



МЕХАНИКА ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 620.178.16; 620.178.3

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

профессор кафедры «Динамика, прочность и износостойкость транспортных средств»
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

Статья поступила 18.07.2013.

О РАЗВИТИИ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛОВ ПРИ ОБЪЕМНОМ И ПОВЕРХНОСТНОМ (КОНТАКТНОМ) ДЕФОРМИРОВАНИИ

Описывается развитие понятия об усталости металлов в связи с ее интегральной характеристикой — кривой усталости при объемном деформировании (и разрушении), поверхностном повреждении (и износе) при контактном нагружении и комплексном износоусталостном повреждении и разрушении в случае, когда один из элементов пары трения воспринимает и передает повторно-переменную (объемную) нагрузку. Показано, что понятие усталость — фундаментальное и неограниченно широкое; оно успешно используется для построения терминологии в механике усталостного разрушения, трибологии, трибофатике [1–5].

Ключевые слова: усталость, объемное деформирование, поверхностное деформирование, механическая усталость, контактная усталость, фрикционная усталость, кривая усталости, диаграмма предельных состояний, износоусталостное повреждение

В 2010 году исполнилось 150 лет с тех пор, как А. Wohler (Велер) [1] начал публикацию знаменитой ныне серии работ (1860–1870 годы) по усталости металлов. А за 12 лет до этого Понселе (Ponselet) [2] впервые употребил обыденное слово *fatigue* (усталость) для объяснения совершенно не ожидавшихся разрушений осей почтовых карет Франции после пробега в 40–60 тыс. км. И хотя проблемы усталости материалов и конструкций с тех пор держат в постоянном напряжении весь технический мир, история исследований в этой области все еще не написана. А она полна удивительных, трагических и веселых событий — и это судьба многих известнейших ученых, и это реальная история развивающейся техники: по мере роста мощности в единичном агрегате, скорости, производительности машин усталостное разрушение было и остается одной из самых частых и опасных угроз для здоровья и жизни людей в промышленном производстве; огромны и материальные потери, обусловленные усталостными поломками, как правило, наиболее ответственных узлов машин и оборудования. Кто и когда напишет такую историю, неизвестно. Но кажется небезынтересным затронуть эту тему. Только затронуть, потому что данная работа — лишь беглые заметки о том, как крепло и ширилось понятие *усталость материалов* и как оно отражалось в самой

интегральной его характеристике — *кривой усталости*, или *SN-curve* (так ее называют в англоязычных странах), или, лучше, в *кривой Велера* (так ее иногда называют во многих странах мира). Эти беглые заметки и составили данную краткую обзорную статью, написанную по материалам [3] как дополнение к [4, 5]. Значимость и распространенность понятия об усталости материалов нетрудно оценить по терминологическим публикациям и нормативным документам [6, 7, 8].

В современных книгах *механическую усталость* определяют как процесс постепенного накопления повреждений материала под действием повторно-переменных напряжений (деформаций), приводящий к изменению его строения и свойств, образованию и развитию трещин и к разрушению. «Термин *усталость металлов* означает, таким образом, поведение металлов, подвергаемых повторным напряжениям», — таково *обобщение* исследуемого понятия, «далекого от идеала, слишком неопределенного и неясного», но тем не менее «общепринятого», «широко распространенного» — дал Н.Д. Gough (Г. Дж. Гаф) в 1926 году [9]. Здесь под *поведением материала* можно понимать что угодно: и повреждение, и трещины, и разрушение и т. п. — независимо от тех физических механизмов, которые обнаруживаются исследователями

время от времени в некоторых конкретных условиях нагружения того или иного конкретного материала, в том числе и на разных масштабных уровнях (атомном, субмикро-, микро-, мезо-, макроуровне). Обобщенное определение Гафа оказалось применимым и тогда, когда И.В. Крагельским был установлен (в 1939 году) *усталостный механизм изнашивания* при трении скольжения: в последующие десятилетия стали говорить об *объемной* (или механической) *усталости* и о *поверхностной* (или *фрикционной*) *усталости*. Новые прилагательные к старому термину ничего не изменили в его существе, они лишь конкретизировали условия возникновения и зону развития процессов усталости. И, наконец, когда в конце прошлого столетия возникла *механика комплексного — износоусталостного повреждения* (которая получила краткое название *трибофатика* — *Tribo-Fatigue*), старый термин *усталость* снова был востребован.

На рисунке 1 дана сводка-классификация основных понятий, использующих термин *усталость* [3, 6, 7, 8]; в указанных работах можно найти их обоснование и пояснение. Не будем здесь все это повторять — достаточно изучить рисунок 1, чтобы придти к заключению: *усталость* — понятие *фундаментальное* и, пожалуй, *неограниченно широкое*. Чтобы подтвердить этот вывод, сошлемся на *кривые усталости человека*, предложенные Hele-Shaw (Хиль-Шоу) в 1911 году [11] и *кривые усталости сообщества людей* [12], построенные автором данной статьи в 1999 году. Ниже анализ основной интегральной характеристики сопротивления усталости — кривой усталости будет базироваться на трех блоках терминов, представленных на рисунке 1: *объемное разрушение*, *поверхностное повреждение*

и комплексное износоусталостное повреждение и разрушение.

Объемное разрушение. Поскольку жизнь и служение науке термина *усталость* начиналась с изучения объемного деформирования и разрушения, приведем здесь описание результатов самых ранних усталостных испытаний, данное Гафом [9]: «... опыты были сделаны над чугунными балками, подвергавшимися ударам качающегося груза. Когда сила удара была установлена так, что вызывала прогиб балки, равный по величине половине прогиба, достаточного для разрушения при однократном нагружении, ни одна балка не выдержала 4000 ударов. Когда же удар был ослаблен настолько, что вызывал прогиб, равный одной трети наибольшего однократного прогиба, все балки выдержали 4000 ударов. Другие балки подвергались медленному изгибу посредством вращающегося эксцентрика, причем было найдено, что такие балки безопасно выдерживали 100 000 прогибов, равных по величине одной трети наибольшего однократного прогиба. Однако, когда величина прогибов доводилась до половины наибольшего однократного прогиба, балки ломались приблизительно после 900 прогибов. Таким образом, была, наконец, установлена истина, что разрушение может происходить от повторения напряжения меньшего по величине, чем статическое временное сопротивление.

В 1860–1861 годах Вильям Фэрберн (W. Fairbrain) [10] провел для Торгового совета несколько опытов, которые заслуженно стали знаменитыми. Была использована клепаная балка из сварочного железа. Прилагаемая к ней нагрузка увеличивалась или уменьшалась динамически при помощи механизма, приводимого в движение водяным колесом. Балка была длиной 22 фута, высотой 16 дм и состояла из листов 3/16 и 5/16 дм толщиной. Вычисленная статическая ломающая нагрузка балки была 12 т. Фэрберн нашел, что 3 млн повторений нагрузки в 3 т были недостаточны, чтобы произвести разрушение. В то же время, если прилагалась большая нагрузка, разрушение наступало при соответственно меньшем числе ее повторений. Он вывел заключение, что существует безопасная нагрузка для данной конструкции, которая либо может прилагаться без разрушения неограниченное время, либо, если разрушение в конце концов и происходит, требует столь большого числа повторений нагрузки, что оно превосходит число возможных повторений ее в течение нормальной жизни моста. Фэрберн указывает, что 12 000 000 повторений нагрузки соответствует 328 годам жизни моста, если предполагать 100 повторений в день.»

