

**О РАЗВИТИИ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛОВ****Л.А. Сосновский****DEVELOPMENT OF THE CONCEPTS ABOUT THE FATIGUE OF METALS****L. A. Sosnovskiy***ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Гомель, Беларусь*

В 2006 году исполнилось 146 лет с тех пор, как А. Wohler (Вёлер) начал публикацию знаменитой ныне серии работ (1860–1870 г.г.) по усталости металлов. А за 12 лет до этого Понселе впервые употребил обыденное слово *fatigue* (усталость) для объяснения невероятных 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 чистых 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, мне, как и всем, не известно. Но мне показалось небезынтесным затронуть эту тему на XIII международном коллоквиуме по механической усталости – в кругу специалистов. 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 называют во многих странах мира – но, к сожалению, неофициально).

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», – это *обобщение* исследуемого понятия, «далекого от идеала, слишком неопределенного и неясного», но тем не менее «общепринятого», «широко распространенного» – дал Н. J. Gough (Г. Дж. Гаф) в 1926 г. [1]. 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 г.) 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 рис.1 дана сводка-классификация понятий, использующих термин *усталость* [2, 3]; в указанных работах можно найти их обоснование и пояснение. Мы не будем здесь все это повторять – достаточно изучить рис.1, чтобы прийти 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 г. [4] и *кривые усталости сообщества людей* [5], построенные мною в 1989 г. Ниже анализ основной интегральной характеристики сопротивления усталости – кривой усталости будет базироваться на трех блоках терминов, представленных на рис.1: 1) объемное разрушение, 2) поверхностное повреждение и 3) комплексное износоусталостное повреждение и разрушение.



Рис.1. Трибофатика как комплексная дисциплина

**1. 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 [1].

... «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 100000 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.

Таблица 1. Основные виды износоусталостного повреждения

Типичная силовая система	Комплексное повреждение и разрушение	Определение	Место реализации в системе колесо/рельс
Шейка коленчатого вала / шатунная головка с подшипником скольжения	Фрикционно-механическая усталость	Износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и трения скольжения	В зоне взаимодействия гребня колеса с боковой поверхностью головки рельса
Колесо / железнодорожный рельс	Контактно-механическая усталость	Износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и трения качения (трения качения с проскальзыванием)	В зоне взаимодействия колеса с головкой рельса на дорожке качения
Шлицевой вал / втулка	Фреттинг-усталость	Износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и фреттинга	В зоне взаимодействия подошвы рельса с подрельсовым основанием
Вал гребного винта / морская вода	Коррозионно-механическая усталость	Усталость материала при одновременном воздействии повторно-переменных напряжений и коррозионной среды	В зонах взаимодействия с окружающей средой (атмосфера, гидросфера, геосфера)
Лопатки турбины / поток жидкости или газа, несущий твердые частицы	Эрозионно-механическая усталость	Износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и эрозии	
Трубы нефтепровода	Коррозионно-эрозионная усталость	Износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений коррозии и эрозии	

В 1860–1861 гг. Вильям Фэрберн 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 миллиона повторений нагрузки в 3 т были недостаточны, чтобы

произвести разрушение. В то же время, если прилагалась бóльшая 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 12000000 повторений нагрузки соответствует 328 годам жизни моста, если предполагать 100 повторений в день».

В этом отрывке описано многое из табл.1: и *механическая усталость*, и *ударная усталость*; и то, что мы сегодня называем *малоцикловая усталость*, *многоцикловая усталость*; здесь же обнаруживаются подходы и к *квазистатической усталости*, а также к *высокоресурсной усталости*, или *гигаусталости*. Мы с сожалением опустим здесь историю поиска формы кривых усталости в разных областях по числу циклов до разрушения, предпринимавшиеся многими исследователями в разное время; мы не приведем здесь даже первых кривых механической, ударной, ударно-механической, термической, термомеханической усталости – это завело бы нас слишком далеко и привело бы к книге, но не статье. Мы обратимся лишь к обобщенной характеристике сопротивления механической усталости [2, 3, 6] – ее называют *полной кривой усталости*, поскольку ее строят во всем интервале возможного изменения определяющих параметров:  $0 \leq \sigma \leq \sigma_b$  МПа и  $1 \leq N_\sigma \leq \sim 10^{10}$  циклов (рис.2).

