

УДК 371.31

*В. И. СЕНЬКО, доктор технических наук, Л. А. СОСНОВСКИЙ, доктор технических наук, А. В. ПУТЯТО, доктор технических наук, В. В. КОМИССАРОВ, кандидат технических наук, Е. С. ТАРАНОВА, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, С. С. ЩЕРБАКОВ, доктор физико-математических наук, А. В. БОГДАНОВИЧ, доктор технических наук, Белорусский государственный университет, Минск, В. Б. ПОПОВ, кандидат технических наук, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь*

## ДВАДЦАТИЛЕТНИЙ ОПЫТ ПРЕПОДАВАНИЯ КУРСА «ОСНОВЫ ТРИБОФАТИКИ»

Обобщается многолетний опыт преподавания трибофатики в трех университетах Республики Беларусь. Изложение студентам достижений трибофатики в рамках учебной дисциплины способствовало повышению общего уровня подготовки инженеров-механиков в Белорусском государственном университете транспорта, Белорусском государственном университете, Гомельском государственном техническом университете им. П. О. Сухого.

Характеристики объемной и/или поверхностной прочности, экспериментально определяемые на лабораторных образцах, оказываются, как правило, существенно завышенными: сопротивление разрушению соответствующих элементов конструкций либо механических систем в действительности может снижаться на 30–100 % и более. Общее объяснение этому факту состоит в том, что прочность материалов в конструкциях резко изменяется вследствие влияния комплекса конструктивных, технологических, металлургических и эксплуатационных факторов.

Проанализируем несколько конкретных примеров такого влияния.

Конструктивное исполнение механической системы способно изменять ее сопротивление усталости в широких пределах. Так, вал диаметром 30 мм, изготовленный из углеродистой стали ( $\sigma_b = 600$  МПа), имеет предел выносливости  $\sigma_{-1} = 260$  МПа. А механическое соединение того же вала с втулкой может привести к более чем двукратной потере сопротивления усталости (таблица 1), при этом шлицевое соединение оказывается наименее прочным, прессовое – наиболее работоспособным, а шпоночное соединение занимает промежуточное положение.

Таблица 1 – Влияние конструкции на сопротивление усталости

Изделие	Предел выносливости	
	МПа	%
Вал	260	100
Вал/втулка (стальная):		
прессовое соединение	156	~60
шпоночное    "	130	~50
шлицевое    "	117	~45

Металлургический фактор является не менее значимым. При переходе от углеродистой к высокопрочной стали обнаруживается более чем двукратное повышение предела выносливости вала, но сопротивление усталости соединения того же вала с втулкой дает лишь 20 %-ный прирост предела выносливости (таблица 2). Более того, при переходе от вала к системе вал/втулка предел выносливости снижается в 2 раза, если вал изготовлен из углеродистой стали ( $\sigma_b \approx 560$  МПа), и в 3,8 раза, если он изготовлен из высокопрочной стали ( $\sigma_b \approx 925$  МПа).

Один из технологических факторов – шероховатость поверхности позволяет изменить предел выносливости валов из легированной стали 40X примерно на 15 %.

Условия эксплуатации зачастую влияют на сопротивление усталости механических систем так же сильно, как и другие факторы. Если, например, соединение вал/втулка работает при различных контактных давлениях, это может привести к снижению предела выносливости на 15–20 % в случае использования для изготовления вала и втулки углеродистой или легированной стали (таблица 3).

Таблица 2 – Влияние материала на сопротивление усталости

Материал и его предел прочности	Изделие и его предел прочности		$K_f = \sigma_{-1}/\sigma_{-1P}$
	вал, $\sigma_{-1}$ , МПа	вал/втулка, $\sigma_{-1P}$ , МПа	
Высокопрочная сталь, $\sigma_b = 1100...750$ МПа	460	120	3,8
Легированная сталь, $\sigma_b = 700...1200$ МПа	300	110	2,7
Углеродистая сталь, $\sigma_b = 550...570$ МПа	200	100	2,0

Таблица 3 – Влияние контактного давления на сопротивление усталости

Материал вала и втулки, предел прочности	Контактное давление, МПа	$\sigma_{-1P}$	
		МПа	%
Углеродистая сталь, $\sigma_b = 520$ МПа	0	224	100
	0,6	155	69
	113	112	50
Легированная сталь, $\sigma_b = 520$ МПа	0	550	100
	10	310	56
	100	260	47

Износостойкость пары трения может изменяться на порядок и более в зависимости от вида трения и конструктивного ее исполнения.

Анализ этих и многочисленных других подобных примеров приводит к общему заключению: в таких случаях обнаруживается одна общая принципиальная особенность – кроме циклической нагрузки в соединениях *одно-временно* реализуется процесс трения в любых его проявлениях (фреттинг, скольжение, качение и др.). И именно сочетание двух повреждающих процессов, усталости и изнашивания, во многом обуславливает характер и усло-

вия *дополнительной* потери прочности материала в конструкциях. И действительно, специальные экспериментальные исследования показали, что, например, процессы трения скольжения приводят к уменьшению сопротивления усталости стальных валов на 20–40 % и более (в зависимости от условий работы). Это объясняют неблагоприятным влиянием трех факторов: 1) уменьшением сечения вала вследствие его износа; 2) образованием на поверхности трения многочисленных микроконцентраторов напряжений – рисок, питтингов и т. п.; 3) в случае многоопорных валов – неравномерным износом подшипников, что приводит к возбуждению колебаний системы.

Дальнейшее развитие исследований в этом направлении позволило установить, что одновременное сочетание повреждающих процессов трения, изнашивания и механической усталости в соединениях способно привести к неоднозначному результату: их сопротивление усталости и/или износостойкость может не только падать, но и, наоборот, существенно возрастать. Тем самым были обнаружены новые пути и возможности повышения эксплуатационной надежности наиболее ответственных и высоконагруженных механических систем машин и оборудования, для которых характерно *комплексное износосталостное повреждение*; они получили специальное название: *силовые системы* (ГОСТ 30638–99). Последние и стали предметом изучения для *трибофатики*, и тогда силовые системы стали называть трибофатическими.

Согласно ГОСТ 30638–99, трибофатика – «наука об износосталостных повреждениях и разрушении силовых систем машин и оборудования». Силовой называют всякую механическую систему, которая воспринимает и передает повторно-переменную рабочую нагрузку и в которой одновременно реализуется процесс трения в любых его проявлениях: при скольжении, качении, проскальзывании и т. д. (рисунок 1). Для силовых систем характерно комплексное – износосталостное повреждение (ИУП), обусловленное кинетическим взаимодействием явлений усталости, трения и изнашивания, эрозии, коррозии (таблица 4).

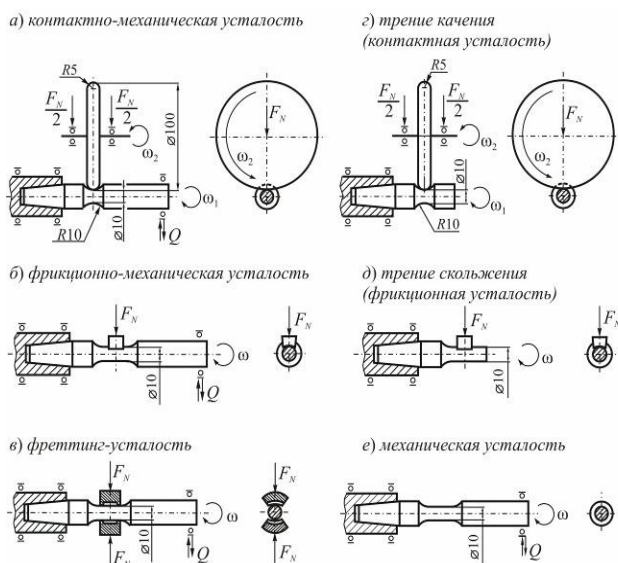


Рисунок 1 – Базовые схемы износосталостных испытаний

Посмотрим, как оценивается работоспособность конкретной механической системы, для которой характерно ИУП, практически.

Пусть мы имеем дело с механической системой *шатуна* (с полимерным подшипником скольжения) / *шейка стального коленчатого вала*. В трибологии эту систему рассматривают как обычную пару трения. Поскольку стальной вал при контакте с полимером не изнашивается, то оценивается (расчетным методом или экспериментально) износостойкость полимерного подшипника. Такую оценку можно выполнить, например, по схеме, представленной на рисунке 2 внизу. Если  $p$  – контактное давление, то в общем случае находят вероятность отказа  $F(p)$  по критериям износостойкости, за которые обычно принимают интенсивность изнашивания  $I(p)$  и/или долговечность по износу  $N(p)$ .

Таблица 4 – Основные виды износосталостного повреждения

Типичная силовая система	Комплексное повреждение и разрушение	Определение
Шейка коленчатого вала / шатунная головка с подшипником скольжения	Фрикционно-механическая усталость	Износосталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и трения скольжения
Колесо / железнодорожный рельс Зубчатые зацепления	Контактно-механическая усталость	Износосталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и трения качения (трения качения с проскальзыванием)
Шлицевой вал / втулка	Фреттинг-усталость	Износосталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и фреттинга
Вал гребного винта / морская вода	Коррозионно-механическая усталость	Усталость материала при одновременном воздействии повторно-переменных напряжений и коррозионной среды
Труба / поток нефти	Коррозионно-эрозионная усталость	Износосталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости, коррозии и эрозии

С точки зрения сопротивления материалов мы имеем элемент конструкции – шейку коленчатого вала (рисунок 2, сверху). Если  $\sigma$  – действующее циклическое напряжение, то в общем случае находят (расчетным методом или экспериментально) вероятность отказа  $F(\sigma)$  по критериям сопротивления усталости, за которые обычно принимают предел выносливости  $\sigma_{-1}$  и/или усталостную долговечность  $N(\sigma)$ .

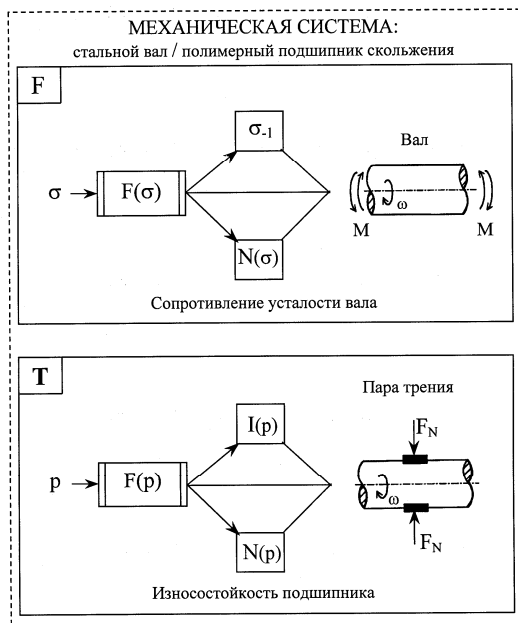


Рисунок 2 – Традиционный подход к расчету механической системы

Таким образом, при традиционной оценке надежности данной механической системы по отдельным критериям (либо по сопротивлению усталости, либо по износоустойчивости) принимается, что связь между ее элементами (шейка вала ↔ подшипник скольжения) или слаба (трибология: изучается только пара трения), или вовсе отсутствует (механика усталостного разрушения: изучается лишь отдельный элемент конструкции). В действительности же, с точки зрения трибофатики, в данном случае мы имеем дело с металл-полимерной силовой системой, которая работает в условиях фрикционно-механической усталости. Это означает, что между элементами системы имеет место силовое взаимодействие, обусловленное одновременным и совместным действием как контактного давления  $p$ , так и циклических напряжений  $\sigma$ , которые возбуждаются внеконтактными нагрузками. И тогда схема оценки работоспособности системы должна быть такой, как это представлено на рисунке 3.

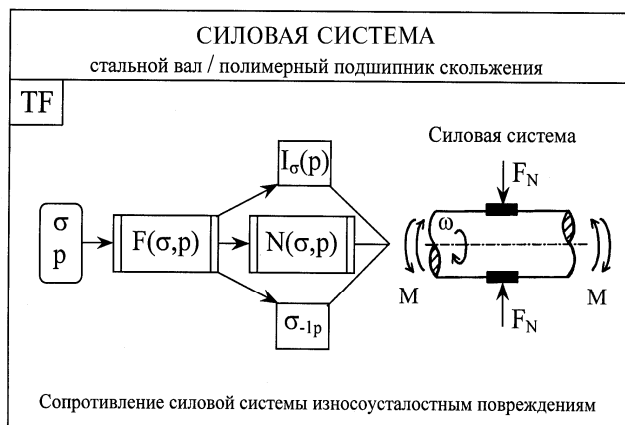


Рисунок 3 – К расчету силовой системы

Надежность силовой системы можно описать с помощью следующих комплексных показателей:  $F(\sigma, p)$  – вероятность отказа системы, обусловленная вероятностью отказа либо вала, либо подшипника, либо обоих

элементов одновременно;  $N(\sigma, p)$  – долговечность системы, обусловленная долговечностью либо вала, либо подшипника, либо обоих элементов одновременно;  $\sigma_{1p}$  – предел выносливости вала с учетом влияния процессов трения и изнашивания при действии контактного давления  $p$ ;  $I_\sigma(p)$  – интенсивность изнашивания подшипника при действии циклических напряжений  $\sigma$ .

Поскольку влияние процессов трения и изнашивания на изменение характеристик сопротивления усталости элементов системы вызывает прямой эффект, то ясно, что характеристика  $\sigma_{1p}$  количественно описывает этот эффект. Поскольку влияние циклических напряжений на изменение характеристик трения и изнашивания вызывает обратный эффект, то ясно, что характеристика  $I_\sigma(p)$  количественно описывает этот эффект.

Из рисунков 1 и 3 нетрудно видеть, что только силовая система действительно адекватна изучаемой реальной механической системе, тогда как пара трения или элемент конструкции представляют собой лишь ее частные схематизации. А показатели надежности изучаемого объекта, определяемые методами трибофатики, достаточно полно отражают реальные условия его работы, тогда как аналогичные показатели, определяемые методами трибологии или механики усталостного разрушения, описывают поведение данного объекта в идеализированных условиях.

Изложенное выше обобщено на рисунке 4. С одной стороны, теории трения, изнашивания, смазки были объединены в единую научную дисциплину – трибологию (Т). Это естественно, потому что в парах трения реально сочетаются и взаимодействуют процессы трения и изнашивания, в том числе и со смазкой.