В этом отрывке описано многое из рисунка 1: и *механическая усталость*, и *ударная усталость*; и то, что сегодня называется *малоцикловой усталостью*, *многоцикловой усталостью*; здесь же обнаруживаются подходы и к *квазистатической усталости*, а также к *высокоресурсной усталости*,



Рисунок 1 — Основные понятия, использующие термин *усталость*

или *гигаусталости*. С сожалением опустим здесь историю поиска формы кривых усталости в разных областях по числу циклов до разрушения, предпринимавшиеся многими исследователями в разное время; здесь не приводятся даже первые кривые механической, ударной, ударно-механической, термической, термомеханической усталости — это завело бы слишком далеко и привело бы к книге, но не статье. Обратимся лишь к обобщенной характеристике сопротивления механической усталости [7, 8, 13] — ее называют *полной кривой усталости*, поскольку ее строят во всем интервале возможного изменения определяющих параметров: $0 \leq \sigma \leq \sigma_b$ МПа и $1 \leq N_\sigma \leq \sim 10^9$ циклов (рисунок 2).

Полная кривая усталости состоит из четырех (I, II, III, IV) характерных участков (областей) и имеет три (L, K, G) точки перелома; координаты точек перелома дают соответствующие критические значения *пределных напряжений и долговечностей* (предел квазистатической усталости $\sigma_L, N_{L\sigma}$; предел малоциклового усталости $\sigma_K, N_{K\sigma}$; предел многоциклового усталости $\sigma_G, N_{G\sigma}$); наклон участков I, II, III, IV к оси абсцисс характеризуется соответствующим углом α , котангенс которого называют *параметром наклона кривой усталости*. Особенность и главное достоинство схематизации полной кривой усталости, представленной на рисунке 2 — каждому ее участку поставлен в соответствие основной тип его фазового портрета — *петли гистерезиса*, построенной в координатах напряжение-деформация: открытая петля пластического гистерезиса (I), незамкнутая петля упругопластического гистерезиса (II), замкнутая петля механического гистерезиса (III) и вырожденная петля механического гистерезиса (IV). Тем самым указан ведущий механизм объемного усталостного разрушения: большая (квазистатическая) пластическая деформация (I), упругопластическая деформация (II), микропластичность (III) и нанопластичность (IV).

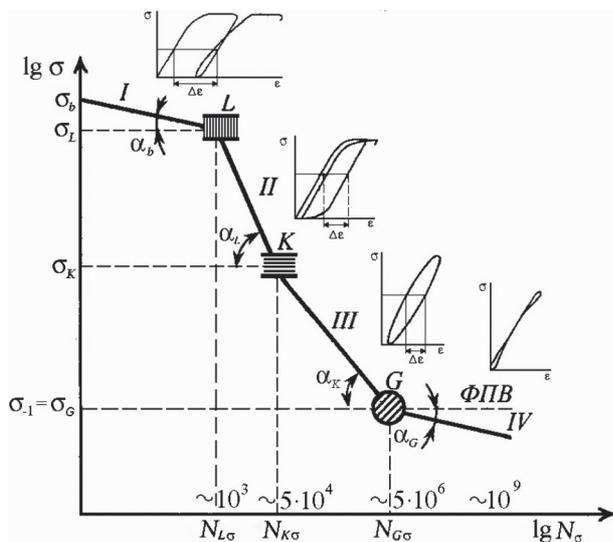


Рисунок 2 — Схема полной кривой механической усталости

Если полная кривая усталости реализуется так, как показано на рисунке 2, то ясно, что ее аналитическое описание вряд ли целесообразно представлять в виде единого уравнения. С другой стороны, поскольку участки I–IV полной кривой усталости, построенной в двойных логарифмических координатах, являются прямыми линиями, то их можно описать простейшим степенным уравнением

$$\sigma^{m_\sigma} N_\sigma = C_\sigma = \text{const} \quad (1a)$$

со своими (для каждого участка) параметрами m_σ и C_σ . Найти их нетрудно, если известны координаты точек L, K и G . В некоторых экспериментах перелом кривой усталости в точке K не обнаруживается, и тогда участки II и III аппроксимируются одной плавной линией.

Заметим, что уравнения кривых усталости могут иметь и другой вид. Их сводка приведена в таблице 1 [14, 15]. Она свидетельствует о большом многообразии *моделей усталости*, которые принимаются для описания результатов усталостных испытаний.

Экспериментальное подтверждение схемы полной кривой усталости (см. рисунок 2) дано на рисунке 3. Для всей серии испытаний: 1) принят единый типоразмер образцов, изготовленных из одного материала; 2) все испытания провели на одной машине (с определенным способом силового возбуждения); 3) испытания в малоциклового, многоциклового и высокоресурсной областях провели при единой (неизменяемой) частоте; 4) принят одинаковый критерий достижения предельного состояния для всех режимов и условий усталостных испытаний. Все это обеспечило полную корректность методики испытаний.

Для построения полной кривой усталости проведены испытания серии образцов, изготовленных из легированной стали 18ХГТ ($\sigma_b = 1700$ МПа, твердость — 58...62 HRC после цементации на глубину ~ 1 мм). Образцы изготовлены по технологии, применяемой для производства зубчатых колес из стали 18ХГТ номенклатуры ПО «ГОМСЕЛЬМАШ».

Частота вращения образцов при испытаниях составляла 3000 мин^{-1} . Испытания проводили непрерывно до достижения предельного состояния. Критерием предельного состояния было принято разделение образца на две части (усталостный излом).

Результаты испытаний приведены на рисунке 3. На графике (см. рисунок 3) отчетливо устанавливаются, в соответствии с рисунком 2, четыре характерных участка (I — квазистатическая усталость, II — малоцикловая усталость, III — многоцикловая усталость, IV — высокоресурсная усталость), а также координаты характерных точек (σ_b — предел прочности, σ_L — предел квазистатической усталости, σ_K — предел малоциклового усталости, σ_G — предел многоциклового усталости, σ_D — предел высокоресурсной усталости).

Таблица 1 — Сводка уравнений кривой усталости

| Уравнения | Параметры и коэффициенты |
|---|--|
| 1. Мягкое нагружение | |
| $N = \begin{cases} \frac{\sigma_R^{m_N} N_G}{\sigma^{m_N}}, \sigma \geq \sigma_R \\ \infty, \sigma < \sigma_R \end{cases}$ | (1) m_N — показатель наклона левой ветви кривой усталости, изображенной в двойных логарифмических координатах и имеющей горизонтальный участок (физический предел выносливости σ_R); N_G — абсцисса точки перелома кривой усталости; σ — амплитуда цикла напряжений |
| $N = \begin{cases} \frac{\sigma_R^{m_N} N_G}{\sigma^{m_N}}, \sigma \geq \sigma_{RN} \\ \frac{\sigma_R^{m_{N1}} N_G}{\sigma^{m_{N1}}}, \sigma < \sigma_{RN} \end{cases}$ | (2) m_N и m_{N1} — показатели наклона двух участков кривой усталости в многоцикловой области для случая отсутствия физического предела выносливости (горизонтального участка); σ_{RN} — предел ограниченной выносливости |
| $K_N = (\lg N - \lg N_G) = (\sigma - \sigma_R)$ | (3) K_N — показатель наклона левой ветви кривой усталости, изображенной в полулогарифмических координатах |
| $a^\sigma N = C$ | (4) a, C — параметры |
| $\frac{1}{\sigma} = a \lg N + b$ | (5) a, b — параметры |
| $\sigma = bN^{-a}$ | (6) a, b — постоянные, зависящие от физико-механических свойств материала |
| $\sigma = bN^{-a} + \sigma_R$ | (7) a, b — параметры, зависящие от физико-механических свойств материала |
| $\sigma - \sigma_R = b(N + B)^{-a}$ | (8) a, b, B — параметры |
| $\sigma = (\sigma_b - \sigma_R) \left(\frac{N}{B} - 1 \right)^{-a} + \sigma_R$ | (9) a, b — параметры |
| $(\sigma - \sigma_R) / (\sigma_b - \sigma_R) = N^{-a}$ | (10) a — параметр |
| $(\sigma - \sigma_R) / (\sigma_b - \sigma_R) = bN^{-a}$ | (11) σ_b — предел прочности |
| $\sigma = \sigma_\infty + A(\lg N)^{-2}$ | (12) σ_∞ — амплитуда напряжений, соответствующая $N = \infty$; A — параметр |
| $\frac{\sigma_a}{\sigma_B} = \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right) \left[A_0 + \gamma (1 + A_0) \right]$ | (13) A_0, γ — параметры; σ_m — среднее напряжение цикла. Для сталей $\gamma = \frac{\sigma_m (2 + \sigma_m / \sigma_B)}{3\sigma_B}, \quad A_0 = \frac{1 + 0,0038(\lg N)^4}{1 + 0,008(\lg N)^4}.$ Для алюминиевых сплавов $\gamma = \frac{\sigma_m}{\sigma_B \left(\frac{\sigma_B \lg N}{225} \right)^4},$ $A_0 = \frac{1 + 0,0031(\lg N)^4}{1 + 0,064\sigma_B} / (1 + 0,064\sigma_B).$ |
| $\sigma_{\max} = \sigma_{\min} + Cb^{N^a}$ | (14) C — параметр, зависящий от материала; $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ — максимальное и минимальное напряжения цикла |
| $N_\tau = N_G \left(\frac{\sigma_R}{\sigma} \right)^{m_N} (1 - \omega_1)^{m_C + 1}$ | (15) N_τ — число циклов до появления магистральной трещины; ω_1 — деформационное повреждение в 1-ом цикле нагружения; m_C — параметр поврежденности |