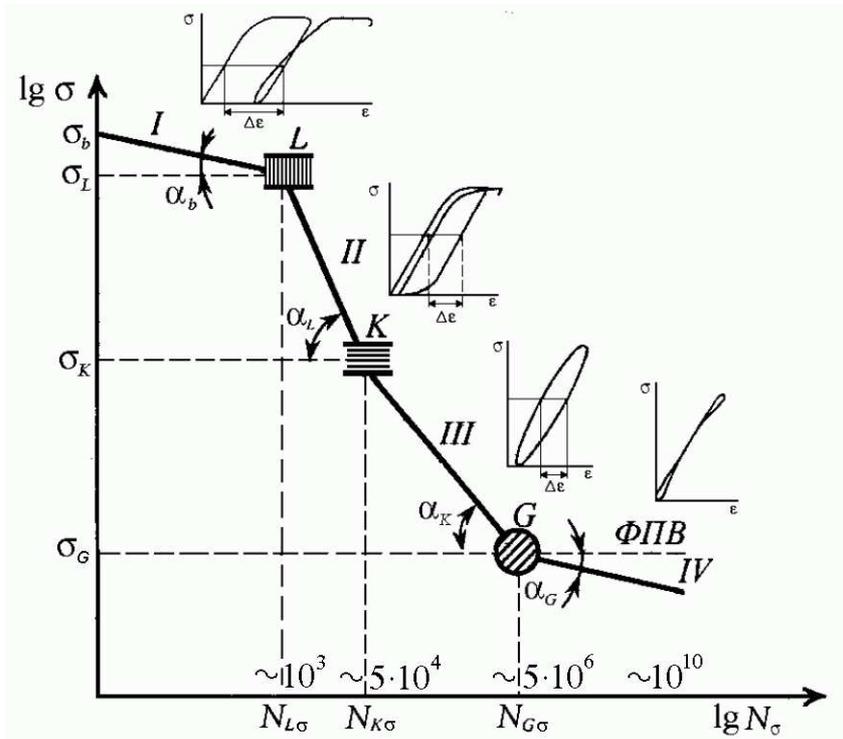


Рис.2. Схема полной кривой механической усталости

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 *предельных напряжений* и *долговечностей* (*предел квазистатической усталости*  $\sigma_L, N_{L\sigma}$ ; *предел малоцикловой усталости*  $\sigma_K, N_{K\sigma}$ ; *предел многоцикловой усталости*  $\sigma_G, N_{G\sigma}$ ); наклон участков I, II, III, IV к оси абсцисс характеризуется соответствующим углом  $\alpha$ , котангенс которого называют *параметром наклона кривой усталости*. Особенность и главное достоинство схематизации полной кривой усталости, представленной на рис.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 параметр объемного усталостного разрушения: большая (квазистатическая) пластическая деформация (I), упругопластическая деформация (II), микропластичность (III) и нанопластичность (IV).

Мы еще раз и особо подчеркнем тот удивительный факт, что понятие (и термин) усталость сделали применимым по существу для всех условий повторно-переменного нагружения и разрушения – каков бы ни был физический механизм повреждения. Поэтому не удивительно, что термин этот крепчал и ширился – появилась *случайная усталость, усталость при жестком нагружении* и т. д.

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

Удивительно, но факт: многие десятилетия трибологии разрабатывали различные теории изнашивания (см., например, [7, 8]), но только в начале 40-х годов прошлого века, как уже отмечалось, появилась усталостная теория. А между тем совершенно очевидно (рис.3) [14]: движение всякого индентора, 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; *б)* поверхностная усталость обычно сопровождается многообразными физико-химическими явлениями, поскольку между трущимися элементами образуется активное третье тело (смазка); *в)* контактное циклическое взаимодействие реализуется и при ударе твердых частиц, жидких капель; потоков жидкости и газа, несущих твердые частицы; при воздействии излучений различной природы. 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.