С другой стороны, среди общих проблем динамики, прочности и устойчивости вычленилась механика усталостного разрушения (F) как дисциплина, имеющая особое практическое значение для современного машиностроения. Чтобы эффективно решать комплексные задачи надежности (R) наиболее ответственных – силовых систем машин и оборудования по важнейшим критериям работоспособности, потребовалось создать трибофатику (TF). На рисунке 4  $P(\sigma)$ ,  $P(\tau_w)$ ,  $P(\sigma, \tau_w, Ch)$  – вероятности отказа соответственно элемента конструкции, пары трения, силовой системы.

Выше мы описали обычный путь познания – от простого к сложному, или от анализа к синтезу. Для этого пути характерно взаимодействие отдельных (частных) наук и последующее возникновение более общей – комплексной науки.

Другой, более значимый путь познания: от общего – к частному: «Кто знает общее, тот знает все» (Аристотель). Обобщенные модели и методы, разрабатываемые в рамках трибофатики как комплексной науки, в частных случаях оказываются полезными как для наук, служивших ее основанием, так и для многих других дисциплин механического цикла, достижения которых так или иначе тоже были использованы при создании трибофатики. Этот путь указан на рисунке 4 сплошными линиями со стрелками, идущими от трибофатики. По существу, здесь мы имеем дело с трансдисциплинарными исследованиями (в том числе взаимодействия наук), которые характерны для начала XXI века.

Было показано, что результаты, полученные в трибофатике, обогащают многие разделы механики: механику деформируемого твердого тела, теорию упругости, прикладную механику, механику контактного взаимо-

действия, трибологию, механику усталостного разрушения и т.д. С другой стороны, развитие исследований в классических разделах механики служит источником новых идей для трибофатики. Кроме того, основополагающие идеи трибофатики дали толчок к развитию новых областей знания (как, например, механотермодинамики). Наконец, нельзя не отметить интерес к трибофатическим идеям гуманитарных наук, и прежде всего философии.

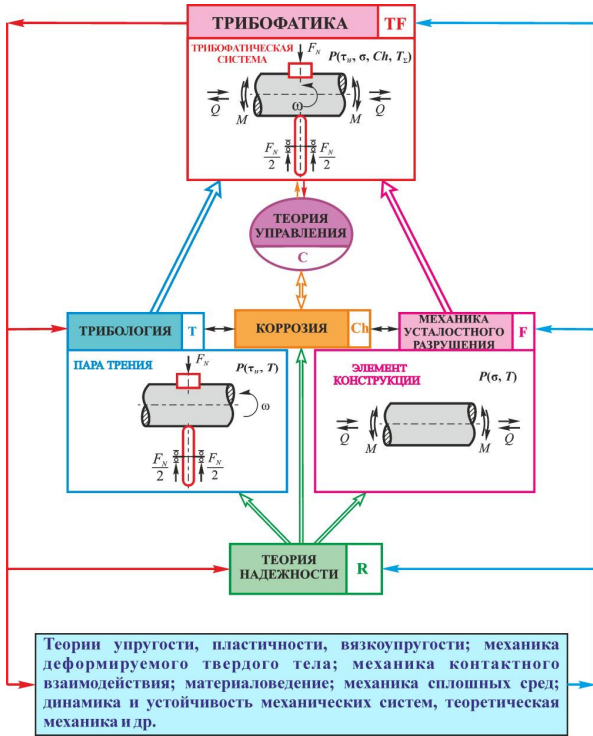


Рисунок 4 – Трибофатика как комплексная научная дисциплина

В таблице 5 дан сравнительный анализ методов исследования и расчета объектов, изучаемых в трибологии, механике усталостного разрушения и трибофатике.

Таблица 5 – Методы исследования объектов

Дисциплина	Объект для изучения	Основные методы исследования		Масштаб повреждения
		экспериментальные	теоретические	
<b>Т</b> (трибология)	Пара трения	Испытания на трение	Механика контактного взаимодействия	Поверхностное повреждение (износ, пitting и др.)
<b>Ф</b> (механика усталостного разрушения)	Элемент конструкции	Испытания на усталость	Механика деформирования и разрушения	Объемное (усталостное) разрушение
<b>TF</b> (трибофатика)	Силовая система	Изнасоусталостные испытания	Механика изнасоусталостного повреждения	Комплексное поверхностное повреждение и объемное разрушение

Обратимся сначала к экспериментальным методам.

Специалисты по механике усталостного разрушения разрабатывают и применяют методы и машины для испытания элементов конструкций в различных условиях циклического нагружения. Трибологи разрабатывают и применяют методы и машины для испытания пар трения в различных условиях контактного взаимодействия. А специалисты по трибофатике создают методы и машины для комплексных – изнасоусталостных испытаний моделей силовых систем. А разница вот в чем. На

машинах трения нельзя изучать сопротивление усталости элементов конструкций. На машинах для усталостных испытаний нельзя изучать процессы трения и изнашивания. А на машинах для изнасоусталостных испытаний (серии СИ) можно и должно изучать и то, и другое, но – и это главное – можно проводить комплексные испытания при любых сочетаниях циклических и контактных нагрузок, действующих одновременно (рисунки 1, 5–7). Естественно, что это позволяет получать принципиально новые экспериментальные результаты.

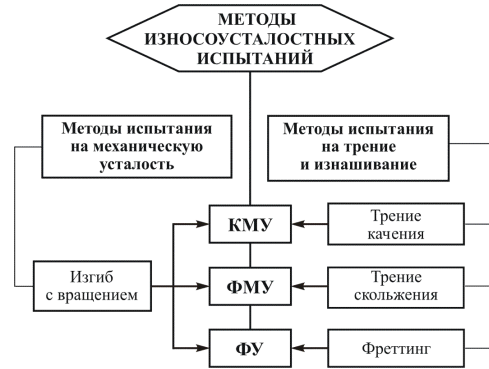


Рисунок 5 – Формирование методов изнасоусталостных испытаний при главном вращательном движении: КМУ – контактно-механическая усталость; ФМУ – фрикционно-механическая усталость; ФУ – фреттинг-усталость



Рисунок 6 – Две модификации машин серии СИ

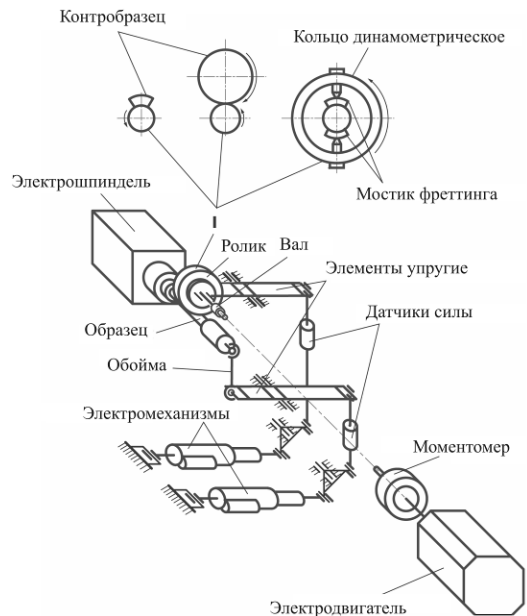


Рисунок 7 – Принципиальная схема испытательной установки машины СИ-03М

Обратимся теперь к методам теоретических исследований (таблица 5). Теория, как известно, опирается на

опыт. Вот почему трибологи, исходя из своего опыта, прежде всего разрабатывают механику контактного взаимодействия. А прочнисты, исходя из своего опыта, разрабатывают механику деформирования и разрушения. Специалисты по трибофатике, конечно, используют и то, и другое – к тому же в неразрывном единстве. Но, имея более сложный объект для изучения, им приходится искать и новые подходы к исследованию комплексных явлений.

В трибофатике развивается нетрадиционный подход к анализу контактных задач, а также задач механики деформирования и разрушения. Подход базируется на использовании статистической модели деформируемого твердого тела с опасным объемом (модель ТОПО). Согласно этой модели, прочность тела (в том числе и поверхностная) определяется областью конечных размеров с критическим уровнем напряжений в ней. Такая область называется опасным объемом.

Концепция подхода состоит в следующем.

Пусть стальной вал циклически изгибается моментом  $M$  таким образом, что в некоторой его области поле нормальных напряжений  $\sigma$  является повреждающим. Это означает, что на поверхности вала формируется *опасный объем*  $V_{P\gamma} > 0$  (случай  $F$  на рисунке 8), ограниченный условием  $\sigma \geq \sigma_{-1\min}$ , где  $\sigma_{-1\min}$  – нижняя граница рассеяния пределов выносливости.

Пусть, далее, в этой опасной зоне вала реализуется процесс трения качения либо трения скольжения. И пусть в такой силовой системе (*вал/контртело*) поле контактного давления  $p$  таково, что вызывает появление в области контактной площадки опасного объема  $S_{P\gamma}$  (случай  $T$  на рисунке 8). Если реализуется процесс трения скольжения, то опасный объем  $S_{P\gamma} = S_{WP}$  формируется в пределах тонкого поверхностного слоя вала (случай  $T-1$ ). Если реализуется процесс трения качения, то опасный объем  $S_{P\gamma} = S_{VP}$  (случай  $T-1$ ) и/или  $S_{P\gamma} = S_{VP}$  (случай  $T-2$ ) формируется не только на поверхности, но и под нею. Во всех этих случаях он ограничивается повреждающим уровнем касательных напряжений  $\tau \geq \tau_{f\min}$ , где  $\tau_{f\min}$  – нижняя граница рассеяния пределов выносливости, определяемых при сдвиге (либо фрикционной усталости).

Будем теперь рассматривать износостойкостные испытания как совмещение циклического изгиба и трения (скольжения или качения). Тогда возможны две ситуации при формировании опасных объемов (правый столбец схем на рисунке 8). Во-первых, объемы  $V_{P\gamma}$  и  $S_{P\gamma}$  совмещаются на поверхности (случай  $TF-1$ ). Во-вторых, они совмещаются под поверхностью (случай  $TF-2$ ).

В обоих этих случаях возникает комплексный опасный объем  $W_{P\gamma} > 0$ , величина которого обусловлена объемами  $V_{P\gamma}$  и  $S_{P\gamma}$ , т. е.

$$W_{P\gamma} = \Phi_{SV}(V_{P\gamma}, S_{P\gamma}), \quad (1)$$

где  $\Phi_{SV}$  – функция взаимодействия; можно полагать, что в некоторых случаях достаточно ее рассматривать как параметр взаимодействия.

Далее решение задач надежности, прочности, износостойкости, долговечности ведется с учетом фундаментальной зависимости соответствующих характеристик от *масштаба* повреждаемых областей объекта, т. е. от величины его опасного объема. При этом вво-

дятся безразмерные меры поврежденности  $\omega$ , определяемые соответствующими соотношениями опасных и номинальных объемов деформируемых тел.

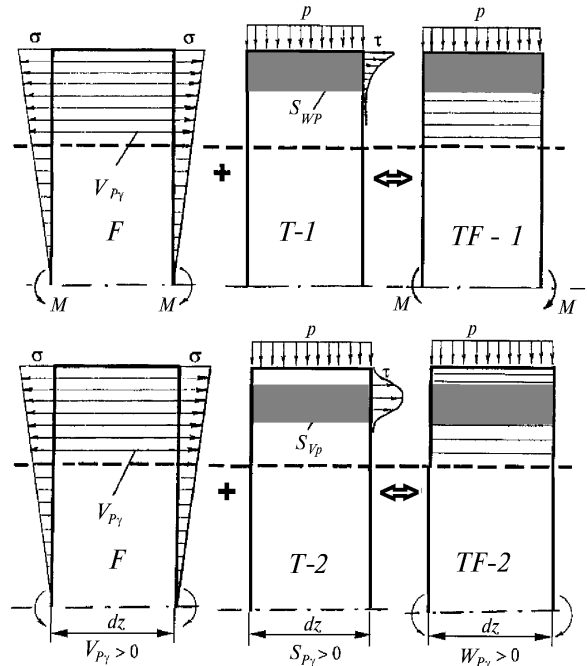


Рисунок 8 – Схемы формирования опасных объемов при испытаниях на трение ( $S_{P\gamma} > 0$ ), механическую усталость ( $V_{P\gamma} > 0$ ) и при износостойкостных испытаниях ( $W_{P\gamma} > 0$ )

Обобщенную систему условий надежности построим теперь на базе описанной выше статистической модели деформируемого твердого тела с опасным объемом. Система базируется (таблица 6) на основополагающем представлении, что опасный объем равен нулю, если поле действующих напряжений оказывается неповреждающим, так что мера поврежденности  $\omega = 0$  и вероятность отказа  $P_o = 0$ . И, напротив, вероятность отказа наступает лишь при условии, что в том или ином элементе трибофатической системы с некоторой вероятностью обнаружится опасный объем ( $V_{P\gamma} > 0$ ,  $S_{P\gamma} > 0$ ), это равносильно возникновению соответствующего ненулевого повреждения ( $\omega > 0$ ). Комплексный опасный объем  $W_{P\gamma}$  при износостойкостном повреждении определяется как соответствующая функция (1) частных опасных объемов  $V_{P\gamma}$  и  $S_{P\gamma}$  с учетом взаимодействия повреждающих явлений.

Условие надежности имеет вид

$$P(\sigma, \tau_w) \leq [P] \quad (2)$$

либо

$$Q(\sigma, \tau_w) = 1 - P(\sigma, \tau_w) \geq [Q], \quad (3)$$

где  $[P]$  – нормативное значение вероятности отказа и  $[Q]$  – нормативное значение вероятности безотказной работы  $Q(\sigma, \tau_w)$ .

Заметим, что, имея функцию вероятности отказа типа (2), можно решить задачу оптимизации системы:

$$\left. \begin{aligned} &P(\sigma, \tau_w) \Rightarrow \min; \\ &C_0(\sigma_{-1\min}, \sigma_w, m_V; \tau_d, \tau_{f}^{(1)}, m_S) \Rightarrow \min, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$



где  $C_0(\sigma_{-1\min}, \sigma_w, m_V; \tau_d, \tau_{if}^{(1)}, m_S)$  – совокупные затраты труда, средств и материалов в сферах ее производства и эксплуатации. Конечно, дополнительно к целевой функции (4) следует записать соответствующие ограничения всех параметров и величин, на базе которых формируется задача оптимизации.