Окончание таблицы 1

| Уравнения | | Параметры и коэффициенты |
|--|------|--|
| $N = N_{\tau} + N_{ж}, \text{ где } N_{\tau} = \frac{1}{C_U} \exp\left(\frac{U_0 - a_{\gamma} \sigma}{K_T}\right) \times$ $\times \left\{ 1 - \omega_1 \exp\left[\frac{a_{\gamma} \sigma}{K_T} \left(1 - \frac{1}{\omega_1}\right)\right] \right\}$ | (16) | $N_{ж}$ — живучесть (число циклов развития магистральной трещины до окончательного разрушения); $\omega_s = F/F_0$ — степень повреждения магистральной трещиной; F_0 — номинальная площадь поперечного сечения за вычетом площади, занятой трещиной; c_s, β — параметры; $\sigma_s = \frac{\sigma}{1 - F/F_0}$ — |
| $N_{ж} = \frac{F_0}{c_s \beta \sigma} \exp[-\beta \sigma_s]$ | (17) | напряжение в сечении с учетом площади, занятой трещиной; ω_1 — повреждение в 1-ом цикле нагружения |
| $N = \frac{A \exp[-C(\sigma - \sigma_R)]}{\sigma - \sigma_R}$ | (18) | A, C — параметры |
| $N = \frac{A}{(\sigma - \sigma^*)^b \sigma^{-\sigma}}$ | (19) | b — фактор, учитывающий неравномерность развития пластических деформаций и их реверс; σ^* — безопасное напряжение; A — параметр |
| $N + B = \frac{A \exp(\sigma - \sigma_R)}{\sigma - \sigma_R}$ | (20) | A, B — параметры |
| $\frac{\sigma - \sigma_R}{\sigma_B - \sigma_R} = \exp[-b(\lg N)^a]$ | (21) | a, b — параметры |
| $N = \frac{Q_T}{\sigma} \times \ln \left\{ 1 + \left[\exp\left(\frac{\sigma - \sigma_R}{v_0}\right) - 1 \right]^{-1} \right\}$ | (22) | Q_T — коэффициент выносливости; $v = \frac{\sigma_R K_N}{\sigma_R - K_N}$ — параметр |
| $\sigma = \sigma_R - b \ln(1 - e^{aN})$ | (23) | a, b — параметры |
| $D_R (N - N_r) \exp\left[b \frac{\sigma - \sigma_R}{\sigma_R}\right] = L$ | (24) | $L_{пл}$ — скрытая теплота плавления; B, D_R, N_r — параметры |
| $\frac{\sigma - \sigma_R}{\sigma_B - \sigma_R} = 1 - \Phi(a \lg N + B)$ | (25) | $\Phi(x)$ — функция ошибок Гаусса |
| $\lg \sigma = K_0 - \left(\frac{n_d}{1+n}\right) \lg N$ | (26) | n_d — коэффициент деформационного упрочнения; K_0 — параметр |
| $\sigma = \lg S_B - \frac{n}{1+5n} \lg 2N$ | (27) | S_B — истинный предел прочности |
| $N^{-a} (\sigma - \sigma_y^{\text{II}}) \frac{E - E_{\tau}^{\text{II}}}{EE_{\tau}^{\text{II}}} = c$ | (28) | σ_y^{II} — циклический предел упругости; |
| $N (\sigma - \sigma_y^{\text{II}})^2 \frac{E - E_{\tau}^{\text{II}}}{EE_{\tau}^{\text{II}}} = c$ | (29) | E, E_{τ}^{II} — модули упругости и упрочнения |
| 2. Жесткое нагружение | | |
| $\Delta \epsilon N^a = c$ | (30) | $a = 0,55 \dots 0,66$; $c = (0,7 \dots 1,2)e_p$; e_p — истинное удлинение при разрыве; c — постоянная; $\Delta \epsilon$ — неупругая деформация за цикл |
| $\Delta \epsilon N^{0,5} = e_p / 2$ | (31) | e_p — истинное удлинение при разрыве |

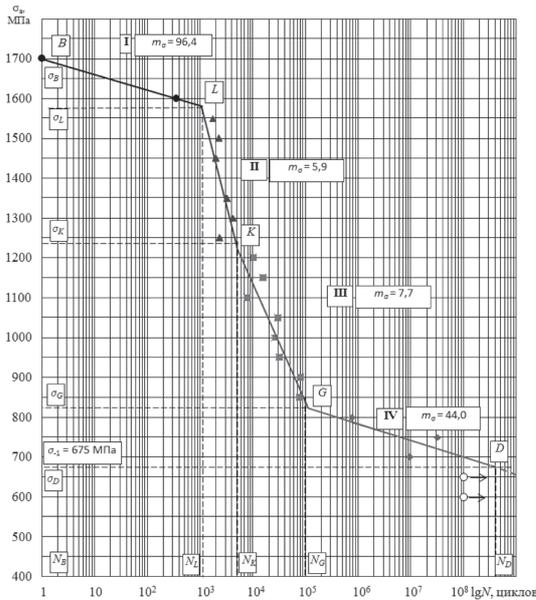


Рисунок 3 — Полная кривая механической усталости образцов стали 18ХГТ

Еще раз особо подчеркнем тот основополагающий факт, что понятие (и термин) усталость оказались применимым по существу для всех условий повторно-переменного нагружения — каков бы ни был физический механизм повреждения и разрушения. Поэтому не удивительно, что применение этого термина расширилось — появилась *случайная усталость, усталость при жестком нагружении* и т. д.

Поверхностное повреждение. Объемное усталостное разрушение реализуется при повторно-переменном нагружении простейшего объекта — *образца материала* или *отдельного элемента конструкции*. Поверхностное усталостное повреждение реализуется при контактом взаимодействии двух твердых тел, прижимаемых друг к другу контактной нагрузкой в процессе относительного движения; эти тела составляют специфический объект — *пару трения*.