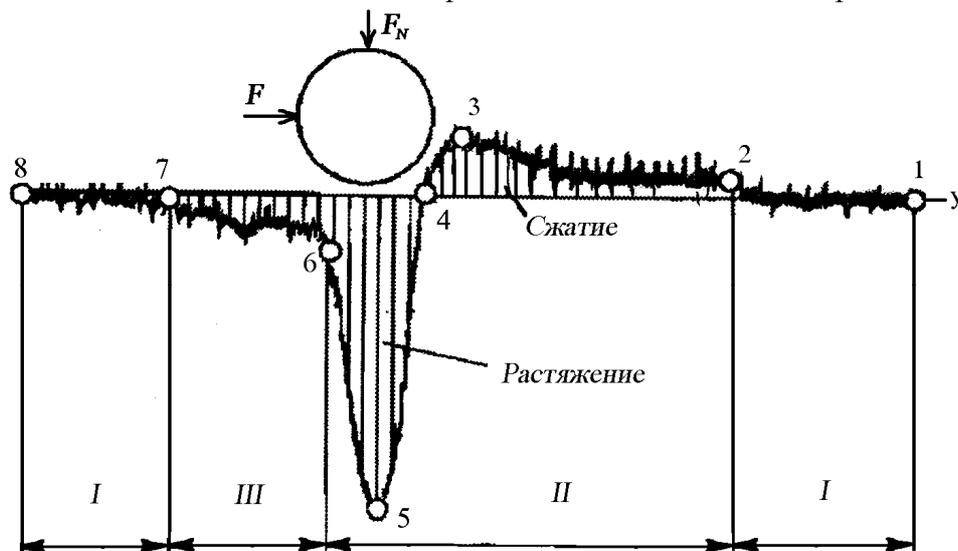


Рис.3. Осциллограмма перемещений поверхности полимерного материала при скольжении по нему металлического индентора

Мы опять пропустим большую историю: кто, когда и какую впервые построил кривую поверхностной усталости. На рис.4 представлена первая почти полная кривая фрикционной усталости, построенная экспериментально [9, 10]. Она имеет такие же характерные участки, как и кривая объемной усталости (ср. с рис.2), но естественно, что интерпретация наблюдаемых участков поверхностного повреждения должна быть иной, своеобразной. Она дана на рис.5; 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. [7, 8]).