Таблица 6 – Система условий надежности

Повреждение	Опасный объем	Условие безотказной работы	Мера поврежденности	Условия повреждения и разрушения с вероятностью $P$
Механическая усталость	$V_{P_I} = \iiint_{\sigma(x,y,z) > \sigma_{-1\min}} dx dy dz$	$V_{P_I} = 0$	$\omega_{VP} = \frac{V_{P_I}}{V_0}$	$0 < \omega_{VP} \leq 1$
Трение и изнашивание	$S_{P_I} = \iiint_{\tau_{\text{нп}}(x,y,z) > \tau_{f\min}} dx dy dz$	$S_{P_I} = 0$	$\omega_{SP} = \frac{S_{P_I}}{S_k}$	$0 < \omega_{SP} \leq 1$
Износостойкостное повреждение	$W_{P_I} = (V_{P_I} + S_{P_I})\varphi_{SP}$	$W_{P_I} = 0$	$\omega_{WP} = \frac{W_{P_I}}{V}$	$0 < \omega_{WP} \leq 1$

В трибофатике изучается взаимодействие между необратимыми повреждениями в движущейся и деформируемой системе; закономерности такого взаимодействия обусловлены полем напряжений (деформаций), возбуждаемых в ней соответствующими неньютоновскими – внутренними силовыми факторами. Пусть, например,  $\sigma$ ,  $p$ ,  $T$  – такие факторы, генерирующие в трибофатической системе соответствующие поля: термодинамические ( $T$ ) и деформаций (напряжений  $\sigma_{ij}$ , давлений  $p$ ). Тогда закон (обобщенное правило Сосновского) взаимодействия повреждений  $\omega_\sigma$ ,  $\omega_p$ ,  $\omega_T$ , обусловленных явлениями усталости, трения и изнашивания, изменением термодинамических состояний, дается в форме

$$F_\Lambda[(\omega_p \Leftrightarrow \omega_\sigma) \Leftrightarrow \omega_T] = [(\omega_p + \omega_\sigma) \Lambda_{\sigma/p} + \omega_T] \Lambda_{M/V} = \omega_\Sigma \quad \Lambda \neq 1 \quad (5)$$

где  $\Lambda$  – параметры (функции) взаимодействия, которые могут принимать три класса значений:  $\Lambda > 1$ ,  $\Lambda = 1$ ,  $\Lambda < 1$ . При  $\Lambda > 1$  прогнозируется и реализуется ускорение процессов повреждаемости, т.е. самопроизвольное разупрочнение системы, при  $\Lambda < 1$  – замедление, т.е. самопроизвольное упрочнение, а при  $\Lambda = 1$  их стабильное развитие. Таким образом, функция (параметр)  $\Lambda$  определяет не только уровень, но и направленность совокупных процессов износоустойчивости повреждения (упрочнения – разупрочнения).

Согласно (5), возможен как анализ системы (целое  $\omega_\Sigma$ , мыслимое как многое  $\omega_\sigma$ ,  $\omega_p$ ,  $\omega_T$ ), так и ее синтез (многое, мыслимое как целое) посредством функций взаимодействия  $\Lambda$ . При этом и анализ, и синтез имеют конкретное количественное выражение – в этом особенность и важное достоинство закона (5). Вторая его важная особенность – здесь речь идет не о внешних силах, как, например, в законах Ньютона, а о необратимых повреждениях системы, порождаемых полями

внутренних усилий. И, наконец, главное: не взаимное влияние факторов, а взаимодействия явлений – вот что должна и изучает трибофатика. Тем самым в механике и термодинамике знаменуется переход к феноменологическому анализу – в дополнение к традиционному факторному анализу.

К настоящему времени по трибофатике опубликовано около 1000 научных работ, в том числе около 40 книг. Проведено, как уже отмечалось, семь Международных симпозиумов по трибофатике; разработано 8 государственных стандартов (в том числе 3 – межгосударственных); 137 ученых разных стран награждены Почетным дипломом «За вклад в развитие трибофатики», среди них – 16 белорусских ученых. Защищено 10 кандидатских и 2 докторских диссертации, получен экономический эффект свыше 10 млн долларов США.

Основные научные результаты: разработаны методологические, теоретические и экспериментальные основания трибофатики – нового раздела механики; сформулированы начала механотермодинамики – новой физической дисциплины, и дан их анализ; предложена обобщенная теория эволюции сложных динамических систем с элементами разума; разработана фундаментальная концепция  $L$ -риска и показана его органическая связь с золотыми пропорциями; на базе диалектических представлений создана концепция трибофатической жизни как особого способа накопления повреждений в живых и разумных организмах; положено начало развитию количественных методов в диалектике; сформулирована обобщенная теория  $\Lambda$ -взаимодействий необратимых повреждений (эффективных энергий), которая знаменует переход от анализа факторов к феноменологическому анализу в механике; сформулированы основы теории запредельных состояний систем, для которых введено представление о вероятности достоверных событий, изменяющейся в диапазоне  $(1; \infty)$ ; открыто неизвестное ранее явление троппи; обоснован и сформулирован обобщенный закон трения в силовых (трибофатических) системах; предложена феноменологическая модель перехода от деформационных (макроуровень) к молекулярным (наноуровень) механизмам трения; разработаны инновационные технологии испытаний и создан новый класс испытательного оборудования – машины серии СИ и др. Получен ряд новых результатов в механике усталостного повреждения и разрушения, трибологии, механике деформируемого твердого тела, теории упругости, механике контактного взаимодействия и др.

Главный итог развития научных исследований по трибофатике к настоящему времени: во-первых она стала фундаментальной базой для создания новой физической дисциплины – механотермодинамики [1–3]; во-вторых, она легла в основу обобщенной теории эволюции сложных систем с элементами разума [4, 5].

Несколько лекций по основам трибофатики один из авторов этой статьи впервые прочитал в 1985/86 учебном году в БелИИЖТе (ныне БелГУТ). Они были опубликованы в 1988 г. под названием «Комплексная оценка надежности силовых систем по критериям сопротивления усталости и износостойкости (основы трибофатики)». И тогда же была поставлена задача создать учебный курс по трибофатике.

Трудней всего писать учебную книгу – по любой дисциплине, которую читают в вузе. Но особый труд – написать пособие по новой дисциплине, которая впервые вводится в учебный план. Этим объясняется тот факт, что от издания первых лекций до создания учебного пособия (2002 г.) прошло 14 лет. А официально курс «Основы трибофатики» был введен в учебные планы БелГУТа для будущих инженеров-механиков в 1996 г. по инициативе Л. А. Сосновского и В. И. Сенько; двумя годами позже (с 1998 г.) это было сделано (по предложению Л. А. Сосновского и А. С. Шагиняна) в Гомельском государственном техническом университете им. П. О. Сухого.

Вице-президент Российской академии наук академик РАН и НАН Беларуси К. В. Фролов, выступая на 1-м Международном симпозиуме, признал: «... именно в Беларуси родилась и успешно развивается новая наука – трибофатика», а вице-президент Академии наук Беларуси академик М. С. Высоцкий уточнил: «... большая наука делается в Гомеле». Можно добавить: это произошло в БелИИЖТе, ныне БелГУТе. И естественно, что именно БелГУТ опубликовал первое учебное пособие «Основы трибофатики» – накануне своего 50-летия. Пособие имело успех за рубежом: в 2005 г. оно издано на английском языке, а в 2013 г. – и на китайском. В приложениях А и Б воспроизведены предисловия к этим изданиям, написанные известными учеными.

Книга оказалась полезной и для преподавателей вузов, научных работников, аспирантов, инженеров – для всех, кто интересуется проблемами оценки и повышения ресурса механических систем, работающих в условиях комплексного нагружения.

К настоящему времени на основании 20-летнего опыта преподавания известное завершение получили базовая программа по трибофатике, план лекций и лабораторный практикум по этой дисциплине (приложение В). Ниже дан краткий их анализ.

Первые три темы (см. План лекций) представляют собой **введение в трибофатику**. Они посвящены общему анализу проблем объемного разрушения и поверхностного повреждения материалов. Здесь изложены основные сведения из дисциплин, которые в той или иной мере изучаются в любом техническом вузе и которые составляют фундамент для трибофатики. Эти сведения систематизированы таким образом, чтобы они могли, с одной стороны, способствовать пониманию трибофатики, а с другой стороны, важно, чтобы их можно было непосредственно использовать при изложении основного материала курса.

Как правило, в технических вузах механику (сопротивление) материалов изучают основательно, поэтому в лекции очень кратко излагаются узловые вопросы статической прочности. Зато много внимания уделено механической усталости. Причин тому две: во-первых, этот раздел крайне скупно дается в традиционном курсе сопромата, а во-вторых, трибофатика базируется на современных представлениях об усталостном повреждении и разрушении материалов и элементов конструкций. При изучении раздела по трению и изнашиванию следует учитывать, что во многих вузах читается такая дисциплина, поэтому различные методы расчета, обычно в ней излагаемые, в лекциях по трибофатике не повторяются.

Таким образом, во вводной части лекций систематизирован и кратко изложен набор исходных сведений,

необходимых студенту и полезных начинающему преподавателю.

Основное содержание трибофатики, в соответствии с рабочей программой, представлено в последующих лекциях. Там изложены, в частности, основные методы анализа и прогнозирования износоусталостного повреждения, базирующиеся:

(а) на статистической модели деформируемого твердого тела с опасным объемом, которая позволяет оценить реальную поврежденность объекта при действии данной системы нагрузок;

(б) феноменологической концепции взаимодействия опасных объемов и, следовательно, повреждений, обусловленных контактной и внеконтактной нагрузками, которая призвана интегрально описать и эквивалентно отражать статистику и направленность (упрочнение–разупрочнение) реального взаимодействия повреждений в нагружаемом объекте;

(в) экспериментально установленной аналогии формы полной кривой усталости при циклическом деформировании и при трении, что позволяет единым образом описать и вместе с тем однозначно различать типичные при данных условиях эксплуатации (или испытания) виды разрушения (повреждения).

В трибофатике установлены (и в лекциях изложены) два эффекта: прямой (влияние процессов трения на изменение характеристик сопротивления усталости) и обратный (влияние циклических напряжений на изменение характеристик износостойкости). Познание основных закономерностей износоусталостного повреждения при реализации этих эффектов открывает путь для перехода от конструирования отдельных деталей машин и оборудования к ресурсному проектированию силовых систем с учетом взаимодействия их элементов. Основы расчета и проектирования силовых систем излагаются в соответствующей лекции. При этом предусматривается разработка и внедрение комплекса методов и средств управления процессами износоусталостного повреждения конкретных систем, что обеспечивает снижение затрат труда, средств и материалов в сферах производства и эксплуатации при одновременном повышении их надежности и долговечности.

Для экспериментального исследования закономерностей и определения характеристик износоусталостного повреждения создан (на базе ряда изобретений) новый класс испытательного оборудования – машины серии СИ. В лекции дается описание машин и методов износоусталостных испытаний.

Поскольку современная тенденция расчетов объектов специального назначения – это оценка качества, риска, безопасности, то в лекциях даны начальные сведения по этим задачам. Кратко изложены традиционные концепции риска и безопасности, но основное внимание уделено представлению об *L*-риске как ожидании неблагоприятных событий (ситуаций); показатель риска в таком представлении оказывается связанным как с поврежденностью, так и с безопасностью объекта.

В БелГУТе поставлен **лабораторный практикум** по трибофатике и изданы методические пособия по нему. Для его реализации применяются автоматизированные машины серии СИ для износоусталостных испытаний (производства ООО «НПО ТРИБОФАТИКА»). Вместе с тем созданы упрощенные стенды комплексных испытаний (на фрикционно-механическую и контактно-

механическую усталость), которые построены на базе машины для испытаний на усталость УКИ-6000-2 (производства Ивановского завода «Точприбор»), широко применяемой во многих институтах бывшего Советского Союза. Таким образом, проблема материальной базы для лабораторного практикума по трибофатике может быть решена с относительно небольшими затратами.

**Расчетно-графическая** (или проектировочная) **работа** по курсу «Основы трибофатики» может быть посвящена расчету силовых систем типа *коленчатый вал / подшипник скольжения, колесо / рельс, вагонная ось / колесная пара, зубчатые зацепления* и др. Тематику работы следует выбирать с учетом специализации студентов. А комплект учебно-методических пособий для выполнения таких работ, по существу, составляет основы обобщающего курса трибофатики, посвященного практическому расчету типичных силовых систем общетехнического применения.

Изложение достижений новой науки в рамках учебной дисциплины «Основы трибофатики», несомненно, способствует значительному повышению уровня подготовки инженеров-механиков в БелГУТе и других университетах страны.

Ниже дается текст базовой программы по курсу «Основы трибофатики», утвержденной Ученым Советом Белорусского государственного университета транспорта. Можно надеяться, что ее обсуждение специалистами будет способствовать не только совершенствованию программы, но и ее использованию в других университетах, которые примут решение о преподавании курса по трибофатике. В настоящее время этот курс читается в Гомельском государственном техническом университете им. П. О. Сухого. А в головном университете страны – Белорусском государственном университете (БГУ) с 2009 г. введен для будущих механиков-математиков специальный курс «Фундаментальные и прикладные задачи трибофатики». Для магистрантов читается курс «Механика износоустойчивости». На рисунке 9 представлено предложение о введении обобщающего курса по трибофатике во всех университетах страны. Такая рекомендация содержится в решении ISTF 2015, в рамках которого проведено заседание за круглым столом «Инновации и современные тенденции в преподавании дисциплин по механике в вузах. Результаты трансдисциплинарных исследований в учебном процессе университетов». Авторы данной статьи выражают уверенную надежду: так будет.

Поскольку считается, что в ближайшем будущем преподавание трибофатики будет осуществлено и на английском, и на китайском языках, в приложении Г дается межгосударственный терминологический стандарт ГОСТ 30638–99 «Трибофатика. Термины и определения» на трех языках. По мнению авторов статьи, все эти материалы, собранные воедино, будут несомненно полезными для бакалавров, магистрантов, научных работников, профессоров и преподавателей университетов Беларуси, России, Китая и англоязычных стран. Будущее покажет, справедливы ли наши ожидания.