Удивительно, но факт: многие десятилетия в трибологии разрабатывали различные теории изнашивания (см., например, [16, 17]), но только в начале 40-х годов прошлого века, как уже отмечалось, появилась усталостная теория. А между тем совершенно очевидно (рисунок 4) [18]: движение всякого ин-

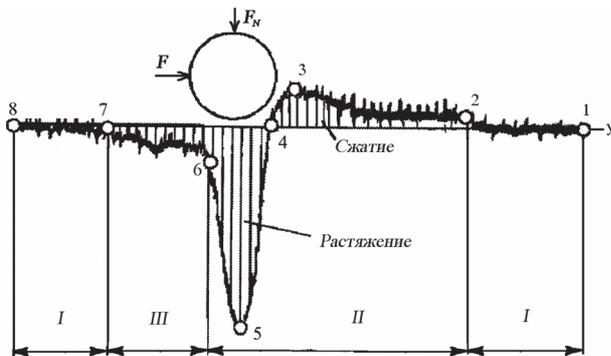


Рисунок 4 — Осциллограмма перемещений поверхности полимерного материала при скольжении по нему металлического индентора

дентора, прижимаемого к поверхности, гонит перед собой волну знакопеременной деформации, повторение которой в процессе трения и ведет (обязательно) к *поверхностной усталости* со всеми вытекающими отсюда последствиями. По сравнению с объемной (механической) усталостью тут обнаруживаются три особенности: а) объемное разрушение в данных условиях не реализуется — обнаруживается повреждение и разрушение (износ) лишь тонкого поверхностного слоя; б) поверхностная усталость обычно сопровождается многообразными физико-химическими явлениями, поскольку между трущимися элементами образуется активное третье тело (смазка + продукты изнашивания); в) контактное циклическое взаимодействие реализуется и при ударе твердых частиц, жидких капель; потоков жидкости и газа, несущих твердые частицы [19]; при воздействии излучений различной природы [20]. В случае в) имеют дело, по существу, с *микроусталостью*: требуется воздействие огромного числа частиц, чтобы пошел усталостный процесс. По-видимому, даже коррозию можно причислить к усталостным явлениям: в течение длительного времени электрохимические взаимодействия повторяются бесчисленное число раз (см. рисунок 1).

Опять пропустим большую историю: кто, когда и какую построил кривую поверхностной (фрикционной) усталости. Заметим лишь, что все они ограничивались долговечностью порядка $4 \cdot 10^3$ циклов (см., например [17, 21]), а критерии достижения предельного состояния были неопределенными, например: образование мало изменяющегося количества видимых трещин; начальное отделение частиц износа; резкое увеличение глубины внедрения индентора; уменьшение силы трения; периодические изменения работы выхода электронов на трущейся поверхности и др. На рисунке 5 представлена пер-

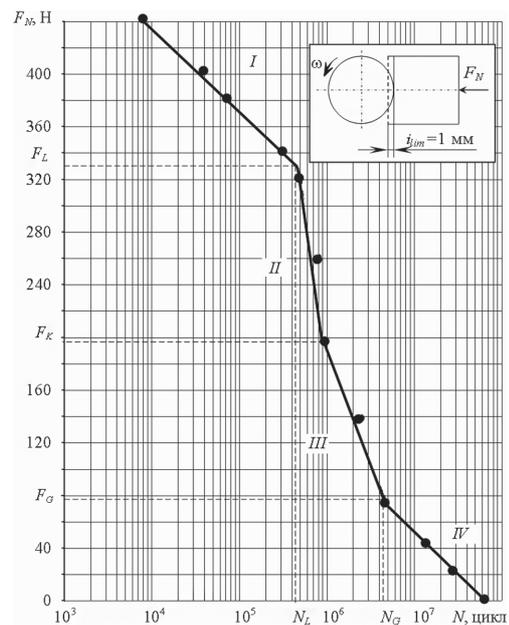


Рисунок 5 — Кривая фрикционной усталости для трибосоприжения сталь 45 / полимер Ф4-ВМ

вая почти полная (на базе $8 \cdot 10^7$ циклов) кривая фрикционной усталости, построенная экспериментально [22, 23]; критерием предельного состояния служила физически (и технически) ясная величина: предельный (допустимый) износ i_{lim} . Она имеет такие же характерные участки, как и кривая объемной усталости (см. рисунок 2), но естественно, что интерпретация наблюдаемых участков поверхностного повреждения должна быть иной, своеобразной. Она дана на рисунке 6; здесь каждой области (I, II, III, IV) поставлен в соответствие ведущий (типичный) механизм трения и изнашивания; в свое время их классификацию дал И. В. Крагельский (см., например, [16]).

Основные виды повреждения при трении схематически даны по И.В. Крагельскому и иллюстрируют движение (со скоростью ϑ) единичной неровности, внедренной в плоскость. *Микрорезание* (I) есть квазистатическое разрушение путем сдвига при трении; его легкую форму называют абразивным изнашиванием. Оно наступает при напряжениях $\tau_w \gg \tau_L$. В этом случае обычно $h/r > 0,1$ при трении без смазки и $h/r > 0,3$ при трении со смазочным материалом (h — глубина внедрения единичной неровности с радиусом r). Числу циклов $N_\tau = 1$ соответствует предел прочности при сдвиге τ_b . Пластическое отеснение (II) происходит при напряжениях $\tau_L > \tau_w > \tau_K$ (величина τ_K близка к значению предела текучести при сдвиге). В этом случае реализуется малоцикловое (упругопластическое) изнашивание, при этом $h/r < 0,1$ при трении без смазки и $h/r < 0,3$ при трении со смазочным материалом. В промежуточной зоне (I–II) обнаруживается когезионный отрыв материала, который характерен при адгезионном изнашивании. Оно возможно при условии, что градиент сдвигового сопротивления (τ_0) в поверхностном слое будет отрицательным: $d\tau_0/dh < 0$. *Упругое отеснение* (III) имеет место при напряжениях $\tau_K > \tau_w \gg \tau_G$. В этом случае наблюдается *многоцикловое (квазихрупкое) изнашивание*, при этом $h/r < 0,01$ при трении без

смазки и $h/r < 0,001$ при трении со смазочным материалом. Для области IV при напряжениях $\tau_w < \tau_G$ характерно *разрушение пленок* (третьего тела), что обуславливает *окислительное изнашивание* (высокоресурсная область). Его реализация возможна при положительном градиенте сдвигового сопротивления в поверхностном слое: $d\tau_0/dh > 0$. На процессы повреждения в области IV существенное влияние оказывают два поверхностных эффекта — эффект Ребиндера и эффект Роско. Переход от одного к другому преимущественно к виду изнашивания (разрушения при трении) контролируют критические значения предельных напряжений τ_L, τ_K, τ_G , которым соответствуют долговечности по износу $N_{L\tau}, N_\tau, N_{G\tau}$.

Как видно, на полной кривой фрикционной усталости (см. рисунок 6) обнаруживаются характеристики, совершенно аналогичные тем, которые представлены на рисунке 2. На рисунке 6 в частности устанавливаются критические точки перехода $L(\tau_L, N_{L\tau}), K(\tau_K, N_{K\tau})$ и $G(\tau_G, N_{G\tau})$ и параметры наклона (углы α) отдельных участков. Заметим, нагрузочным параметром на рисунке 5 может служить либо контактная нагрузка F_N (см. рисунок 5), либо удельная сила трения (фрикционное напряжение) $\tau_w = fF_N$ (см. рисунок 6), f — коэффициент трения. И еще, если на кривой механической усталости (см. рисунок 2) усталостная долговечность N_σ соответствует числу циклов до разрушения образца на части, то на кривой фрикционной усталости (см. рисунки 5 и 6) износодолговечность N_τ соответствует достижению износом некоторой (наперед заданной) критической величины (на рисунке 5 это $i_{lim} = 1000$ мкм). Аналогично поступают и при построении кривой механической усталости, когда предельное состояние определяется некоторым критическим значением длины a магистральной усталостной трещины (равной, например, $a_{lim} = 1$ мм).

Если на полной кривой фрикционной усталости (см. рисунок 6) точка K ее перелома не устанавливается, а область I не представляет интереса, то строят кривую фрикционной усталости в многоцикловой области, которую называют просто *кривой фрикционной усталости* (рисунок 7 а). По ней определяют *предел фрикционной усталости* τ_f — подобно тому, как устанавливают предел выносливости σ_{-1} по кривой механической усталости в многоцикловой области (см. рисунок 7 б).

Таким образом, термину *фрикционная усталость* придается общий смысл поверхностного повреждения и разрушения при трении скольжения независимо от его механизмов (см. рисунок 6) — подобно тому, как термину *механическая усталость* придается общий смысл объемного повреждения и разрушения при циклическом деформировании независимо от его механизмов.