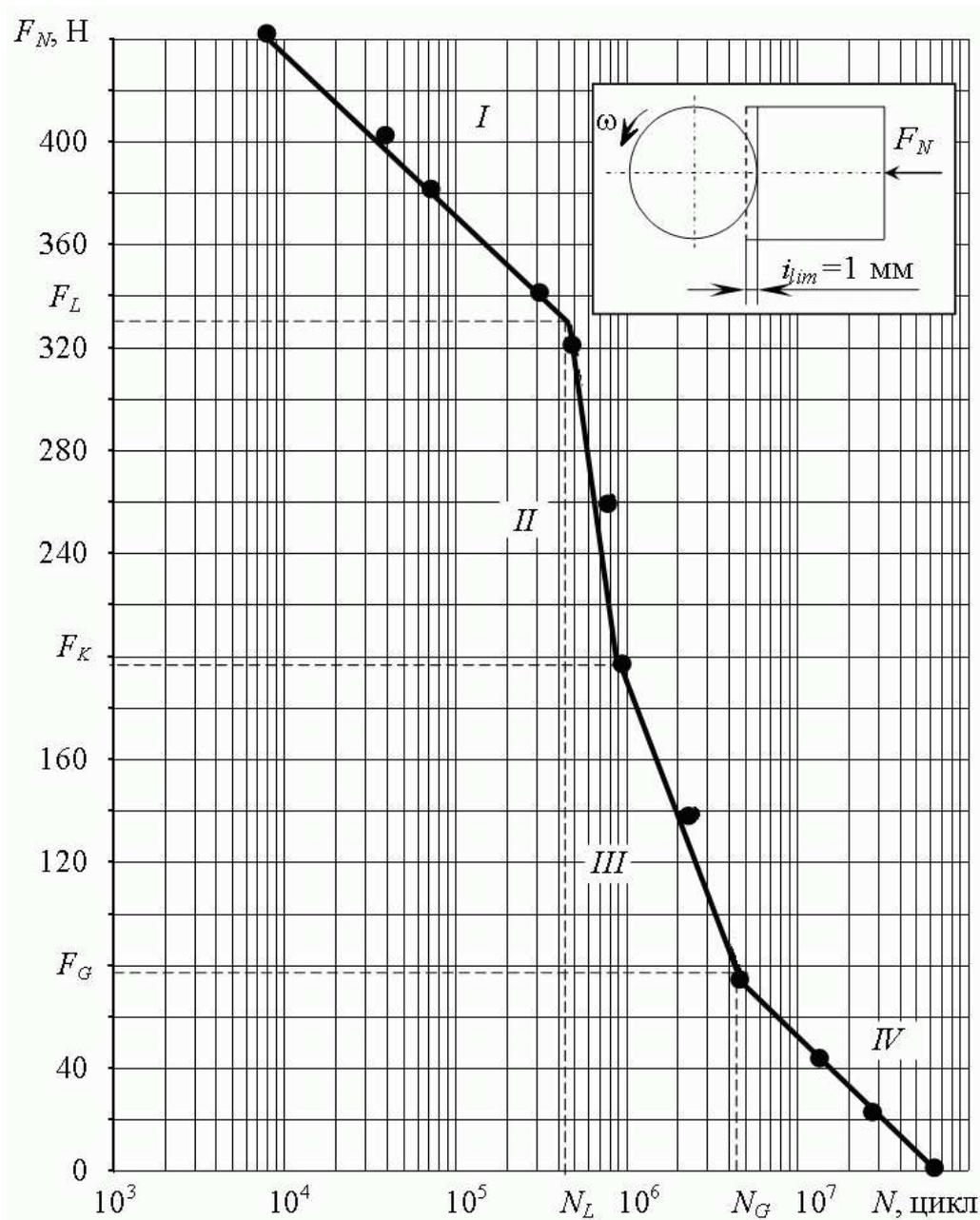


Рис.4. Кривая фрикционной усталости для трибосопряжения  
сталь 45 / полимер Ф4-ВМ