## ПЕРВАЯ СТУПЕНЬ ОБУЧЕНИЯ

Трибофатика	Учебные занятия		Форма контроля
	Лекции 2 часа в неделю	Лабораторные работы 2 часа в неделю	
3-й курс, 6-й семестр	Учебник «Трибофатика» (единая дисциплина для всех специальностей)	Настоящая персональная тест-машина РТС  Учебно-методическое пособие по лабораторным работам  Журнал лабораторных работ	Экзамен

## ВТОРАЯ СТУПЕНЬ ОБУЧЕНИЯ

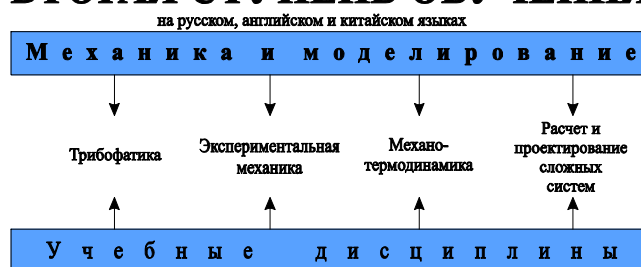


Рисунок 9 – Предложение о включении в учебные планы механических специальностей университетов Республики Беларусь обобщающего курса по трибофатике на первой и второй ступенях обучения (в соответствии с Болонским процессом)

Приложение А

**ПРЕДИСЛОВИЕ К АНГЛИЙСКОМУ ИЗДАНИЮ**  
(книга **Sosnovskiy, L. A. Tribo-Fatigue. Wear-Fatigue Damage and Its Prediction / L. A. Sosnovskiy // Series : Foundations of Engineering Mechanics, Springer, 2005. – 424 p.)**

### PREFACE TO THE ENGLISH EDITION

The author read several lectures on the concepts of tribo-fatigue first in 1985/86 at the Belarusian State University of Transport and they were published in 1988 under the title 'A Complex Assessment of Reliability of Active Systems Based on the Criteria of Fatigue and Wear Resistance (the Fundamentals of Tribo-fatigue)'.

It is a challenging task to write a textbook on any discipline intended for university students. It is still harder to write a textbook on a new discipline first introduced into the curriculum of the university. It explains the gap of 14 years between the publication of the first textbook and the present publication. They were the years of continuous intensive research. It is suffice to say that during this time over 200 scientific works were published, including several monographs; four international symposia on tribo-fatigue were held (Gomel, Belarus, 1993; Moscow, Russia, 1996; Beijing, China, 2000; Ternopil, Ukraine, 2002).

No information is available if such a manual exists in English at all. Now the Springer Publishers fill up the gap providing specialists from various countries with firsthand information about the ideas of tribo-fatigue and the results of research in this domain.

Tribo-fatigue is a new vigorously developing branch of mechanics that has emerged in response to practical challenges of machine building. It was impossible, from the standpoint of both tribology exclusively or mechanical fatigue solely, to make any valid assessment (theoretical or experimental) of damage, durability or limiting states of such specific mechanical systems that take up and transmit cyclic loads while operating under friction (be it sliding, rolling, impact and others). It is explained by the fact that in operation complex wear-fatigue damage emerges in such systems (termed 'active systems' in tribo-fatigue). It is exactly due to this fact that these active systems are, as a rule, most essential in any machine. Any failure of these systems leads both to significant material losses and breach of guarantees of people's safeguarding.

Now that the main ideas of tribo-fatigue have been formulated, described analytically and validated experimentally, they can be systematized in the following manner.

A. It was found that damages due to contact (friction) and off-contact (cyclic) loading do not add up, they interact in an intricate manner. The traditional theory of damage summation has acquired a new and unexpected furtherance in the nonlinear statement. Yet, two problems have emerged immediately: how a variety of multimodal and numerous damages should be assessed quantitatively? What is the possible result of their interaction?



W. Weibull and V. Bolotin were first to develop the statistical theory of size effect in linear stressed state. The dependence of the limiting stress on the volume of the loaded specimen was determined according to this theory. Using the works of W. Weibull and V. Bolotin L. Sosnovskiy formulated the statistical model of the deformable solid with a dangerous volume for any combined stress states. It provided explicit answers to the first question: a procedure of calculating the new measure of damage has been developed – the relative dangerous volume during cyclic deformation, friction, complex loading. The idea of the damage tensor generalized this research. In fact, it is justifiable to treat the dangerous volume as a phenomenological equivalent of damage of a deformable solid under any loading conditions.

In order to answer the second question, a (phenomenological) theory of interaction of damages had to be developed. It is based on the idea about  $\Lambda$ -function (or  $R$ -parameter) of interaction, that can acquire three groups of values. If  $\Lambda \gg 1$ , the processes of damaging due to various loads strongly intensify. On the opposite, if  $\Lambda \ll 1$ , the processes of damaging strongly slow down. While at  $\Lambda = 1$  there is a usual damage summation studied traditionally. It is easy to realize that at  $\Lambda \gg 1$  they are the systems that soften spontaneously in the process of operation, at  $\Lambda \ll 1$  they are the systems that harden spontaneously and at  $\Lambda = 1$  the system is stable.

B. It would seem clear that various signs indicate when active systems can reach their limiting states: whether it is the criterion of mechanical fatigue (volume fracture), or just the criterion of wear (critical surface damage), or both these criteria simultaneously. In reality a complex interaction of damages due to contact and off-contact loads corrects these ideas radically. It turns out that the characteristics of resistance to fatigue strongly depend on the conditions and processes of friction. Moreover, it is established theoretically and experimentally that friction with wear can both strongly weaken and reinforce the resistance of a system to fatigue. Whence the idea of the direct effect emerged.

While the direct effect was seemingly expected and perceived by specialists naturally, the idea of the back effect was unexpected; on the contrary, it was initially categorized as impossible. Nevertheless, the revolution in the thinking has already occurred. While tribologists had attributed the processes of wear and friction for over 150 years only and exclusively to contact loading, we are now definitely aware that off-contact cyclic loading can strongly intensify (or reduce) wear and correspondingly alter the friction coefficient.

C. Since the direct and back effects were established, it necessitated to develop the theory of limiting states of active systems with allowance for these effects, i. e. to apply non-traditional methods. For the time being the terms of stresses failed to contribute to such method. It was developed on more general, energy concepts.

Like in the case of development of the theory of damage interaction, two problems emerged immediately: how to identify in the total input energy that part which is expended exceptionally for appearance and development of damages? What is the critical energy beyond which the state of the system becomes limiting?

The first question was easily, though formally answered from the boundary conditions for the equation of limiting states. Though valid mathematically this answer does not seem fully validated from the point of view of the mechanics of damage; the parameter that identifies the effective part of the total energy should apparently depend on the loading conditions. The procedure of determination of this parameter given in the book does not make this condition binding. This possible inaccuracy is compensated, in fact, that the  $\Lambda$ -function of damage interaction is introduced into the criterion of the limiting state strongly responsive to any variation in the loading conditions.

A specific situation emerges in relation to the critical energy that transforms the active system into a limiting state. This energy, on the opposite, should not depend on the manner how the limiting state is reached and what mechano-physical mechanisms of damage come into effect. Therefore, this energy should be a fundamental characteristic of matter. The author realized that this characteristic could and should be the energy of breaking of atomic bonds (or the energy of activation of the fracture process).

The traditional criteria of the limiting state assert that intensification of effective stresses is equivalent to a loss of reliability and durability by an object. The energy criterion of limiting states of active systems given in the book 'permits' different situations in reality: contact and off-contact loads grow under definite conditions and the system's reliability increases concurrently; meanwhile such loads are light in other conditions, yet opposite to expectations, they accelerate degradation of a system. Such unusual statements have been proved experimentally. For example, during contact-mechanical fatigue (when contact and off-contact loads are effective concurrently) the endurance limit can increase more than 1.5 times versus the limit unaffected by any contact load (the direct effect). The ultimate contact pressure the system can tolerate increases 1.25 times if an extra cyclic load is excited in it (the back effect). It is explained convincingly and easily: it is the matter of real processes of damage interaction that occur under given conditions.

D. It is hard to overestimate the significance of experimental determination of new characteristics of resistance of materials to wear-fatigue damage. A number of inventions and ingenious designing solutions have led to new methods and high technologies of wear-fatigue tests and at present these characteristics are determined for a variety of conditions. In fact, a new class of testing equipment has been developed represented by the SI-series machines for wear-fatigue tests. Their unique potential is briefly described in the book.

E. The main task of tribologists is apparently to combat wear. Huge effort and means are spent for the purpose all over the world. Prevention of fatigue breakdowns is presumably the main task of specialists in mechanical fatigue. Again huge effort and means are spent for the purpose all over the world. From the viewpoint of tribo-fatigue, it is time, at least in some situations, to control reasonably the damaging phenomena rather than to try to suppress them, because it is stated above that wear, similarly to cyclic stresses, can be useful in the sense of performance of active systems. The book shows an algorithm how to solve the

problem of optimum control over complex wear-fatigue damage of active systems of machines and equipment.

G. The method of strength calculation has presently reached certain perfection. It is impossible to state that similar achievements have been made in the calculations of friction and wear. In our view, it is in part explained by the fact that they are based on the mechanics of a discrete contact between bodies with rough surfaces rather than on the mechanics of a deformable solid. If the linear wear to the depth corresponding to the height of projections on a rough surface is accepted zero, then the interaction between bodies in friction and wear should be evidently described with allowance for deformation and surface damage of not rough contacting surfaces.

The present book describes the next essential step in developing the methods of strength calculation: an engineering procedure is developed to perform calculations using the criteria of surface strength, i.e. wear resistance. It is based on the fact experimentally established that full fatigue curves during cyclic deformation and friction have similar patterns and comprise four main regions that describe quasistatic, low-cycle, multicycle and gigacycle damage and fracture. Then, irrespective of the mechanisms of damage and fracture, it is possible to formulate a unified and orderly procedure of calculating strength of structural elements, friction pairs and active systems. The method of determination of cross sectional dimensions of a loaded object described in the strength of materials is modified: the effect of friction processes on the change of mechanical fatigue characteristics are allowed for. In addition, similar procedures of calculating the required size of the contact area in friction and what the friction coefficient should be to ensure the normative reliability of a system, have been worked out.

It is a prime feature of the methods of calculation of volume and surface strength of components of an active system is that both direct and back effects are duly taken into account.

So, it is time now to switch over from calculation of strength of individual pieces to designing of active (mechanical) systems of machines using the tribo-fatigue criteria. This switch-over is supported by the methods of design and experimental assessment of damage and limiting states of active system provided by tribo-fatigue.

The book contains some other new results that specialists will definitely appreciate. For example, they will learn the concept of assessment of risk and safety which is free of any subjective rating of material damage; the method of quantitative analysis of quality of materials based on mechanical characteristics; the concept of the friction coefficient in an active system that is determined with allowance for the effect of an off-contact cyclic load, etc. We share the common view that tribo-fatigue is a specific way of setting up and solving practical problems leading to development and implementation of methods of improving reliability of active systems of modern machinery together with saving labor and material cost in production and operation. We would like to draw attention of specialists that it is necessary to develop the theory of translimiting states of systems. The initial foundation for this theory is briefly outlined in the present book.

...When we mention here some works of Professor L. Sosnovskiy disclosed in the present book, the reader will certainly understand that his colleagues and associates have contributed and continue to contribute largely to the results of research in this new and promising domain of knowledge. Specialists of the S&P Group TRIBOFATIGUE Ltd (Gomel) have been cooperating highly fruitfully for many years with researchers of the IMASH of the Russian Academy of Sciences (Moscow), the Institute of Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kiev), the IMINMASH of the Belarusian National Academy of Sciences (Minsk) and others. The fifth international symposium on tribo-fatigue will take place in 2005. It will provide an opportunity for researchers from many countries to evaluate the past stage of progress of tribo-fatigue research. Publication of the present book in English will certainly favor mutual understanding between scientists from different countries in a new and interdisciplinary field of knowledge.

It is believed that the book will be useful both for university instructors and students, for scientific workers, post-graduate studies, engineers and for all those who are eager to know about the problems how to rate and improve the service life of mechanical systems operating under complex loading.

Professor *K V Frolov*, DSc,  
Academician of the Russian  
Academy of Sciences and  
National Academy of Sciences  
of Belarus

Professor *N A Makhutov*, DSc,  
Corresponding Member of the  
Russian Academy of Sciences

May 2004

**ПРЕДИСЛОВИЕ К КИТАЙСКОМУ ИЗДАНИЮ**  
**(книга Sosnovskiy, L. A. Tribo-Fatigue. Wear-fatigue damage and its prediction (in chinese) / L. A. Sosnovskiy. – Beijing : China University of Mining and Technology Press, 2013. – 324 p. 摩擦疲劳学磨损-疲劳损伤及其预测 L. A. 索斯诺夫斯基著, 高万振译-中国矿业大学出版社, 2013. – 324 p.)**

序言

中文版序言<sup>①</sup>

中文版《摩擦疲劳学》的出版令人信服地证明,摩擦疲劳学在新的知识领域具有重大意义和应用前景。

近二十年来,在4个国家召开的6次国际会议记录下了摩擦疲劳学研究的发展历程。

首届国际会议于1993年在白俄罗斯的梅利市召开,并一下子成为“轰动科学界的事件”(参见:A. B. Богданович 主编,作者有 В. И. Стражев, К. В. Фролов, М. С. Высоцкий 等的《漫话摩擦疲劳学》,戈梅利-明斯克-莫斯科-基辅;Remika, 1996,共132页)。

第二届国际会议于1996年在俄罗斯的莫斯科市召开,并以“摩擦疲劳学的辉煌成就”而值得回忆,譬如,来自白俄罗斯、俄罗斯和乌克兰的20位学者的首批论文(著作)在这里获得了由俄罗斯、白俄罗斯和乌克兰三个国家科学院的副院长共同签发的荣誉证书。

第三届国际会议于2000年在中国的北京市召开,首开摩擦疲劳学在中国发展的先河[参见:高万振、李健主编的《Proceedings of III International Symposium on Tribo-Fatigue》(ISTF' 2000; Oct. 22-26, 2000, Beijing, China),湖南大学出版社,2000,共653页];这个“先河”在很大程度上取决于高万振教授,如果没有他的巨大努力,简直就不可能实现。在第三届国际会议上,共有35位各国学者获得了由国际摩擦疲劳学合作委员会(International Coordinative Council on Tribo-Fatigue)四位共主席签发的“为发展摩擦疲劳学做出贡献”的荣誉证书,其中包括薛群基、温诗铸、谢友柏、赵源等十多位中国学者。第三届摩擦疲劳学国际会议论文集共收录139篇论文,全部以英文结集正式出版。