Уравнение любого из участков (I, II, III, IV) кривой фрикционной усталости (см. рисунки 5 и б) имеет вид

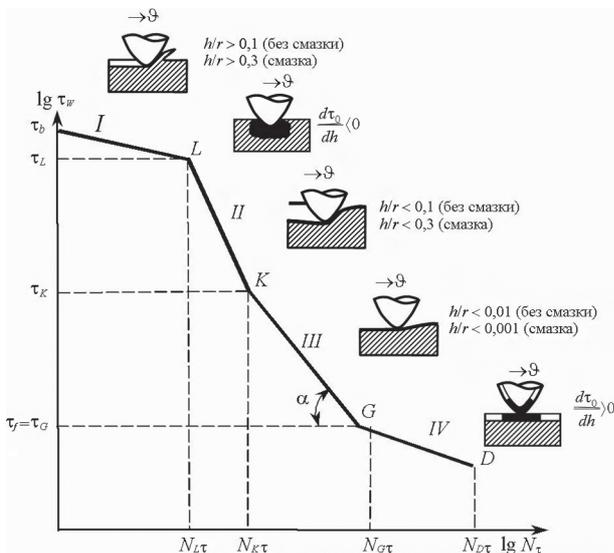


Рисунок 6 — Схема полной кривой фрикционной усталости

$$\tau_w^{m_\tau} N_\tau = C_\tau, \quad (16)$$

где показатель наклона (см. рисунок 7 а)

$$m_\tau = \text{ctg } \alpha,$$

C_τ — постоянная. Из (2) следует формула для долговечности по износу, например, в многоцикловой (III) области

$$N_\tau = C_\tau / \tau_w^{m_\tau}; \quad C_\tau = \tau_f^{m_\tau} N_{Gr},$$

согласно которой число циклов до достижения критического или предельного состояния пары трения обратно пропорционально удельной силе трения в степени m_τ . По форме уравнение (16) аналогично таковому (см. (1а)) при механической усталости; оно известно и применяется в трибологии [16]. А кривые усталости (см. рисунок 7 а, б) положены в основу методов расчета на прочность и износостойкость (таблица 2) [28].

На рисунке 8 представлена схема *полной кривой контактной усталости* [24], дополненная указаниями характера ведущих процессов поверхностного повреждения в условиях *трения качения* (например, колеса по рельсу). Здесь термину *контактная усталость* снова придается общий смысл поверхностного повреждения и разрушения при трении качения независимо от его механизмов, а единственным (для всех участков) критерием предельного состояния принимается интегральная величина — критическое значение сближения осей.

Если обратиться к литературе по трибологии, нетрудно установить, что полные кривые при фрикционной, контактной, эрозионной и т. д. усталости отсутствуют вообще, а их частные виды в ограниченной (например, многоцикловой) области крайне редки даже в литературе начала XXI века. Можно, однако, полагать, что ситуация скоро изменится;

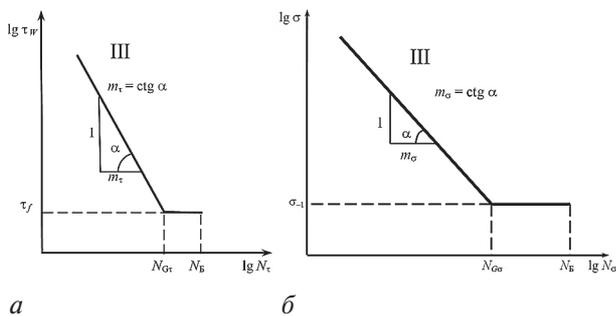


Рисунок 7 — Схемы кривых фрикционной (а) и механической (б) усталости

Таблица 2 — Условия прочности и износостойкости

| Условие прочности (в соответствии с рисунком 7 б) | Условие износостойкости (в соответствии с рисунком 7 а) |
|---|--|
| $\sigma \leq [\sigma] = \frac{\sigma_{-1}}{n_\sigma}$ | $\tau_w = fp_a \leq [\tau] = \frac{\tau_f}{n_\tau}$ |

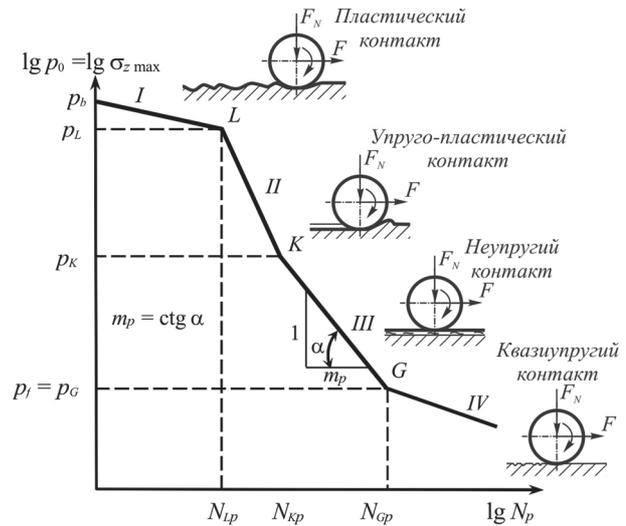


Рисунок 8 — Полная кривая контактной усталости

во всяком случае, на мировом трибологическом конгрессе (WTC III, Вашингтон, 2005 год) впервые была организована секция «Усталость и износ», а ученые-трибологи «увеличивают» долю усталостного износа (по сравнению с другими видами износа) до 30–60 %.

Износоусталостное повреждение и разрушение. Если хотя бы один элемент пары трения подвергается объемному циклическому деформированию так, что в зоне трения одновременно возникают и контактные напряжения, и напряжения от внеконтактной нагрузки, имеют дело со своеобразным объектом, который получил название силовая система [6, 7]. Основные типы комплексного (износоусталостного) повреждения и разрушения таких систем установлены в *трибофатике* [24–28] и включены в межгосударственный стандарт [7]; они воспроизведены на рисунке 1. Для получения и анализа характеристик комплексного повреждения следует строить по меньшей мере четыре кривых усталости (рисунок 9): одна кривая механической усталости, одна кривая контактной усталости и как минимум две *кривые контактно-механической усталости*, при реализации *прямого* (влияние процессов трения и изнашивания на изменение характеристик сопротивления усталости) и *обратного* (влияние циклических напряжений на изменение характеристик износостойкости) трибофатических эффектов [24]. В этой связи возникает необходимость, кроме обычных характеристик, дополнительно ввести *коэффициенты прямого* ($K_D = \sigma_{-1} / \sigma_{-1p}$) и *обратного* ($K_B = p_f / p_{\sigma}$) *эффектов*. Сводка всех параметров, определяемых по экспериментальным данным, представленным на рисунке 9, дана в таблице 3. Заметим, поскольку кривые контактно-механической усталости строят по двум нагрузочным параметрам, то фактически в таких условиях определяется так много величин предельных напряжений, сколько пожелает исследователь. В результате строят многокритериальную *диаграмму предельных состояний силовых систем* (рисунок 10) [25], на которой ось абсцисс является трибологической

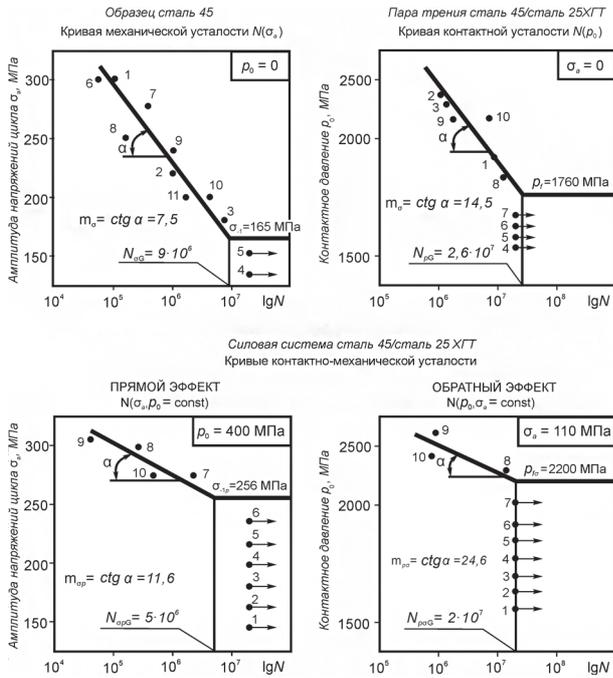


Рисунок 9 — К определению основных характеристик износоустойчивости и разрушения (номер точки указывает последовательность испытаний)

шкалой, а ось ординат — прочностной шкалой. Точки σ_{-1} и τ_f — важнейшие характеристики объемной и поверхностной усталости, а кривые *AB* и *CD* характеризуют комплексное износоустойчивое повреждение и разрушение ($p_{f\sigma}$ и σ_{-1p}). В случае прямого эффекта предельное состояние достигается по критерию механической усталости, тогда как процессы трения и изнашивания являются сопутствующими, а в случае обратного эффекта предельное состояние достигается по критерию износоустойчивости, тогда как процессы механической усталости являются сопутствующими.