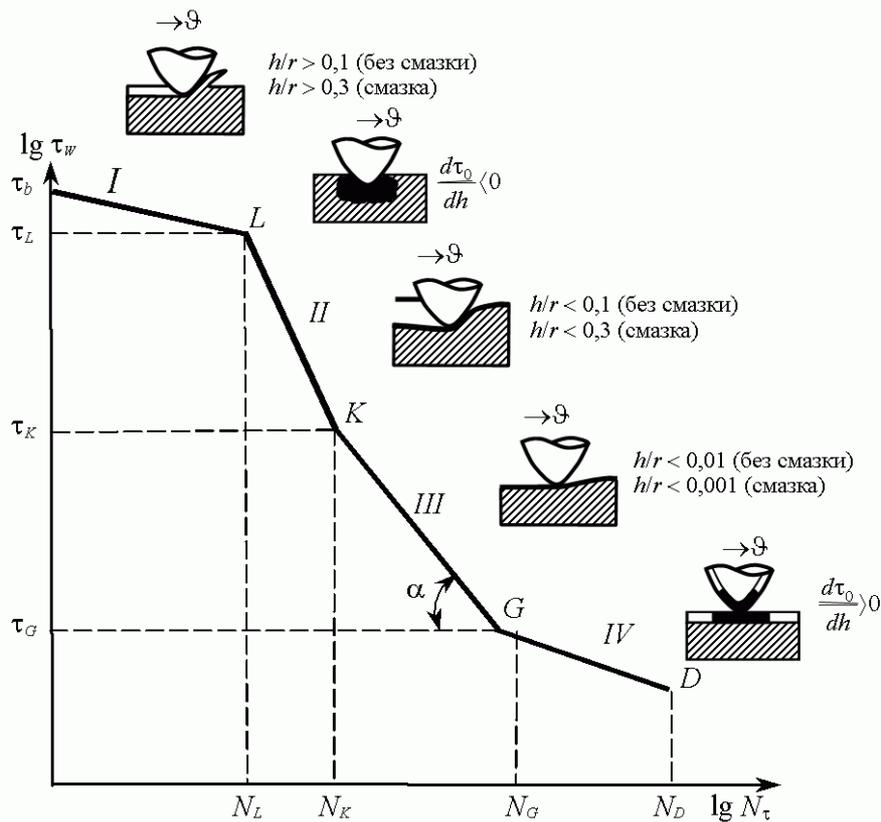


Рис.5. Схема полной кривой фрикционной усталости

Основные виды повреждения при трении схематически иллюстрируют движение (со скоростью  $\vartheta$ ) 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  $\tau_b$ . *Пластическое оттеснение* (II) происходит при напряжениях  $\tau_L > \tau_w > \tau_K$  (величина  $\tau_K$  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 ( $\tau_0$ ) в поверхностном слое будет отрицательным:  $d\tau_0/dh < 0$ . *Упругое оттеснение* (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 преимущественному виду изнашивания (разрушения при трении) контролируют *предельные напряжения*  $\tau_L$ ,  $\tau_K$ ,  $\tau_G$ , которым соответствуют долговечности по износу  $N_{L\tau}$ ,  $N_{K\tau}$ ,  $N_{G\tau}$ .

Как видно, на полной кривой фрикционной усталости (см. рис.5) обнаруживаются характеристики сопротивления фрикционной усталости, совершенно аналогичные тем, которые мы видели на рис.2. На рис.5, 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  $\alpha$  отдельных

участков. Заметим: нагрузочным параметром на рисунке 4 является контактная нагрузка  $F_N$ , а на рис.5 – удельная сила трения (фрикционное напряжение)  $\tau_w = fF_N$ ,  $f$  – коэффициент трения. И еще: если на кривой механической усталости (см. рис. 2) усталостная долговечность  $N_\sigma$  соответствует числу циклов до разрушения образца на части, то на кривой фрикционной усталости (см. рис.4 и 5) износостойкая долговечность  $N_\tau$  соответствует достижению износом некоторой (наперед заданной) критической величины (на рис.4 это  $i_{lim} = 1000$  мкм). Аналогично поступают и при построении кривой механической усталости, когда предельное состояние определяется некоторым критическим значением длины магистральной усталостной трещины (равной, например, 1 мм).

Если обратиться к литературе по трибологии, нетрудно установить, что полные кривые при контактной, эрозионной и т. д. усталости отсутствуют вообще, а их частные виды в ограниченной (например, многоциклового) области крайне редки даже в литературе начала XXI века. Можно, однако, полагать, что ситуация скоро изменится; во всяком случае, на мировом трибологическом конгрессе (WTC III, Вашингтон, 2005) впервые была организована секция «Усталость и износ», а ученые-трибологи «увеличивают» долю усталостного износа (по сравнению с другими видами износа) до 30–60 %.

**3. Износоусталостное повреждение и разрушение.** Основные типы комплексного (*износоусталостного*) повреждения и разрушения установлены в *трибофатике* [11–13] и включены в межгосударственный стандарт [2]; они повторены также на рис.1. Примеры их реализации даны в табл.1. А для построения соответствующих кривых усталости испытывают *силовые системы*: по существу, это пара трения, один из элементов которой подвергается объемному циклическому нагружению. И тогда получается, что для анализа комплексных повреждений следует строить по меньшей мере четыре кривых усталости (рис.6): 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) эффектов. В этой связи возникает необходимость, кроме обычных характеристик, дополнительно ввести коэффициенты прямого ( $K_D = \sigma_{-1} / \sigma_{-1p}$ ) и обратного ( $K_B = p_f / p_{fs}$ ) эффектов. Сводка всех параметров, определяемых по экспериментальным данным, представленным на рис.6, дана в табл.2. 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 *диаграмму предельных состояний силовых систем* (рис.7), на которой ось абсцисс является трибологической шкалой, а ось ординат – прочностной шкалой. Точки  $\sigma_{-1}$  и  $\tau_f$  – важнейшие характеристики объемной и поверхностной усталости, а кривые характеризуют комплексное износоусталостное повреждение и разрушение ( $p_{fs}$  и  $\sigma_{-1p}$ ). 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 износостойкости, тогда как процессы механической усталости являются сопутствующими.