随后,又召开了两届国际会议(第四届于2002年在乌克兰的泰尔诺皮尔市,第五届于2005年在俄罗斯的伊尔库斯市),也都成为摩擦疲劳学发展的里程碑,这两届国际会议都有中国学者的论文参加[参见:В. Т. Троценко 主编的《Pro-

<sup>①</sup> “中文版序言”由原著作者 L. A. Sosnovskiy 教授提供,用俄文写成。遵照他的建议,“中文版序言”由葛世荣和高万振署名。“中文版序言”由武汉材料保护研究所的副研究员翻译成中文。

· 1 ·

## 摩擦疲劳学

ceedings of IV International Symposium on Tribo-Fatigue》(ISTF' 2002; Sep. 23-27, 2002, Ternopil, Ukraine),泰尔诺皮尔国立科技大学出版,2002,第1卷共530页,第2卷共317页;以及 А. П. Хоменко 主编的《Proceedings of V International Symposium on Tribo-Fatigue》(ISTF' 2005; Oct. 3-7, 2005, Irkutsk, Russia),伊尔库斯国立交通大学出版,2005,第1卷共498页,第2卷共384页,第3卷共389页]。

最近的一届,即第六届国际会议(国际摩擦疲劳学纪念大会)于2010年在白俄罗斯的首都明斯克市召开,来自中国的组织者是高万振教授。共有8位中国学者作为报告人出席了会议,由高万振、金学松和刘启跃撰写的论文“Overview of progress in the study of wheel-rail system in China using tribology and tribo-fatigue methods”作为特邀报告在大会第一天的全体会议上作了报告。在第六届国际会议上,对新的、具有前景的机械学分支——摩擦疲劳学二十五年的研究和发展进行了总结(大盘点),出版了 ISTF' 2010 论文集,以纪念摩擦疲劳学诞生 25 周年和 L. A. Sosnovskiy 教授 75 寿诞[参见:М. А. Журавков 等主编的《Proceedings of VI International Symposium on Tribo-Fatigue》(ISTF' 2010; Oct. 25-Nov. 1, 2010, Minsk, Belarus), БГУ 出版,2010,第1卷共840页,第2卷共724页]。ISTF' 2010 期间还举行了“哲学、协同学与摩擦疲劳学”学术研讨会,L. A. Sosnovskiy 教授被白俄罗斯国家科学院哲学研究所授予荣誉证书,以表彰他为学科交叉的研究和发展,对现代哲学知识的传播以及采用哲学方法研究出创新原理(规律)以解决最现实的自然科学问题和技术课题等方面所做出的杰出贡献。有来自各国的25位学者和专家获得了“摩擦疲劳学25周年”荣誉证书,以表彰他们在组织国际会议及持续十余年在该领域进行科研与试验设计工作所做出的特殊贡献;其中,中国代表是高万振教授。同时,还有120多位各国的学者获得了“对摩擦疲劳学发展作出贡献”荣誉证书,其中包括中国的高万振教授,以表彰他们为发展摩擦疲劳学所做出的贡献。

最近十年来,密集的科学研究和高效的应用工作成为摩擦疲劳学的显著特征。2004年,根据 П. А. Витязя(白俄罗斯国家科学院院士、技术科学博士、教授)、Л. Г. Красенского(白俄罗斯国家科学院通讯院士、技术科学博士、教授)、В. И. Сенько(技术科学博士、教授)、В. А. Жмайлика(技术科学副博士)和 Л. А. Сосновского(技术科学博士、教授)的建议,在白俄罗斯创建了国际联合摩擦疲劳学实验室,以解决科学、教育和生产领域的学科间的一些问题。于是,在白俄罗斯国立大学的教学计划中(根据物理数学博士 М. А. Журавкова 教授的建议)为

· 2 ·

机械数学系学生引进了“摩擦疲劳学的主要和实用任务”课程,还出版了必备的教科书(由 Л. А. Сосновский, М. А. Журавков, С. С. Шербаков 著的《摩擦疲劳学的主要和实用任务:讲课教程》,明斯克, БГУ 出版,2010,共488页;由 В. И. Сенько, Л. А. Сосновский 著的《摩擦疲劳学的基本概念及其在工业大学中的研究现状》,戈梅利, БелГУТ 出版,2005,共187页)。

主要科研成果有:发展了机械学新分支——摩擦疲劳学的方法论、理论及实验的基础;确切阐述了新的物理学科——机械热力学的基本原理并予以分析;提出了带有智能元件的复杂动力学系统演化的一般理论;发展了与黄金分割率(golden proportions)具有有机联系的 L 风险的基本概念;在辩证理念的基础上,产生了摩擦疲劳学寿命(Tribo-Fatigue life)作为有生命、有智能的生物体中损伤累积(damage accumulation)的特别方式的设想;开启了辩证法中定量方法的进程;确切阐述了不可逆损伤(有效能量)的  $\Delta$  交互作用的一般理论,它导致了机械学中因素分析向现象学分析的转变;构建了系统跨越限状态(translimiting states of systems)基础理论,该理论提出了某些变化于  $(1, \infty)$  区间的事件的可靠性概念;发现了先前未知的 Troppy 现象(Troppy phenomenon,即“波浪形损伤现象”);确切阐述和证明了荷载摩擦副系统(摩擦疲劳学)中摩擦的普通法则;提出了摩擦的形态损伤(宏观)机制向分子(纳米尺度)机制过渡的现象学模型;发展了富有创新性的试验技术,发明了新型试验仪器,即 SI 系列磨损-疲劳试验机;在疲劳损伤与断裂力学、摩擦学、固体力学、弹性理论和接触力学等领域获得了大量新成果。

总之,目前对于摩擦疲劳学的科学研究的主要成果体现在:第一,成为形成新的物理学科——机械热力学的主要基础[参见: Sosnovskiy L. A., Sherbakov S. S. Mechanothermodynamical system and its behavior. Continuum Mech. Thermodyn. 2012, Vol. 24, Issue3, pp. 239-256.; Сосновский Л. А., Шербаков С. С. О возможности построения механотермодинамики // Наука и инновации (Sosnovskiy L. A. 论建立机械热力学的可能性//科学与创新). 2008, No2(60), pp. 24-29.; Высоцкий М. С., Витязь П. А., Сосновский Л. А. Механотермодинамическая система как новый объект исследования // Механика машин, механизмов и материалов(Sosnovskiy L. A. 等. 作为新的研究对象的热力学系统//机器、机构及材料力学). 2011, No2(15), pp. 5-10.];第二,奠定了带有智能元件的复杂动力学系统演化的一般理论基础[参见: Сосновский Л. А. Динамические системы с элементами разума: проблема и перспективы исследования // Механика-2011》(Материалы V Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике, · 3 ·

## 摩擦疲劳学

Минск, 26-28 октября 2011 г.) (Sosnovskiy L. A. 动力学系统与智能元件:研究的问题与前景//《力学-2011》(第五届白俄罗斯理论和应用力学会议资料,明斯克, 2011年10月26-28日); Минск; ОИМ НАН Беларуси, 2011. Т. I. С. 64-79.; Сосновский Л. А. О возможности построения общей теории эволюции систем // Философия в Беларуси и перспективы мировой интеллектуальной культуры (Материалы Международной научной конференции к 80-летию Института философии НАНБ, Минск, 14-15 апреля 2011 г.) (Sosnovskiy L. A. 论建立系统演化一般理论的可能性//白俄罗斯哲学与世界智力文化的前景(纪念白俄罗斯国家科学院哲学研究所成立80周年国际学术会议,明斯克,2011年4月14-15日)). Минск; Право и экономика, 2011. С. 152-157.]. 这里要强调 Л. А. Sosnovskiy 教授对上述技术科学、物理学科和哲学观念研究方面所做出的特殊贡献[参见: П. А. Витязь, М. С. Высоцкий, В. А. Жмайлик 著的“学者型机械专家 Л. А. Sosnovskiy(科学履历)”// М. А. Журавков 等主编的 Proceedings of VI International Symposium on Tribo-Fatigue(ISTF' 2010; Oct. 25-Nov. 27, 2010, Minsk, Belarus), БГУ 出版,2010,第1卷 pp. 55-64.]。

正值中文版《摩擦疲劳学》出版之际,可以相信,摩擦疲劳学在中国的研究将获得新的推进。因此,我们认为,摩擦疲劳学作为教学课程走进中国的大学校园也为期不远。因为在中国正计划出版一部独一无二的百科全书式的《摩擦疲劳学大辞典》,该辞典将收入机械学、物理学以及疲劳损伤、摩擦与磨损、磨损-疲劳复合损伤和损伤统计学,还有相关学科所需的资料(数据)(材料的强度及构成,材料科学等)。这部百科全书式辞典兼具一般辞典(可查所需信息)和手册(以最小容量信息满足读者需求)的优点。辞典正文部分包括五大类别:(1)对各种术语的简明定义(包括必要的数据库信息);(2)对最迫切问题的分析和简评;(3)对各种用于计算的参数和系数的定义和简明分析;(4)材料的机械性能(配有其性能一览表);(5)简明的历史数据(资料)。

《摩擦疲劳学大辞典》编委会主席为葛世荣(俄罗斯工程院外籍院士,中国矿业大学校长,工学博士,教授),副主席为 М. А. Zhuravkov(俄罗斯矿业科学院院士,白俄罗斯矿业科学院院士,国际生态、人类和自然科学院通讯院士,物理数学博士,教授,白俄罗斯国立大学第一副校长、白俄罗斯国立大学理论和应用力学部主任, А. N. Sevchenko 自然科学奖获得者);《摩擦疲劳学大辞典》主编为 Л. А. Sosnovskiy(技术科学博士,“摩擦疲劳学”科学与生产集团负责人,白俄罗斯国立交通大学教授,白俄罗斯国际联合摩擦疲劳学实验室主任,白俄罗斯共和国功勋

· 4 ·

序言

科学家,乌克兰国家奖获得者,俄罗斯理论和应用力学国家委员会委员,国际摩擦疲劳学合作委员会副主席),副主席为高万振(工学硕士,武汉材料保护研究所前所长,教授,中国机械工程学会摩擦学分会顾问委员会委员,“摩擦学报”副主编,国际摩擦疲劳学合作委员会副主席)。一些著名的中国和白俄罗斯学者和专家将参与编辑这部辞典。

我们非常高兴地强调,摩擦疲劳学在中国的发展必将通过我们的大学而得到进一步推进。

中国矿业大学校长,工学博士,教授 葛世荣  
 武汉材料保护研究所前所长,工学硕士,教授 高万振

2013年3月12日

## БАЗОВАЯ ПРОГРАММА ПО КУРСУ «ОСНОВЫ ТРИБОФАТИКИ»

### ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ, ЕЕ МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

#### Цели преподавания дисциплины

Цель преподавания курса «Основы трибофатики» состоит в следующем:

- а) сформировать у студентов представление о комплексном подходе к оценке и прогнозированию долговечности, предельного состояния и ресурса силовых систем по важнейшим критериям работоспособности;
- б) выработать у студентов навыки экспериментального исследования и расчетной оценки износоусталостных повреждений на современном уровне;
- в) сформировать у студентов представление о комплексном подходе к расчету надежности систем.

#### Задачи изучения дисциплины

Студенты должны научиться:

- а) комплексному подходу к анализу работоспособности силовых систем типа колесо / рельс, шейка колена / подшипник скольжения и т.д.;
- б) планировать и осуществлять методы типичных износоусталостных испытаний с применением информационно-управляющей системы, построенной на базе ПЭВМ;
- в) ставить и практически решать простейшие задачи расчетной оценки долговечности и предельного состояния типичных силовых систем с учетом многих и разных факторов, влияющих на формирование их технического ресурса;
- г) экспериментально определить важнейшие характеристики сопротивления износоусталостным повреждениям;
- д) методике анализа риска и безопасности, в том числе и построению оперативной характеристики риска;
- е) принципам построения алгоритма управления процессами износоусталостного повреждения силовых систем.

### БАЗОВАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

#### 1 Поверхностное повреждение и объемное разрушение

Общие понятия: нагрузка, прочность и жесткость, объемная и поверхностная прочность, трещиностойкость, механические свойства, основные типы разрушения.

Статическая прочность: внутренние усилия, напряженное и механическое состояния, основные виды деформации, закон Гука при растяжении-сжатии и сдвиге, условие прочности.

Сложное напряженное состояние: обобщенный закон Гука, энергия деформации, теории предельных состояний (прочности и пластичности), схема расчетов на прочность.

Сопротивление усталости – объемное разрушение: циклы напряжений, кривая усталости и ее характеристики, механизмы усталости металлов, циклическое упрочнение-разупрочнение, циклическая трещиностойкость, суммирование повреждений, энергетический подход, влияние различных факторов, расчеты на прочность при циклическом нагружении и долговечность, связь предела выносливости с характеристиками механических свойств, случайная усталость.

Трение и износ – поверхностное повреждение и разрушение: площадка контакта, сила и коэффициент трения, закон Амонтона – Кулона, третье тело, смазка, кривая Герси – Штрибека, процессы изнашивания, интенсивность износа и классы износостойкости, скольжение (напряженное состояние и кривая фрикционной усталости), качение (напряженное состояние, кривая и механизмы контактной усталости), фреттинг (проскальзывание, кривая и механизмы фреттинг-усталости, фреттинг-износ), расчеты на трение, износостойкость и долговечность при трении.

Надежность: модель отказов, основные показатели надежности и их взаимосвязь, методы оценки показателей надежности, модель нагрузка-прочность, расчет показателей надежности при линейном и сложных напряженных состояниях. Расчеты на надежность по критериям сопротивления усталости и износостойкости. Надежность и безопасность. Риск.

Прочность материалов в конструкциях. Методология трибофатики.

#### 2 Экспериментальные основания трибофатики

Методы и машины для износоусталостных испытаний: задачи, основные схемы испытаний (на механическую, фрикционную, контактную, фрикционно-механическую, контактно-механическую, фреттинг-усталость), унификация объектов испытаний, расчет напряженного состояния образцов и критерии их предельного состояния при испытаниях, износоусталостные повреждения и основные их характеристики, методики исследования износоусталостных повреждений.

