинамическую зависимость предельных напряжений

$$\lg \sigma_{-1T} = \frac{1}{2} \lg C_T, \quad C_T = C_T(T, u_0, a_n, a_T, \Lambda_{M\backslash T}), \quad (14)$$

согласно которой зависимость $\sigma_{-1T}(C_T)$ представляется в двойных логарифмических координатах прямой с наклоном (1/2).

Попытка построить явную температурную зависимость предельных напряжений в двойных логарифмических координатах для разных материалов и разных условий испытания вполне неэффективны, как показано на рисунке 5 для 136 результатов испытаний [6, 7, 13].

Анализ этих данных представлен на рисунке 6. Согласно (14), 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 6 дано убедительное подтверждение этой зависимости 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 6, уравнение (14) адекватно описывает результаты более 130 экспериментов.

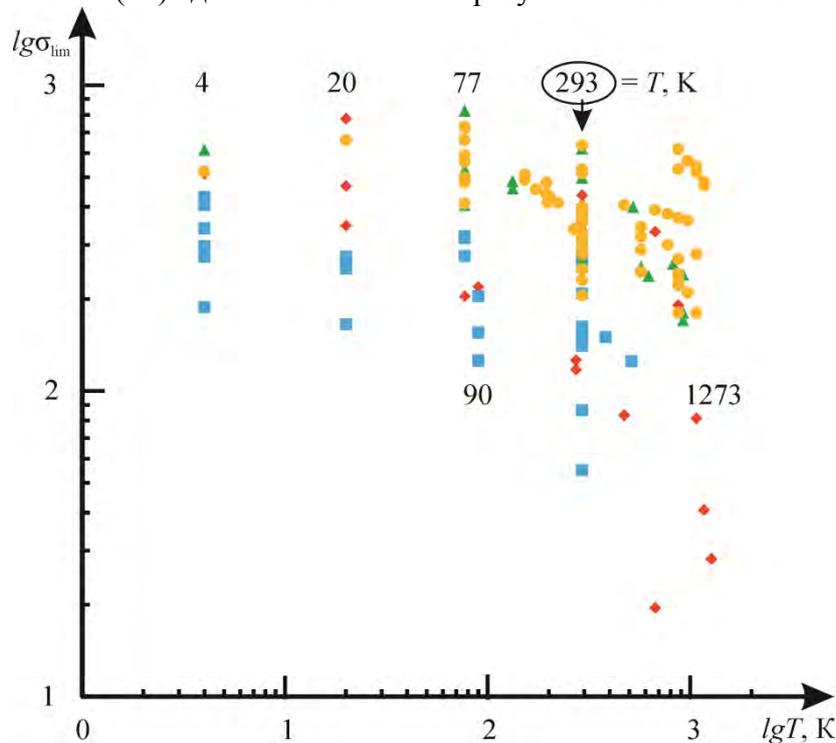


Рис. 5. Явные зависимости предела выносливости от температуры для конструкционных сталей в логарифмических (а), полулогарифмических (б, в) и равномерных (г) координатах