Диаграмма предельных состояний, представленная на рисунке 10, построена по критериям несущей способности систем. В ряде случаев важными являются характеристики износа (либо ин-

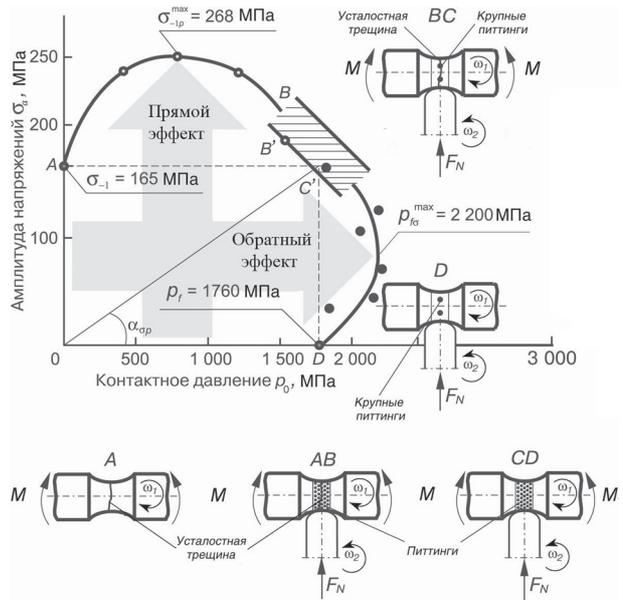


Рисунок 10 — Диаграмма предельных состояний силовой (трибофатической) системы «сталь 45 (вал) / сталь 25ХГТ» (ролик) при контактно-механической усталости

тенсивности изнашивания) и долговечности. Поэтому результаты испытаний можно представлять в виде диаграмм предельных состояний, построенных по критериям износоустойчивости и долговечности [24, 25].

На рисунке 11 приведены результаты испытаний на фрикционно-механическую усталость трибофатической системы «сталь 40Х — полиамид «Дуретан» ВКВ-30Н». Здесь представлены соответствующие зависимости в трехмерной системе координат: предельное напряжение σ_{-1p} стального образца; контактное давление p_a ; интенсивность изнашивания $I_\sigma(\sigma, p)$ полимерного контробразца — это диаграмма предельных состояний по критерию износоустойчивости. Согласно рисунку 11, чем больше p_a и $I_\sigma(\sigma, p)$, тем меньше предел выносливости σ_{-1p} (пространственная кривая 1). Кривая 4 харак-

Таблица 3 — Система обозначений и численные значения основных характеристик

| Характеристики свойств | Кривая механической усталости | Кривая контактной усталости | Кривые контактно-механической усталости | |
|--|-------------------------------|-----------------------------|---|-----------------------------------|
| | $N(\sigma_a)$ | $N(p_0)$ | $N(\sigma_a, p_0 = \text{const})$ | $N(p_0, \sigma_a = \text{const})$ |
| Предел выносливости, МПа | $\sigma_{-1} = 165$ | $p_f = 1760$ | $\sigma_{-1p} = 256$ | $p_{f\sigma} = 2200$ |
| Абсцисса точки перелома кривой усталости, цикл | $N_{G\sigma} = 9 \cdot 10^6$ | $N_{Gp} = 2,6 \cdot 10^7$ | $N_{G\sigma p} = 5 \cdot 10^6$ | $N_{Gp\sigma} = 2 \cdot 10^7$ |
| Показатель наклона кривой усталости | $m_\sigma = 7,5$ | $m_p = 14,5$ | $m_{\sigma p} = 11,6$ | $m_{p\sigma} = 24,6$ |
| Коэффициент прямого эффекта | — | — | $K_D = 1,62$ | — |
| Коэффициент обратного эффекта | — | — | — | $K_B = 1,25$ |

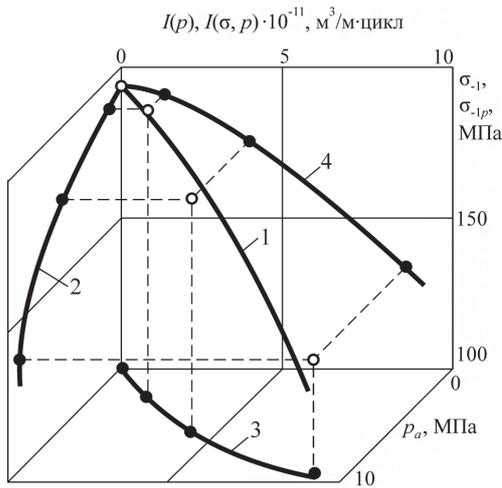


Рисунок 11 — Диаграмма предельных состояний металл / полимерной трибофатической системы «вал — подшипник скольжения» по критерию износостойкости

теризует обратный эффект (влияние интенсивности изнашивания на изменение σ_{-1p}), кривая 2 описывает прямой эффект (влияние контактного давления на изменение σ_{-1p}), а кривая 3 дает взаимосвязь $p_a - I_\sigma(\sigma, p)$. Таким образом, данная диаграмма содержит практически исчерпывающую информацию о сопротивлении трибофатической системы фрикционно-механической усталости по критерию износостойкости.

На рисунке 12 приведены результаты испытаний на фрикционно-механическую усталость трибофатической системы «сталь 40X — сополимер формальдегида СФД». Но в этом случае представлены соответствующие зависимости в другой (по сравнению с рисунком 11) системе координат, а именно циклические напряжения σ — интенсивность изнашивания $I_\sigma(\sigma, p)$ полимерного контртела — циклическая долговечность $N(\sigma, p)$ стального образца; все испытания проведены при неизменном контактном давлении ($p_a = 5,7 \text{ МПа} = \text{const}$).

Согласно рисунку 12, чем больше σ и $I_\sigma(\sigma, p)$, тем меньше долговечность $N(\sigma, p)$ (простран-

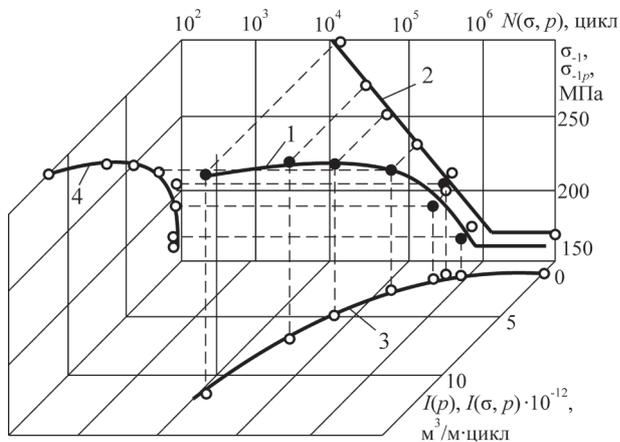


Рисунок 12 — Диаграмма предельных состояний металл / полимерной трибофатической системы вал / подшипник скольжения по критерию долговечности

ственная кривая 1). Кривая 4 характеризует обратный эффект (влияние циклических напряжений на изменение $I_\sigma(\sigma, p)$), кривая 3 описывает прямой эффект (влияние интенсивности изнашивания на $N(\sigma, p)$), а кривая 2 дает взаимосвязь $\sigma - N(\sigma, p)$. Таким образом, данная диаграмма дает исчерпывающую информацию о сопротивлении трибофатической системы фрикционно-механической усталости по критерию долговечности (или ресурса).