Испытательные машины серии СИ: принципиальная схема, технические характеристики, конструктивные особенности, информационно-управляющая система, методы измерения и регистрации интегральных и локальных параметров, обработка данных.

#### 3 Прямой и обратный эффекты в трибофатике

Прямой эффект Сосновского – Серенсена: влияние процессов трения и изнашивания на изменение характеристик сопротивления усталости при фрикционно-механической усталости металл-полимерной и металл-металлической систем, при контактно-механической усталости металл-металлической системы.

Обратный эффект Сосновского – Шарая: влияние процессов механической усталости на изменение характеристик износостойкости в условиях контактно-механической и фрикционно-механической усталости.

Основные характеристики прямого и обратного эффектов. Механизмы взаимодействия повреждений, обусловленных контактной и внеконтактной нагрузками. Влияние условий взаимодействия. Рассеянный эффект множественного микросдвига (РЭММС) Сосновского – Махутова – Чижика. Волнообразные повреждения при контактно-механической усталости и их анализ. Эффект

Сосновского – Комаровых местного пластифицирования высокопрочной стали в условиях трения качения. Парадокс Сосновского – Комиссарова – Щербакова. Кривая контактной усталости Сосновского – Елового по критерию локального повреждения. Экспериментальная диаграмма предельных состояний Сосновского – Богдановича – Тюрина при контактно-механической усталости.

Сюрпризы трибофатики: S1 – загадка трибофатики, S2 – обратный эффект, S3 – «бомба» Махутова, S4 – «подарок» трибофатики.

#### **4 Закон трения для трибофатической системы**

Понятие о деформационной теории трения Щербакова. Обобщенный закон трения Сосновского – Щербакова – Комиссарова: теория и экспериментальное обоснование для трибофатической системы. Влияние циклических напряжений от внеконтактной нагрузки и смазки на изменение силы и коэффициента трения. Модифицированная кривая Герси – Штрибека – Сосновского и ее экспериментальное обоснование.

#### **5 Напряженно-деформированное состояние трибофатических систем**

Механико-математическая модель Сосновского – Журавкова – Щербакова: совмещенное НДС трибофатических систем, обусловленное контактной и внеконтактной нагрузками. Задачи теории упругости, дополненные учетом локальных эффектов в области приложения контактной нагрузки (специальный раздел теории упругости). Задачи механики контактного взаимодействия, дополненные действием различных внеконтактных сил (особый класс контактных задач). Практические примеры расчетов НДС системы ролик / вал (колесо / рельс), ролик / кольцо, кольцо / кольцо.

#### **6 Состояние поврежденности трибофатических систем**

Статистическая модель деформирования твердого тела (модель ТОПО Сосновского) и расчет абсолютной меры поврежденности (опасного объема) в элементе конструкции, паре трения, трибофатической системе. Классификация опасных объемов по Щербакову и методы их расчета. Безразмерная мера поврежденности: отношение опасного объема к рабочему объему объекта. Понятие о тензоре повреждений. Принцип Сосновского необратимого взаимодействия повреждений: анализ и синтез.  $\Lambda$ -функция (параметр) взаимодействия, методы ее экспериментального определения и расчетной оценки. Практические примеры анализа необратимого взаимодействия повреждений. Явление троппи Сосновского – Щербакова (сюрприз S5 трибофатики) и его анализ.

#### **7 Ресурс трибофатических систем**

Функция нелинейного накопления износоусталостных повреждений Сосновского и ее анализ: циклически упрочняющиеся, разупрочняющиеся и стабильные состояния. Расчетно-экспериментальная методика расчета повреждаемости и долговечности объектов при регулярном и блочном нагружении; понятие об оценке долговечности при случайном нагружении. Анализ прямого и обратного эффектов при расчете долговечности по различным критериям работоспособности.

#### **8 Многокритериальные предельные состояния трибофатических систем**

Элементы энергетической теории предельных состояний Сосновского – Махутова – Богдановича для трибофатических систем и ее обобщение, данное Щербаковым и Сосновским. Эффективная энергия и методика определения ее составляющих – силовой, фрикционной, тепловой, коррозионной. Нелинейные взаимодействия составляющих эффективной энергии и их учет посредством  $\Lambda$ -функций. Энергия активации процессов повреждения (энергия разрыва межатомных связей) как обобщенный критерий многокритериальных предельных состояний, не зависящий от условий нагружения, природы материалов, механизмов повреждения. Многокритериальная диаграмма предельных состояний Сосновского – Махутова – Богдановича и ее анализ. Расчетно-экспериментальная оценка предельных напряжений по различным критериям (усталостное разрушение, критический износ, критическая плотность ямок выкрашивания и т.д.). Схема расчета ресурса трибофатических систем с учетом влияния характерных повреждений и их взаимодействия.

#### **9 Надежность трибофатических систем**

Общие понятия. Вероятность отказа металл-полимерной трибофатической системы (типа шейка коленчатого вала – подшипник скольжения) и ее анализ. Частные случаи: механическая усталость вала и фрикционная усталость подшипника. Методики определения параметров. Понятие о расчете вероятности отказов металл-металлической силовой системы.

Понятие о запределных состояниях трибофатических систем, для которых вводится представление о достоверных вероятностях  $1 > P^* > \infty$ . Примеры расчета.

#### **10 Концепция качество, риск, надежность (КРН). Безопасность систем**

Методы расчетно-экспериментальной статистической оценки качества и его нарушения по основным характеристикам механических свойств, сопротивления усталости и износостойкости моделей элементов конструкций, пар трения и трибофатических систем. Обобщенное понятие об  $L$ -риске и представление его оперативной характеристики. Взаимосвязь показателей качества, риска и надежности. Практические примеры анализа. Обобщенное представление об  $S_r$ -безопасности и ее расчетно-экспериментальная оценка. Пример анализа.

#### **11 Принципы проектирования трибофатических систем**

Обобщенное представление о принципах расчета и проектирования механических систем современных машин и оборудования. Методы решения типовых задач: определение размеров поперечного сечения, определение площади контакта, выбор материалов, требования к коэффициенту трения, ресурсное проектирование, проектирование по показателям надежности, понятие о проектировании с учетом риска и безопасности. Задача об оптимальном управлении износоусталостными повреждениями трибофатических систем.

#### **12 Трибофатическая система тормозные колодки / колесо / рельс (ТКР)**

Эксплуатационная нагруженность системы ТКР и анализ ее эксплуатационных повреждений с позиций трибофатики. Напряженно-деформированное состояние. Состояние повреждаемости. Предельные состоя-

ния. Влияние конструктивного исполнения, технологий изготовления, смазки, материалов и их служебных свойств, условий эксплуатации. Hi-Tech: литые рельсы из сталистого высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, расчетно-экспериментальное обоснование проекта и перспективы его реализации.

**Заключение: трибофатика и смежные научные дисциплины, трибофатика и современное машиностроение**

#### План лекций

- 1 Объемное разрушение: статическая прочность.
- 2 Поверхностное повреждение: трение и износ; смазка.
- 3 Поверхностное повреждение и объемное разрушение: механическая усталость.
- 4 Методы и машины для износоусталостных испытаний.
- 5 Экспериментальные и методологические основания трибофатики: прямой и обратный эффекты; сюрпризы трибофатики.
- 6 Обобщенный закон трения: теория и экспериментальное обоснование.
- 7 Трибофатическая система: пространственное напряженно-деформированное состояние; частные случаи.
- 8 Трибофатическая система: состояние объемной поврежденности.
- 9 Трибофатическая система: многокритериальные предельные состояния; частные случаи.
- 10 Принципы расчета трибофатических систем на прочность и долговечность.
- 11 Надежность трибофатических систем.
- 12 Концепция качество, риск, надежность и безопасность трибофатических систем.
- 13 Трибофатическая система колесо / рельс.
- 14 Трибофатика и смежные научные дисциплины, трибофатика и современное машиностроение.

#### Лабораторные работы

*Лабораторный практикум* имеет цель привить студентам навыки по экспериментальному определению основных характеристик износоусталостного повреждения, познакомить их с современными машинами и методами износоусталостных испытаний. Студенты выполняют следующие лабораторные работы:

- 1 Стенды для комплексных испытаний: устройство и принципы работы.
- 2 Экспериментальное определение характеристик сопротивления механической усталости.
- 3 Экспериментальное определение характеристик сопротивления контактной усталости.
- 4 Экспериментальное определение характеристик сопротивления контактно-механической усталости.
- 5 Экспериментальное определение характеристик сопротивления фрикционной усталости.
- 6 Экспериментальное определение характеристик сопротивления фрикционно-механической усталости.
- 7 Устройство и работа машин серии СИ.
- 8 Информационно-управляющая система (ИУС): принципы построения и работа.

#### Список рекомендуемой литературы

##### Основная учебная литература

- 1 **Сосновский, Л. А.** Основы трибофатики : учеб. пособие : [доп. Мин-вом образования Респ. Беларусь в качестве учебного пособия для студентов технических высших 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 / L. A. Sosnovskiy // Series : Foundations of Engineering Mechanics, 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 **Сенько, В. И.** Основные идеи трибофатики и их изучение в техническом университете : учеб. пособие / В. И. Сенько, Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2005. – 191 с.
- 3 **Сосновский, Л. А.** Механика износоусталостного повреждения / Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2007. – 434 с.
- 4 **Богданович, А. В.** Прогнозирование предельных состояний силовых систем / А. В. Богданович. – Гродно : ГрГУ им. Я. Купалы, 2008. – 372 с.
- 5 **Комиссаров, В. В.** Определение характеристик сопротивления износоусталостным повреждениям : учеб.-метод. пособие по выполнению лаб. работ по дисциплине «Основы трибофатики» / В. В. Комиссаров. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 47 с.
- 6 Надежность. Риск. Качество : [моногр.] / Л. А. Сосновский [и др.] ; науч. ред. Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 358 с.

##### Дополнительная учебная литература

- 7 **Сосновский, Л. А.** Фундаментальные и прикладные задачи трибофатики : курс лекций / Л. А. Сосновский, М. А. Журавков, С. С. Щербаков. – Минск : БГУ, 2010. – 488 с.
- 8 **Щербаков, С. С.** Механика трибофатических систем / С. С. Щербаков, Л. А. Сосновский. – Минск : БГУ, 2010. – 407 с.
- 9 **Сосновский, Л. А.** Основы трибофатики : пособие к лекционному курсу : в 2 ч. / Л. А. Сосновский, В. В. Комиссаров. – Гомель : БелГУТ, 2005. – Ч. 1. – 164 с.
- 10 **Сосновский, Л. А.** Основы трибофатики : пособие к лекционному курсу : в 2 ч. / Л. А. Сосновский, В. В. Комиссаров, С. С. Щербаков. – Гомель : БелГУТ, 2008. – Ч. 2. – 216 с.
- 11 **Сосновский, Л. А.** L-Риск (механотермодинамика необратимых повреждений) / Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2004. – 317 с.
- 12 **Сосновский, Л. А.** Оценка надежности простого коленчатого вала : метод. указ. В 2 ч. Ч. 1. Надежность по отдельным критериям сопротивления усталости и износостойкости / Л. А. Сосновский, В. В. Скрежендевский, О. М. Еловой. – Гомель : БелГУТ, 1994. – 30 с.
- 13 **Богданович, А. В.** Оценка надежности простого коленчатого вала : пособие по курсу «Основы теории надежности». В 2 ч. Ч. 2. Надежность по критериям трибофатики / А. В. Богданович, О. М. Еловой, Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2002. – 30 с.
- 14 Машины серии СИ для износоусталостных испытаний. – Гомель, 2002. – 21 с.

##### Популярная литература

- 15 **Сосновский, Л. А.** Сюрпризы трибофатики / Л. А. Сосновский, С. С. Щербаков. – Гомель : БелГУТ, 2005. – 192 с.; **Sosnovskiy, L. A.** Surprises of Tribo-Fatigue / L. A. Sosnovskiy, S. S. Sherbakov. – Minsk : Magic Book, 2009. – 200 p.
- 16 Слово о трибофатике / ред.-сост. А. В. Богданович / авт.: В. И. Стражев, К. В. Фролов, М. С. Высоцкий, В. Т. Трошенко, Л. А. Сосновский, Н. А. Махутов, А. В. Кухарев, П. С. Грунтов, Э. И. Старовойтов, В. А. Марченко, В. Н. Корешков, В. А. Шуринов, Л. Р. Ботвина, Ю. Н. Дроз-



дов, М. И. Горбачевич, В. Г. Павлов, Д. Г. Эфрос. – Гомель – Минск – Москва – Киев : Remika, 1996. – 132 с.

17 Личность. Ученый. Поэт / под общ. ред. В. И. Сенько ; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 109 с.

18 Девять сюрпризов трибофатики // Наука и инновации. – 2010. – № 9 (91). – С. 5–28.

### Стандарты

19 Трибофатика. Термины и определения (Межгосударственный стандарт) : ГОСТ 30638–99. – Введ. 1999–06–17. – Мн. : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1999. – 17 с.

20 Трибофатика. Машины для износостойких испытаний. Общие технические требования (Межгосударственный стандарт) : ГОСТ 30755–2001. – Введ. 2002–07–01. – Мн. : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2002. – 8 с.

21 Трибофатика. Методы износостойких испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость (Межгосударственный стандарт) : ГОСТ 30754–2001. – Введ. 2002–07–01. – Мн. : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2002. – 32 с.

22 Трибофатика. Методы износостойких испытаний. Ускоренные испытания на контактно-механическую усталость (Стандарт Беларуси) : СТБ 1233–2000. – Введ. 2001–01–01. – Мн. : ГОССТАНДАРТ, 2000. – 8 с.

23 Трибофатика. Силовые системы. Статистические показатели качества (Стандарт Беларуси) : СТБ 1234–2000. – Введ. 2001–01–01. – Мн. : ГОССТАНДАРТ, 2000. – 25 с.

24 Трибофатика. Методы износостойких испытаний. Испытания на фрикционно-механическую усталость (Стандарт Беларуси) : СТБ 1448–2004. – Введ. 2004–09–01. – Мн. : ГОССТАНДАРТ, 2004. – 14 с.