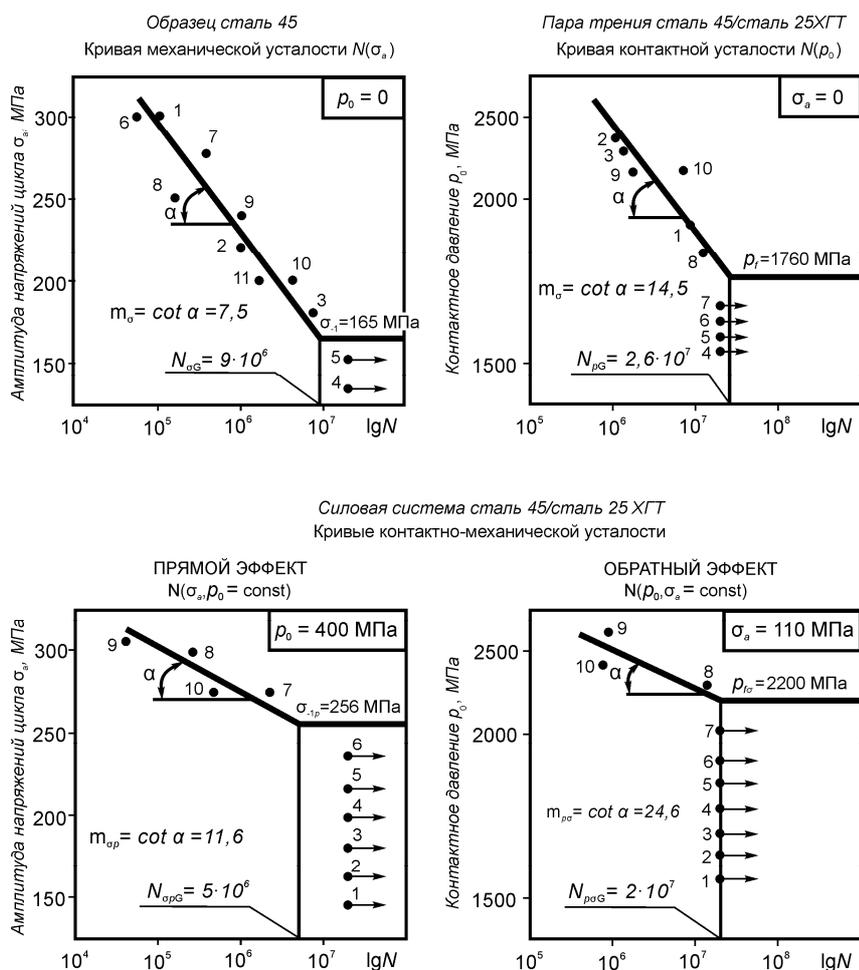


Рис.6. К определению основных характеристик износусталостного повреждения (номер точки указывает последовательность испытаний)

Таблица 2. 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	$m_\sigma = 7,5$	$m_p = 14,5$	$m_{\sigma p} = 11,6$	$m_{ps} = 24,6$
Коэффициент прямого эффекта	—	—	$K_D = 1,62$	—
Коэффициент обратного эффекта	—	—	—	$K_B = 1,25$