К настоящему времени получено крайне ограниченное количество кривых *контактно-механической и фрикционно-механической усталости* [24–26]; известно огромное количество кривых фреттинг-усталости при реализации прямого эффекта (см., например, [29–30]), тогда как для случая обратного эффекта они отсутствуют. Это означает, что экспериментальные исследования в области трибофатики следует интенсифицировать; впереди — большой фронт увлекательных и полезных исследований. Добавим: к настоящему времени не известно ни одной полной кривой комплексного износоусталостного повреждения и разрушения при контактно-механической, фрикционно-механической и фреттинг-усталости [24–26, 29–30].

Также нужно указать на принципиальное различие двух понятий: *износоусталостное повреждение* и *усталостное изнашивание*. В этой связи уместно привести соответствующие определения согласно стандартам:

- *износоусталостное повреждение (wear-fatigue damage)* — повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений усталости, трения в любых его проявлениях, изнашивания и (или) эрозии (ГОСТ 30638–99);

- *усталостное изнашивание (fatigue wear)* — механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов материала поверхностного слоя (ГОСТ 27674–88).

В заключение еще раз подчеркнем: нынче с термином «усталость» не связывают, как ранее, только механизмы многоциклового усталости (дислокационный, вакансионный, термофлуктуационный и др.); в настоящее время об усталости говорят всегда, когда повреждение и разрушение (по любому механизму) обусловлено повторно-переменными напряжениями (деформациями), изменяющимися во времени по любому закону — применительно к любому изучаемому объекту. При механической усталости — это отдельный *элемент конструкции* (образец). При изнашивании — это *пара трения* (твердое тело / твердое тело, частицы / твердое тело, жидкость / твердое тело и т. п.). При износоусталостном повреждении — это *трибофатическая система*.

Напомним, что для экспериментального определения характеристик усталостного повреждения и разрушения в многообразных условиях разработаны методы и испытательные машины (серии СИ)

(см., например, [31]); все испытания проводят на унифицированных (по размерам) объектах, что позволяет корректно сравнивать многообразные результаты испытаний.

Конечно анализ, данный выше, вполне небесспорен, а перечень и классификация терминов далеко не полны. Поэтому данную работу можно рассматривать как дискуссионную. Но именно через дискуссию вырабатывается общепринятое мнение.

Выводы. 1. При разработке нового направления в науке всегда есть искушение предложить новый термин для его описания. Но обычно восприятие нового термина неоднозначно и затруднительно особенно если он является не очень удачным. Более правильный подход — разумное использование устоявшегося (понятного и распространенного) термина, например, в сочетаниях с другими (традиционными) словами. Именно так случилось с понятием *усталости* материалов и элементов конструкций; что касается термина *трибофатика*, то надо признать, что на русском языке он «приживался» трудно из-за того, что слово *фатика*, будучи калькой, не вполне понятно «русскому слуху». А вот на английском языке этот термин был принят специалистами сразу, ибо он содержит традиционные понятия *Tribo* и *Fatigue*. Заметим, однако, тонкость в написании обобщенного термина на английском языке. Нельзя писать *tribo-fatigue*, ибо это всего лишь *трибоусталость*, т. е. *усталость при трении*, а надо писать *Tribo-Fatigue*, ибо это и есть обобщение (комплексное объединение) двух дисциплин.

2. Подчеркнем: понятие *усталости* оказалось *фундаментальным* в науке, и это случилось потому, что оно отражает *фундаментальное явление* применительно к жизни человека и существованию объектов природы.

Список литературы

1. Wohler, A. Versuche zur Ermittlung der auf die Eisenbahnwagensachsen einwirkenden Kräfte und die Widerstandsfähigkeit der Wagen-Achsen. Zeitschrift für Bauwesen. — 1860. — X. — 583–616 pp.
2. Poncelet J.V. Introduction a la Mecanique Industrielle, Physique ou Experimentale. Zweite Ausgabe. Paris, Imprimerie de Gauthier-villars. — 1839.
3. Sosnovskiy, L.A. Evolution of ideas on fatigue of metals by volume loading and friction / L.A. Sosnovskiy, N.A. Makhutov, V.T. Troshchenko // Тр. VI Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт.—1 нояб. 2010 г., Минск / редкол.: М.А. Журавков (пред.) [и др.]. — Минск: БГУ, 2010. — Т. 1. — С. 77–84.
4. Schutz, W. A History of Fatigue / W. Schutz // Engineering Fracture Mechanics. — 1996. — 54. — Pp. 263–300.
5. Duncan Dowson. History of Tribology, Second Edition, Professional Engineering Publishing, 1997. — ISBN 1-86058-070-X.
6. Трибофатика. Трыбафатыка. Tribo-Fatigue. Tribo-Ermdung: четырехязычный терминологич. словарь / авт.-сост.: П.В. Андронов, В.А. Бабушкина, А.В. Богданович, С.С. Городецкий, А.И. Подлужный, Р.С. Сосновская, Л.А. Сосновский; под ред. Л.А. Сосновского. — Минск-Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», 1996. — 138 с.
7. ГОСТ 30638—99. Трибофатика. Термины и определения: межгос. стандарт. — Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. — 17 с.
8. Сосновский Л.А. О принципах разработки стандарта Беларуси СТБ «Трибофатика. Термины и определения» // Трибофатика-95: Ежегодник / под общ. ред. Л.А. Сосновского. — Вып. 2: Вопросы стандартизации. Хроника / под ред. В.Н. Корешкова. — Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», 1996. — С. 8–26.
9. Gough, H.J. The fatigue of metal / H.J. Gough. — London, 1926. — 304 p.
10. Fairbrain, W. Experiments to determine the effect of impact, vibratory action and long continued changes of load of wrought iron girders / W. Fairbrain // Phil. Trans. R. Soc. — 154, 311–325 (1864).
11. Hele-Show, H.S. Human endurance curves / H.S. Hele-Show // Proc. Inst. Mech. Eng. — oct.1911. — Pts. III and IV.
12. Сосновский, Л.А. Трибофатика: о диалектике жизни / Л.А. Сосновский. — 2-ое изд. — Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», 1999. — 116 с.
13. Сосновский, Л.А. О полной кривой усталости / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов // Заводская лаборатория. — 1995. — № 5. — С. 33–34.
14. Сосновский, Л.А. Механика усталостного разрушения: словарь-справ. / Л.А. Сосновский. — Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», 1994. — Т. 1. — 328 с.; Т. 2. — 340 с.
15. Прочность материалов и конструкций: серия моногр. / под общ. редакцией В.Т. Трошенко. — Т. 2. Усталость металлов. Влияние состояния поверхности и контактного взаимодействия. — Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2009. — 664 с.
16. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.
17. Основы трибологии / А.В. Чичинадзе [и др.]; под ред. А.В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 2001. — 663 с.
18. 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.
19. Эрозия / под ред. К. Прис. — М.: Мир, 1982. — 464 с.
20. Сосновский, Л.А. Радиационное повреждение / Л.А. Сосновский // Сопrotивление материалов деформированию и разрушению / под ред. В.Т. Трошенко. — Т. 2. — Киев: Наук. думка, 1994. — С. 302–327.
21. Жарин, А.Л. Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии / А.Л. Жарин. — Минск: Бестпринт, 1996. — 235 с.
22. Сосновский, Л.А. О построении кривой фрикционной усталости / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов, А.В. Марченко // Заводская лаборатория. — 1998. — № 12. — С. 36–39.
23. Сосновский, Л.А. Фрикционная усталость полимера при трении по стали / Л.А. Сосновский, А.В. Марченко // Проблемы прочности. — 2001. — № 1. — С. 48–61.
24. Сосновский, Л.А. Основы трибофатике / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2003. — Т. 1. — 246 с.; Т. 2. — 234 с.
25. Износоусталостные повреждения и их прогнозирование (трибофатика) / Л.А. Сосновский [и др.]. — Гомель, Киев, Москва, Ухань, 2001. — 170 с.
26. Sosnovskiy, L.A. Tribo-Fatigue. Wear-fatigue damage and its prediction (Foundations of engineering mechanics) / L.A. Sosnovskiy. — Springer, 2005. — 424 p.
27. Трибофатика: новые идеи в перспективном направлении / К.В. Фролов. — Гомель: БелИИЖТ, 1990. — 7 с.
28. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2007. — 434 с.
29. Waterhouse, R.B. Fretting Corrosion / R.B. Waterhouse. — New-York: Pergamon Press, 1972.
30. Hills, D.A. Mechanics of Fretting Fatigue / D.A. Hills, D. Nowell. — Springer, 2010.
31. SI-series machines for wear-fatigue tests. — Минск, 2009. — 62 с.