### Словари. Библиографические указатели

25 Сосновский, Л. А. Механика усталостного разрушения : словарь-справ. : в 2 т. / Л. А. Сосновский. – Гомель : НПО «ТРИБОФАТИКА», 1994. – Т. 1. – 328 с.; Т. 2. – 340 с.

26 Трибофатика. Трыбафатэка. Tribo-fatigue. Tribo-ermüdung : четырехязычный терминологический словарь / под ред. Л. А. Сосновского, авт.-сост. : П. В. Андронов [и др.]. – Минск – Гомель : НПО «ТРИБОФАТИКА», 1996. – 138 с.

27 Трибофатика : библиографический указатель (1985–2005) / сост. С. А. Тюрин // Материалы V Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2005) / под ред. А. П. Хоменко. – Иркутск–Братск, 2005. – С. 69–116.

28 Трибофатика : библиографический указатель (1985–2015) / сост. С. А. Тюрин ; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 61 с.

### Литература по смежным дисциплинам

29 Старовойтов, Э. И. Сопротивление материалов / Э. И. Старовойтов. – Гомель : БелГУТ, 1999. – 232 с.

30 Богданович, П. Н. Трение и износ в машинах / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак. – Минск : Вышэйшая школа, 1999. – 374 с.

31 Трошенко, В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов : справ. : в 2 т. / В. Т. Трошенко, Л. А. Сосновский. – Киев : Наукова думка, 1987. – Т. 1. – 510 с.; Т. 2. – 825 с..

32 Сосновский, Л. А. Статистическая механика усталостного разрушения / Л. А. Сосновский. – Минск : Наука и техника, 1987. – 288 с.

33 Сосновский, Л. А. Элементы теории вероятностей, математической статистики и теории надежности / Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 1994. – 38 с.

34 Скойбеда, А. Т. Детали машин и основы проектирования / А. Т. Скойбеда, А. В. Кузьмин, Н. Н. Макейчик. – Минск : Вышэйшая школа, 2000. – 584 с.

35 Сосновский, Л. А. Вероятностные методы расчета на прочность при линейном и сложном напряженных состояниях / Л. А. Сосновский. – Гомель : БЕЛИИЖТ, 1984. – 74 с.

## Приложение Г

# ТРИБОФАТИКА. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ по ГОСТ 30638–99 с переводом на китайский язык

附录 II 摩擦疲劳学 术语与定义

## 附录 II 摩擦疲劳学 术语与定义

给概念作出准确而符合逻辑的定义,是真实学问的主要前提条件。

—Socrates

### 1 一般术语

#### General terms

#### Общие понятия

1.1 摩擦疲劳学:关于机器和设备中荷载摩擦副系统的磨损—疲劳损伤和断裂的科学。

tribo-fatigue: science concerned with wear-fatigue damages and fractures of active systems of machines and equipment.

трибофатика: наука об износостойких повреждениях и разрушении силовых систем машин и оборудования.

1.2 荷载摩擦副系统(AS):一类机械系统。在该系统中进行着任一形式的摩擦过程,同时还产生着和传递着交变负荷。

active system (AS): mechanical system in which any form of friction processes is realized and alternative load is taken up and transmitted through simultaneously.

силовая система: механическая система, в которой реализуется процесс трения в любых его проявлениях и которая одновременно воспринимает и транзитно передает повторно-переменную нагрузку.

1.3 基于摩擦疲劳学准则的可靠性:在规定时间内荷载摩擦副系统可靠性,它取决于荷载摩擦副系统在确定时间间隔中保持耐磨—疲劳性的能力。

reliability on tribo-fatigue criteria: reliability of an active system determined by its ability to remain values of wear-fatigue resistance characteristics in the established intervals during specified time.

надежность по критериям трибофатики: надежность силовой системы, обусловленная ее способностью сохранять во времени и в установленных пределах значения характеристик сопротивления износостойким повреждениям.

1.4 磨损—疲劳损伤(WFD):由于疲劳、摩擦、磨损和(或)侵蚀等现象的动力学交互作用而导致的损伤(图1)。

wear-fatigue damage (WFD): damage caused by the kinetic interaction of fatigue, friction, wear and/or erosion phenomena (figure 1).

износостойкое повреждение: повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений усталости, трения в любых его проявлениях, изнашивания и (или) эрозии (рисунок 1).

#### 摩擦疲劳学

交互作用导致的损伤(图1)。

wear-fatigue damage (WFD): damage caused by the kinetic interaction of fatigue, friction, wear and/or erosion phenomena (figure 1).

износостойкое повреждение: повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений усталости, трения в любых его проявлениях, изнашивания и (или) эрозии (рисунок 1).

中: 磨损—疲劳损伤 俄: ИЗНОСОСТОЙКОЕ ПОВРЕЖДЕНИЕ 英: wear-fatigue damage 德: Verschleiß- und Ermüdungsschaden
中: 机械—滚动疲劳 俄: Контактно-механическая усталость 英: mechano-rolling fatigue 德: kontakt-mechanische Ermüdung
中: 机械—滑动疲劳 俄: Фрикционно-механическая усталость 英: mechano-sliding fatigue 德: reib-mechanische Ermüdung
中: 振动疲劳 俄: Фрегатив-усталость 英: fretting fatigue 德: Schwingungsermüdung
中: 机械—腐蚀疲劳 俄: Коррозионно-механическая усталость 英: mechano-corrosion fatigue 德: mechano-chemische Ermüdung
中: 机械—侵蚀疲劳 俄: Эрозионно-механическая усталость 英: mechano-erosion fatigue 德: erosions-mechanische Ermüdung

图1 磨损—疲劳损伤的一般类型

Figure 1. General types of wear-fatigue damage

Рисунок 1. Основные виды износостойкого повреждения

1.5 耐磨—疲劳性:材料抵抗磨损—疲劳损伤的能力。

wear-fatigue resistance: ability of a material to withstand wear-fatigue damage.

сопротивление износостойственным повреждениям: свойство материала противостоять износостойственным повреждениям.

1.6 正向效应(DE):由于摩擦和磨损过程引起的荷载摩擦副系统和(或)它的元件的耐疲劳性能的变化。

direct effect (DE): changes of fatigue resistance characteristics of an active system and/or its elements produced by friction and wear processes.

прямой эффект: влияние процессов и условий трения и изнашивания на изменение характеристик сопротивления усталости силовой системы и/или ее элементов.

• 270 •

1.7 负向效应(BE):由于交变应力(应变)引起的荷载摩擦副系统和(或)它的元件的摩擦磨损特性的变化。

back effect (BE): changes of friction and wear characteristics of an active system and/ or its elements produced by alternative stresses (strains) .

обратный эффект: влияние повторно-переменных напряжений (деформаций) на изменение характеристик трения и изнашивания силовой системы и/или ее элементов.

1.8 磨损-疲劳试验(WFT):用于定量测定耐磨损-疲劳性的试验。

wear-fatigue tests (WFT): tests used to determine quantitative characteristics of wear-fatigue resistance.

износоусталостные испытания: испытания, при которых определяют количественные характеристики сопротивления износоусталостным повреждениям.

1.9 磨损-疲劳试验机:用于固定一个荷载摩擦副系统或它的模型,使该系统在预置条件和模式下遭受交变负荷与摩擦过程的复合作用,并提供所需的试验周期、测试和记录被试验系统的耐磨损-疲劳特性的机器。

wear-fatigue test machine, machine used for fastening an active system or its model, exposing the system to the complex effect of alternative loads and friction processes under prescribed conditions and modes, providing the required test longevity, measuring and recording its wear-fatigue resistance characteristics.

машина для износоусталостных испытаний: машина, предназначенная для закрепления силовой системы или ее модели, реализации комплексного воздействия на нее повторно-переменных нагрузок и процессов трения при заданных условиях и режимах, обеспечения требуемой продолжительности испытаний, измерения и регистрации характеристик сопротивления износоусталостным повреждениям.

1.10 机械-滚动疲劳(MRF):由于机械疲劳现象与滚动摩擦现象的动力学交互作用而导致的磨损-疲劳损伤。

mechano-rolling fatigue (MRF): wear-fatigue damage caused by the kinetic interaction of mechanical fatigue and rolling friction phenomena.

контактно-механическая усталость: износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и трения качения.

1.11 机械-滑动疲劳(MSF):由于机械疲劳现象与滑动摩擦现象的动力学交互作用而导致的磨损-疲劳损伤。

mechano-sliding fatigue (MSF): wear-fatigue damage caused by the kinetic interaction of mechanical fatigue and sliding friction phenomena.

фрикционно-механическая усталость: износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и трения скольжения.

1.12 机械-腐蚀疲劳(MCF):由于机械疲劳现象与腐蚀现象的动力学交互作用而导致的磨损-疲劳损伤。

mechano-corrosion fatigue (MCF): wear-fatigue damage caused by the kinetic interaction of the mechanical fatigue and corrosion phenomena.

• 271 •

## 摩擦疲劳学

коррозионно-механическая усталость: усталость материала при одновременном воздействии повторно-переменных напряжений и коррозионной среды.

1.13 微动疲劳(FE):由于机械疲劳现象与微动现象的动力学交互作用而导致的磨损-疲劳损伤。

fretting fatigue (FE): wear-fatigue damage caused by the kinetic interaction of mechanical fatigue and fretting phenomena.

фреттинг-усталость: износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и фреттинга.

1.14 机械侵蚀疲劳(MEF):由于机械疲劳现象与侵蚀现象的动力学交互作用而导致的磨损-疲劳损伤。

mechano-erosion fatigue (MEF): wear-fatigue damage caused by the kinetic interaction of the mechanical fatigue and erosion phenomena.

эрозионно-механическая усталость: износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и эрозии.

1.15 表面片屑(SC):在磨损-疲劳损伤过程中,由于荷载摩擦副系统的元件的横切面中多次发生微滑移和相互作用表面上晶粒破碎而引起材料的细小而分散的片屑的分离现象。

surface chipping (SC): detaching fine-dispersed particles of the material formed as a result of multiple microshift in intersecting planes and fragmentation of grains from interacting surfaces of active system's elements under wear-fatigue damage.

поверхностное крошение: отделение с поверхностей взаимодействия элементов силовой системы мелкодисперсных частиц материала, образующихся в результате множественного микросдвига по пересекающимся плоскостям и дробления зерен при износоусталостном повреждении.

1.16 受损体积,  $V_{Dp}$ :荷载摩擦副系统的元件工作体积中的一部分。在这部分中,作用的交变应力超出了极限应力离差的下边界,这种情况对应的置信度为  $\gamma$  时的疲劳损伤概率为  $P$ 。

damaged volume,  $V_{Dp}$ : part of the working volume of an active system's element within which acting cyclic stresses exceed the lower boundary of limiting stress dispersion with fatigue damage probability  $P$  found with confidence  $\gamma$ .

опасный объем,  $V_{Dp}$ : часть рабочего объема элемента силовой системы, в пределах которой с вероятностью  $P$ , соответствующей вероятности усталостного повреждения, установленной с доверительной вероятностью  $\gamma$ , действующие циклические напряжения превышают нижнюю границу рассеивания предельных напряжений.

1.17 受损表面,  $S_{Dp}$ :荷载摩擦副系统的元件工作表面层体积中的一部分。在这部分中,作用的接触应力超出了极限应力离差的下边界,这种情况对应的置信度为  $\gamma$  时的摩擦损伤概率为  $P$ 。

damaged surface,  $S_{Dp}$ : part of volume of the working surface layer of an active system's element within which acting contact stresses exceed the lower boundary of the

• 272 •

limiting stress dispersion with friction damage probability  $P$  found with confidence  $\gamma$ .

опасная поверхность,  $S_{Dp}$ : часть объема рабочего поверхностного слоя элемента силовой системы, в пределах которой с вероятностью  $P$ , соответствующей вероятности повреждения при трении, установленной с доверительной вероятностью  $\gamma$ , действующие контактные (фрикционные) напряжения превышают нижнюю границу рассеивания предельных напряжений.

1.18 综合受损体积,  $W_{Dp}$ :荷载摩擦副系统的元件工作体积中的一部分。在这部分中,存在着萌生和发展磨损-疲劳损伤的可能性,该体积为受损体积  $V_{Dp}$  和受损表面积  $S_{Dp}$  之和与交互作用函数  $\varphi_{vs}$  的乘积( $\varphi_{vs} \geq 1$ ),即

$$W_{Dp} = (V_{Dp} + S_{Dp}) \varphi_{vs}.$$

complex damaged volume,  $W_{Dp}$ : part of the working volume of an active system's element within which there is a possibility of initiating and developing of wear-fatigue damages, this volume being the sum of damaged volume  $V_{Dp}$  and damaged surface  $S_{Dp}$  multiplied by the interaction function  $\varphi_{vs} \geq 1$

$$W_{Dp} = (V_{Dp} + S_{Dp}) \varphi_{vs}.$$

комплексный опасный объем,  $W_{Dp}$ : часть рабочего объема элемента силовой системы, в пределах которой возможно возникновение и развитие износоусталостных повреждений, определяемая как объединение опасного объема  $V_{Dp}$  и опасной поверхности  $S_{Dp}$ , умноженная на функцию взаимодействия  $\varphi_{vs} \geq 1$

$$W_{Dp} = (V_{Dp} + S_{Dp}) \varphi_{vs}.$$

1.19 荷载摩擦副的极限状态:由于以下的一个或多个同时出现的征兆而导致的荷载摩擦副系统非运行状态:达到了磨损极限值,形成了散布的达到临界尺寸的裂纹或达到临界密度的剥落的凹坑(点蚀),产生了超过形位公差变形,构成了由腐蚀引起的危险的薄层损伤,出现了表面波状塑性变形,形成了一定长度的主裂纹,产生了元件断裂。

limiting state of an active system: inoperative state of an active system manifested by one or several signs simultaneously: achievement limiting value of wear, formation of scattered cracks or spalling stains (pittings) of critical size or critical concentration, achievement intolerable value of residual deformation, generation a critically thick layer damaged by corrosion, appearance of the surface waves of plasticity, formation of a main crack of certain length, fracture of elements.

предельное состояние силовой системы: неработоспособное состояние силовой системы по одному или одновременно нескольким признакам: достижению износом предельного значения, образованию рассеянных трещин или вмяк выкрашивания (питтингов) критических размеров или критической концентрации, достижению остаточной деформацией недопустимой величины, образованию слоя коррозионного повреждения критической толщины, появлению поверхностных волн пластичности, образованию магистральной трещины определенной длины, разрушению элементов.