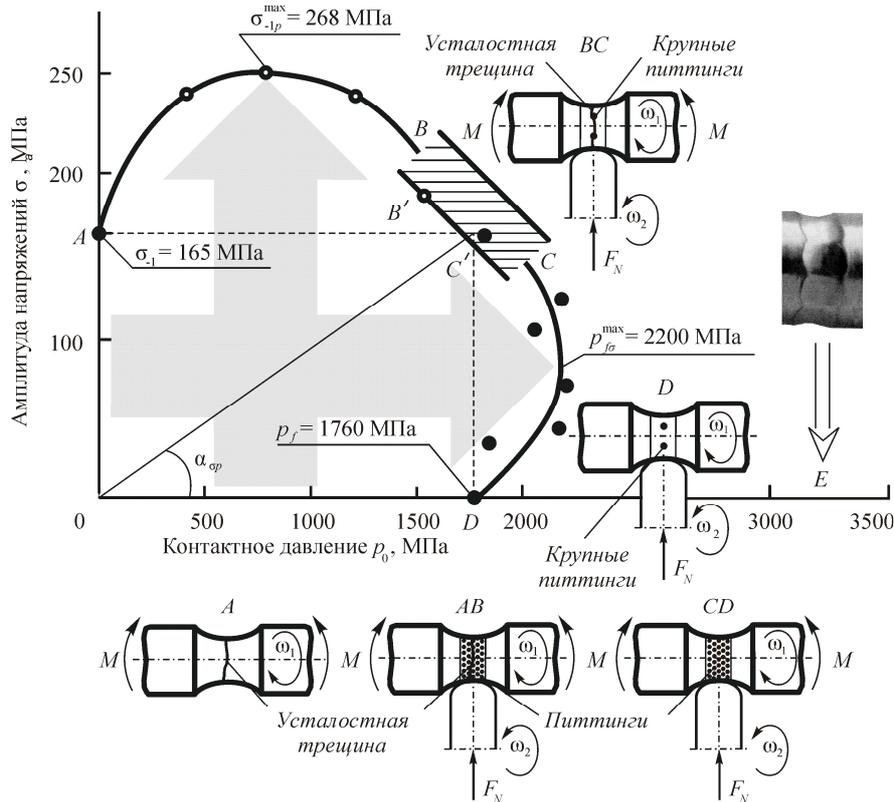


Рис.7. Диаграмма предельных состояний силовой системы при контактно-механической усталости

К настоящему времени получено крайне ограниченное количество кривых *контактно-механической* и *фрикционно-механической усталости*; известно огромное количество кривых *фреттинг-усталости* при реализации прямого эффекта, тогда как для случая обратного эффекта они отсутствуют. Короче говоря, экспериментальные исследования в области трибофатики следует интенсифицировать; впереди – большой фронт увлекательных и полезных исследований. Добавим: к настоящему времени не известно ни одной полной кривой износоусталостного повреждения и разрушения.

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 силовая система.

Конечно, позиция, изложенная выше, неоспорна, а перечень и классификация терминов – далеко не полны. Поэтому данную работу следует рассматривать как дискуссионную. Но именно через дискуссии вырабатывается общепринятое мнение.

### Литература

1. Н.Г. Gough. The fatigue of metal. –London, 1926. –304 p.
2. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 30638–99. Трибофатика. Термины и определения. – Минск: Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. –17 с.
3. Сосновский Л. А. О принципах разработки стандарта Беларуси СТБ "Трибофатика. Термины и определения" // Трибофатика-95: Ежегодник. Под общей ред. Л.А. Сосновского / Вып.2: Вопросы стандартизации. Хроника. Под ред. В.Н. Корешкова. –Гомель: НПО "ТРИБОФАТИКА", 1996. –С.8-26.

4. Hele-Show H.S. Human endurance curves/Proc. Inst. Mech. Eng., Pts. III and IV, oct.1911.
5. Сосновский Л. А. Трибофатика: о диалектике жизни. Изд. 2-ое. –Гомель: НПО ТРИБОФАТИКА, 1999. –116 с.
6. Сосновский Л.А., Махутов Н.А. О полной кривой усталости // Заводская лаборатория. – 1995. –№ 5. –С.33-34.
7. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. –М.: Машиностроение, 1977. –526 с.
8. Основы трибологии. Под ред. А.В.Чичинадзе / Авт.: А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун и др. –М.: Машиностроение, 2001. –663 с.
9. Сосновский Л.А., Махутов Н.А., Марченко А.В. О построении кривой фрикционной усталости // Заводская лаборатория. –1998. –№ 12. –С.36-39.
10. Сосновский Л.А., Марченко А.В. Фрикционная усталость полимера при трении по стали // Проблемы прочности. –2001. –№ 1. –С.48-61.
11. Износоусталостные повреждения и их прогнозирование (трибофатика). Научный редактор Сосновский Л.А. / Авт.: Л.А.Сосновский, В.Т. Трощенко, Н.А. Махутов, Гао Ван-Чжэн, А.В. Богданович, С.С. Щербаков. – Гомель, Киев, Москва, Ухань, 2001. –170 с.
12. Сосновский Л.А. Основы трибофатики. –Гомель: БелГУТ, 2003. –Т.1. –246 с., –Т.2. –234 с.
13. Sosnovskiy L.A. Tribo-Fatigue. Wear-fatigue damage and its prediction (Foundations of engineering mechanics). –Springer, 2005. –424 p.
14. Сысоев П.В., Богданович П.Н., Лизарев А.Д. Деформация и износ полимеров при трении. – Мн.: Наука и техника, 1985. –239 с.