SOSNOVSKIY Leonid A., Dr. Techn. Sc., Professor
 Professor of the Department “Dynamics, Strength and Durability of Vehicles”
 Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

Received 18 July 2013.

ABOUT DEVELOPMENT OF REPRESENTATIONS ABOUT FATIGUE OF METALS AT VOLUME AND SURFACE (CONTACT) DEFORMATION

Concept development about fatigue of metals in communication of its integrated characteristic — curve of fatigue is described at volume deformation (and destruction), surface damage (and wear) at contact loading and complex wear-fatigue damage and destruction to a case when one of elements of pair a friction perceives and transfers repeatedly-variable (volume) loading. It is shown that concept fatigue — fundamental and beyond all bounds wide; it is successfully used for terminology construction in the mechanic of fatigue destruction, tribology, tribo-fatigue.

Keywords: fatigue, volume deformation, surface deformation, mechanical fatigue, rolling fatigue, friction fatigue, fatigue curve, diagram of limiting states, wear-fatigue damage

References

1. Wohler A.. Versuche zur Ermittlung der auf die Eisenbahnwagensachsen einwirkenden Kräfte und die Widerstandsfähigkeit der Wagen-Achsen. *Zeitschrift für Bauwesen*, 1860, vol. X, pp. 583–616.
2. Poncelet J.V. *Introduction à la Mécanique Industrielle, Physique ou Experimentale*. Zweite Ausgabe. Paris, Imprimerie de Gauthier-villars, 1839.
3. Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A., Troshchenko V.T. Evolution of ideas on fatigue of metals by volume loading and friction. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo simpoziuma po tribofatike* [Proc. of VI International Symposium on Tribo-Fatigue (ISTF 2010)]. Minsk, 2010, vol. 1, pp. 77–84.
4. Schütz W. A History of Fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*, 1996, pp. 263–300.
5. Duncan Dowson. *History of Tribology*. Professional Engineering Publishing, 1997.
6. Andronov P.V. [et al.], Sosnovskiy L.A. ed. *Tribofatika* [Tribo-fatigue]. Minsk–Gomel, 1996. 138 p.
7. *GOST 30638–99. Tribofatika. Terminy i opredeleniya: mezhgos. standart* [State Standard 30638–99. Tribo-Fatigue. Terms and definitions (Interstate Standard)]. Minsk, 1999. 17 p.
8. Sosnovskiy L.A. O principah razrabotki standartar Belarusi STB “Tribofatika. Terminy i opredeleniya” [On the principles of development of the standard of Belarus STB “Tribo-Fatigue. Terms and definitions”]. *Tribofatika-95: Ezhegodnik* [Tribo-Fatigue-95: Annual]. Gomel, 1996, pp. 8–26.
9. Gough H.J. *The fatigue of metal*. London, 1926. 304 p.
10. Fairbairn W. Experiments to determine the effect of impact, vibratory action and long continued changes of load of wrought iron girders. *Phil. Trans. R. Soc.*, 1864, 311–325.
11. Hele-Show H.S. Human endurance curves. *Proc. Inst. Mech. Eng.*, vols. III–IV, 1911.
12. Sosnovskiy L.A. *Tribofatika: o dialekte zhizni* [Tribo-Fatigue: about the dialectics of life]. Gomel, 1999. 116 p.
13. Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A. *O polnoj krivoj ustalosti* [About full fatigue curve]. *Zavodskaja laboratorija* [Industrial Laboratory], 1995, no. 5, pp. 33–34.
14. Sosnovskiy L.A. *Mehanika ustalostnogo razrusheniya* [The mechanics of fatigue fracture]. Gomel, 1994, vol. 1. 328 p., vol. 2. 340 p.
15. Troshchenko V.T. ed. *Ustalost' metallov. Vlijanie sostojanija poverhnosti i kontaktного vzaimodejstviya* [Metal fatigue. Influence of surface condition and contact interaction]. *Prochnost' materialov i konstrukcij: serija monogr.* [Strength of Materials and Structures: Monograph Series]. Kiev, vol. 2, 2009. 664 p.
16. Kragelsky I.V., Dobychin M.N., Komalov V.S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos* [The basis of calculation for friction and wear]. Moscow, 1977. 526 p.
17. Chichinadze A.V. ed. *Osnovy tribologii* [Fundamentals of tribology]. Moscow, 2001. 663 p.
18. 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.
19. Preece K. ed. *Jerozija* [Erosion]. Moscow, 1982. 464 p.
20. Sosnovskiy L.A. *Radiacionnoe povrezhdenie* [Radiation damage]. *Soprotivlenie materialov deformirovaniyu i razrusheniju* [Resistance materials deformation and destruction]. Kiev, 1994, vol. 2, pp. 302–327.
21. Zharin A.L. *Metod kontaktnoj raznosti potencialov i ego primenenie v tribologii* [Contact potential difference method and its application in tribology]. Minsk, 1996. 235 p.
22. Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A., Marchenko A.V. O postroenii krivoj frikcionnoj ustalosti [On the construction of the curve friction fatigue]. *Zavodskaja laboratorija* [Factory Laboratory], 1998, no. 12, pp. 36–39.
23. Sosnovskiy L.A., Marchenko A.V. *Frikcionnaja ustalost' polimera pri trenii po stali* [Friction fatigue polymer in friction against steel]. *Problemy prochnosti* [Strength of Materials], 2001, no. 1, pp. 48–61.
24. Sosnovskiy L.A. *Osnovy tribofatiki* [Fundamentals of Tribo-Fatigue]. Gomel, 2003, vol. 1. 246 p., vol. 2. 234 p.
25. Sosnovskiy L.A. ed. *Iznosustalostnyye povrezhdeniya i ih prognozirovanie (tribofatika)* [Wear-fatigue damage and forecasting (Tribo-Fatigue)]. Gomel, Kiev, Moscow, Uhan, 2001. 170 p.
26. Sosnovskiy L.A. *Tribo-Fatigue. Wear-fatigue damage and its prediction (Foundations of engineering mechanics)*. Springer, 2005. 424 p.
27. Frolov K.V., Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A., Drozdov Yu.N. *Tribofatika: novye idei v perspektivnom napravlenii* [Tribo-Fatigue: new ideas in promising direction]. Gomel, 1990. 7 p.
28. Sosnovskiy L.A. *Mehanika iznosustalostnogo povrezhdeniya* [Mechanics of wear-fatigue damage]. Gomel, 2007. 434 p.
29. Waterhouse R.B. *Fretting Corrosion*. New-York, Pergamon Press, 1972.
30. Hills D.A., Nowell D. *Mechanics of Fretting Fatigue*. Springer, 2010.
31. *SI-series machines for wear-fatigue tests*. Minsk, 2009. 62 p.