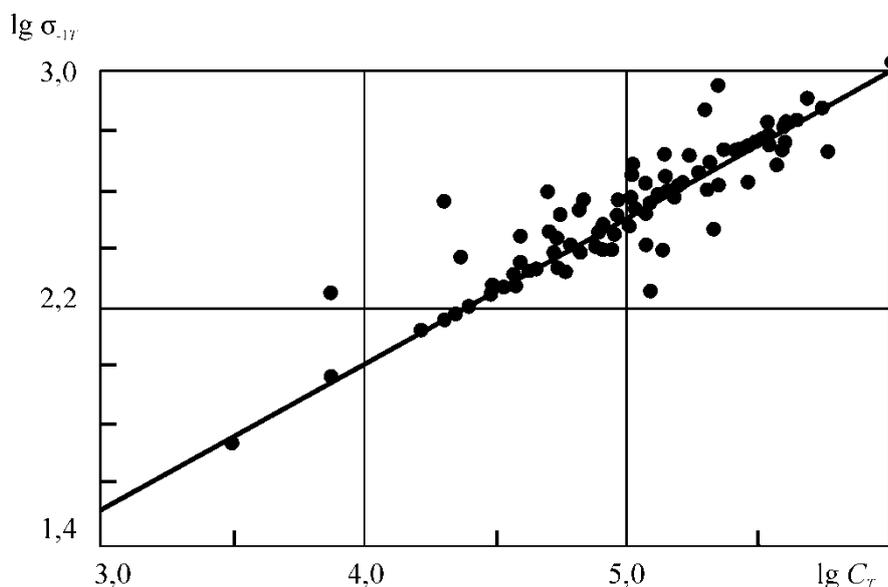


Рис. 6. Зависимость пределов выносливости конструкционных сталей от параметра C_T

Таким образом, выше дано изложение принципов феноменоанализа, сформулированы его особенности и достоинства по сравнению с традиционным факторным анализом в механике, показана эффективность феноменоанализа на основе обработки 136 результатов усталостных испытаний конструкционной стали многих марок в изотермических условиях.

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

РЕЗЮМЕ

Дано изложение принципов феноменоанализа, сформулированы его особенности и достоинства по сравнению с традиционным факторным анализом в механике, показана эффективность феноменоанализа на основе обработки 136 результатов усталостных испытаний конструкционной стали многих марок в изотермических условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сосновский, Л.А. Основы трибофатики: учебное пособие для студентов высших технических учебных заведений / Л.А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2003. – Т. 1. – 246 с., – Т. 2. – 234 с. Sosnovskiy, L.A. Tribo-Fatigue (wear-fatigue damage and its prediction). Ser.: Found. of Eng. Mech.. –Springer, 2005. – 424 p. 摩擦疲劳学 磨损 – 疲劳损伤及其预测. L.A. 索斯洛夫斯基著, 高万振译 – 中国矿业大学出版社, 2013. – 324 p.
2. Сосновский, Л.А. Фундаментальные и прикладные задачи трибофатики: курс лекций / Л.А. Сосновский, М.А. Журавков, С.С. Щербаков. – Минск: БГУ, 2010. – 488 с.
3. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 434 с.
4. Щербаков, С.С., Механика трибофатических систем / С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский. – Минск: БГУ, 2010. – 407 с.
5. Сосновский, Л.А. Сюрпризы трибофатики / Л.А. Сосновский, С.С. Щербаков. – Гомель: БелГУТ, 2005. – 192 с.

6. Прочность материалов и конструкций / ред. В. Т. Трощенко [и др.]. – Киев : Академ-периодика, 2005. – 1088 с.
7. Форрест, П. Усталость металлов : пер. с англ. / П. Форрест ; ред. С. В. Серенсен. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
8. Богданович, А.В. Прогнозирование предельных состояний силовых систем / А. В. Богданович. – Гродно : ГрГУ, 2008. – 372 с.
9. Трибофатика–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 : НПО «Трибофатика», 2000. – 60 с.
10. Журков, С.Н. Дилатонный механизм прочности твердых тел / С. Н. Журков // Физика прочности и пластичности. – Л. : Наука, 1986. – С. 5–11.
11. Расчеты на прочность в машиностроении / С. Д. Пономарев [и др.]. – М. : Гос. науч.-техн. изд. машиностроительной лит., 1958. – 1118 с.
12. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. – М. : Наука, 1974. – 560 с.
13. Сосновский, Л.А. Принципы механотермодинамики / Л.А. Сосновский, С.С, Щербаков. – Гомель: БелГУТ, 2013. –150 с.

SUMMARY

The principles of phenomenological analysis are presented. Its characteristics and advantages are formulated in comparison with the traditional factor analysis in mechanics. Effectiveness of phenomenological analysis is showed basing on processing 136 results of wear-fatigue tests of structural steel of many brands under isothermal conditions.

E-mail: zhuravkov@bsu.by
sersher@tut.by
tribo-fatigue@mail.ru

Поступила в редакцию 14.11.2015