1.20 荷载摩擦副系统的寿命:在规定条件下,荷载摩擦副系统在试验中或运行中达到极限状态所经历的时间。

• 273 •

## 摩擦疲劳学

active system life, duration of active system testing or operation under specified conditions until it reaches the limiting state.

долговечность силовой системы: продолжительность испытания или эксплуатации силовой системы в заданных условиях до наступления ее предельного состояния.

## 2 荷载摩擦副系统的摩擦特性

## Friction characteristics in an active system

## Характеристики трения в силовой системе

2.1 荷载摩擦副系统的摩擦力,  $F_{f0}$ :一个摩擦组件或它的元件中与交变负荷作用有关的摩擦力,即

$$F_{f0} = F_f \varphi(\sigma).$$

friction force in an active system,  $F_{f0}$ : friction force, defined upon alternating load activity in a friction joint or its elements

$$F_{f0} = F_f \varphi(\sigma).$$

сила трения в силовой системе,  $F_{f0}$ : сила трения, определяемая с учетом действия на пару трения или на один из ее элементов повторно-переменной нагрузки.

$$F_{f0} = F_f \varphi(\sigma).$$

2.2 摩擦力的交变分量,  $F_{c0}$ :一个荷载摩擦副系统中,因存在于摩擦副一方或双方中的交变应力(应变)引起的摩擦力分量。

cyclic component of a friction force,  $F_{c0}$ : component of a friction force in an active system caused by cyclic stresses (strains) in one or both its elements.

циклическая составляющая силы трения,  $F_{c0}$ : составляющая силы трения в силовой системе, обусловленная циклическими напряжениями (деформациями) в одном или обоих ее элементах.

2.3 荷载摩擦副系统的摩擦系数,  $f_0$ :荷载摩擦副系统的摩擦力与接触负荷之比,该接触负荷在摩擦过程中使摩擦副双方彼此压紧,即

$$f_0 = F_{f0} / F_{N0}.$$

friction coefficient in an active system,  $f_0$ : ratio of friction force in an active system and contact load pressing its elements to each other during friction process

$$f_0 = F_{f0} / F_{N0}.$$

коэффициент трения в силовой системе,  $f_0$ : отношение силы трения в силовой системе к контактной нагрузке, прижимающей ее элементы друг к другу в процессе трения движения

$$f_0 = F_{f0} / F_{N0}.$$

• 274 •

2.4 摩擦系数的交变分量,  $f_c$ : 摩擦力的交变分量与接触负荷之比值, 即

$$f_c = F_c / F_N$$

cyclic component of a friction coefficient,  $f_c$ : ratio of cyclic component of a friction force and contact load

$$f_c = F_c / F_N$$

циклическая составляющая коэффициента трения,  $f_c$ : отношение циклической составляющей силы трения к контактной нагрузке

$$f_c = F_c / F_N$$

3 磨损—疲劳损伤特性

Wear-fatigue damage characteristics

Характеристики сопротивления износоусталостным повреждениям

3.1 机械—滚动疲劳曲线,  $N(\sigma_c, p_0 = \text{const})$ ,  $N(p_0, \sigma_c = \text{const})$ : 机械—滚动疲劳曲线有两种, 一种是关于荷载摩擦副系统的同一样本的交变应力幅值  $\sigma_c$  与疲劳寿命的关系曲线, 即  $N_p$  曲线, 它是在滚动摩擦条件下接触应力  $p_0$  为常数的情况下绘制的 [参见图 2(a)]; 另一种是关于荷载摩擦副系统的同一样本的滚动摩擦条件下接触应力  $p_0$  与滚动疲劳寿命的关系曲线, 即  $N_\sigma$  曲线, 它是在交变应力幅值  $\sigma_c$  为常数的情况下绘制的 [参见图 2(b)].

mechano-rolling fatigue curve,  $N(\sigma_c, p_0 = \text{const})$ ,  $N(p_0, \sigma_c = \text{const})$ : either a graph of cycle stress amplitude  $\sigma_c$  versus fatigue life,  $N_p$ , for the same models of an active system plotted with respect to contact stress under rolling friction  $p_0 = \text{const}$  (figure 2, a), or a graph of contact stress  $p_0$  under rolling friction versus rolling fatigue life,  $N_\sigma$ , for the same models of an active system plotted with respect to cycle stress amplitude  $\sigma_c = \text{const}$  (figure 2, b).

кривая контактно-механической усталости,  $N(\sigma_c, p_0 = \text{const})$ ,  $N(p_0, \sigma_c = \text{const})$ : график, характеризующий зависимость между амплитудой напряжений цикла  $\sigma_c$  и циклической долговечностью  $N_p$  для одинаковых моделей силовой системы, построенный по параметру контактных напряжений при трении качения  $p_0 = \text{const}$  (рисунок 2, a), либо график, характеризующий зависимость между контактными напряжениями при трении качения  $p_0$  и контактной долговечностью  $N_\sigma$  для одинаковых моделей силовой системы, построенный по параметру амплитуды напряжений цикла  $\sigma_c = \text{const}$  (рисунок 2, b).

3.2 机械—滚动疲劳极限,  $\sigma_{-1p}$ ,  $p_{fR}$ : 关于滚动摩擦接触应力参数的疲劳极限  $\sigma_{-1p}$  [参见图 2(a)], 或关于交变应力幅值参数的滚动疲劳极限  $p_{fR}$  [参见图 2(b)].

mechano-rolling fatigue limit,  $\sigma_{-1p}$ ,  $p_{fR}$ : fatigue limit on parameter of contact stress under rolling friction,  $\sigma_{-1p}$  (figure 2, a), or rolling fatigue limit on parameter of cycle stress

• 275 •

turning point of mechano-rolling fatigue curve,  $N_{p0c}$ ,  $N_{\sigma c}$ : turning point of mechanical fatigue curve, plotted on parameter of contact stresses under rolling friction,  $N_{p0c}$  (figure 2, a), or turning point of rolling fatigue curve, plotted on parameter of cycle stresses amplitude,  $N_{\sigma c}$  (figure 2, b).

абсцисса точки перелома кривой контактно-механической усталости,  $N_{p0c}$ ,  $N_{\sigma c}$ : абсцисса точки перелома кривой механической усталости, построенной по параметру контактных напряжений при трении качения,  $N_{p0c}$  (рисунок 2, a), либо абсцисса точки перелома кривой контактной усталости, построенной по параметру амплитуды напряжений цикла,  $N_{\sigma c}$  (рисунок 2, b).

3.5 机械—滚动疲劳曲线的指数,  $m_{rp}$ ,  $m_{rs}$ : 关于滚动摩擦接触应力参数的机械疲劳曲线的指数  $m_{rp}$  [参见图 2(a)], 或关于交变应力幅值参数的滚动疲劳曲线的指数  $m_{rs}$  [参见图 2(b)].

mechano-rolling fatigue curve exponent,  $m_{rp}$ ,  $m_{rs}$ : mechanical fatigue curve exponent, plotted on parameter of contact stresses under rolling friction,  $m_{rp}$  (figure 2, a), or rolling fatigue curve exponent, plotted on parameter of cycle stresses amplitude,  $m_{rs}$  (figure 2, b).

показатель наклона кривой контактно-механической усталости,  $m_{rp}$ ,  $m_{rs}$ : показатель наклона кривой механической усталости, построенной по параметру контактных напряжений при трении качения,  $m_{rp}$  (рисунок 2, a), либо показатель наклона кривой контактной усталости, построенной по параметру амплитуды напряжений цикла,  $m_{rs}$  (рисунок 2, b).

3.6 机械—滑动疲劳曲线,  $N(\sigma_s, \tau_w = \text{const})$ ,  $N(\tau_w, \sigma_s = \text{const})$ : 机械滑动疲劳曲线有两种, 一种是关于荷载摩擦副系统的同一样本的交变应力幅值  $\sigma_s$  与交变疲劳寿命的关系曲线, 即  $N_\tau$  曲线, 它是在滑动摩擦条件下摩擦应力  $\tau_w$  为常数的情况下绘制的 [参见图 3(a)]; 另一种是关于荷载摩擦副系统的同一样本的滑动摩擦条件下的摩擦应力  $\tau_w$  与滑动疲劳寿命的关系曲线, 即  $N_\sigma$  曲线, 它是在交变应力幅值  $\sigma_s$  为常数的情况下绘制的 [参见图 3(b)].

mechano-sliding fatigue curve,  $N(\sigma_s, \tau_w = \text{const})$ ,  $N(\tau_w, \sigma_s = \text{const})$ : graph of cycle stress amplitude,  $\sigma_s$ , versus cyclic fatigue life,  $N_\tau$ , for the same models of an active system plotted with respect to friction stress under sliding friction,  $\tau_w = \text{const}$  (figure 3, a), or graph of friction stress under sliding friction,  $\tau_w$  versus sliding fatigue life,  $N_\sigma$ , for the same models of an active system plotted with respect to cycle stress amplitude  $\sigma_s = \text{const}$  (figure 3, b).

кривая фрикционно-механической усталости,  $N(\sigma_s, \tau_w = \text{const})$ ,  $N(\tau_w, \sigma_s = \text{const})$ : график, характеризующий зависимость между амплитудой напряжений цикла  $\sigma_s$  и циклической долговечностью  $N_\tau$  для одинаковых моделей силовой системы, построенный по параметру фрикционных напряжений при трении скольжения  $\tau_w = \text{const}$  (рисунок 3, a), либо график, характеризующий зависимость между фрикционными напряжениями при трении скольжения  $\tau_w$  и фрикционной долговечностью  $N_\sigma$  для одинаковых моделей силовой системы, построенный по параметру амплитуды напряжений цикла  $\sigma_s = \text{const}$  (рисунок 3, b).

• 277 •

摩擦疲劳学

amplitude,  $p_0$  (figure 2, b).

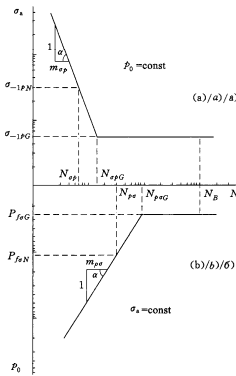


图 2 机械—滚动疲劳曲线示意图

Figure 2. Schemes of mechano-rolling fatigue curves

Рисунок 2. Схемы кривых контактно-механической усталости

предел контактно-механической выносливости,  $\sigma_{-1p}$ ,  $p_{fR}$ : предел выносливости по параметру контактных напряжений при трении качения,  $\sigma_{-1p}$  (рисунок 2, a), либо предел контактной выносливости по параметру амплитуды напряжений цикла,  $p_{fR}$  (рисунок 2, b).

3.3 循环 N 次的机械—滚动疲劳极限,  $\sigma_{-1pN}$ ,  $p_{fRN}$ : 关于滚动摩擦接触应力参数的疲劳门限值  $\sigma_{-1pN}$  [参见图 2(a)], 或关于交变应力幅值参数的滚动疲劳门限值  $p_{fRN}$  [参见图 2(b)].

mechano-rolling fatigue limit at N cycles,  $\sigma_{-1pN}$ ,  $p_{fRN}$ : fatigue threshold on parameter of contact stresses under rolling friction,  $\sigma_{-1pN}$  (figure 2, a), or rolling fatigue threshold on parameter of cycle stresses amplitude,  $p_{fRN}$  (figure 2, b).

предел ограниченной контактно-механической усталости,  $\sigma_{-1pN}$ ,  $p_{fRN}$ : предел ограниченной усталости по параметру контактных напряжений при трении качения,  $\sigma_{-1pN}$  (рисунок 2, a), либо предел ограниченной контактной усталости по параметру амплитуды напряжений цикла,  $p_{fRN}$  (рисунок 2, b).

3.4 机械—滚动疲劳曲线的拐点,  $N_{p0c}$ ,  $N_{\sigma c}$ : 关于滚动摩擦接触应力参数的机械疲劳曲线的拐点  $N_{p0c}$  [参见图 2(a)], 或关于交变应力幅值参数的滚动疲劳曲线的拐点  $N_{\sigma c}$  [参见图 2(b)].

• 276 •

摩擦疲劳学

6).

3.7 机械—滑动疲劳极限,  $\sigma_{-1\tau}$ ,  $\tau_{fS}$ : 关于滑动摩擦接触应力参数的疲劳极限  $\sigma_{-1\tau}$  [参见图 3(a)], 或关于交变应力幅值参数的滑动疲劳极限  $\tau_{fS}$  [参见图 3(b)].

mechano-sliding fatigue limit,  $\sigma_{-1\tau}$ ,  $\tau_{fS}$ : fatigue limit on parameter of contact stresses under sliding friction,  $\sigma_{-1\tau}$  (figure 3, a), or sliding fatigue limit on parameter of cycle stress amplitude,  $\tau_{fS}$  (figure 3, b).

предел фрикционно-механической выносливости,  $\sigma_{-1\tau}$ ,  $\tau_{fS}$ : предел выносливости по параметру фрикционных напряжений при трении скольжения,  $\sigma_{-1\tau}$  (рисунок 3, a), либо предел фрикционной выносливости по параметру амплитуды напряжений цикла,  $\tau_{fS}$  (рисунок 3, b).

3.8 循环 N 次的机械—滑动疲劳极限,  $\sigma_{-1\tau N}$ ,  $\tau_{fSN}$ : 关于滑动摩擦接触应力参数的疲劳门限值  $\sigma_{-1\tau N}$  [参见图 3(a)], 或关于交变应力幅值参数的滑动疲劳门限值  $\tau_{fSN}$  [参见图 3(b)].

mechano-sliding fatigue limit at N cycles,  $\sigma_{-1\tau N}$ ,  $\tau_{fSN}$ : fatigue threshold on parameter of contact stresses under sliding friction,  $\sigma_{-1\tau N}$  (figure 3, a), or sliding fatigue threshold on parameter of cycle stresses amplitude,  $\tau_{fSN}$  (figure 3, b).

предел ограниченной фрикционно-механической усталости,  $\sigma_{-1\tau N}$ ,  $\tau_{fSN}$ : предел ограниченной усталости по параметру фрикционных напряжений при трении скольжения,  $\sigma_{-1\tau N}$  (рисунок 3, a), либо предел ограниченной фрикционной усталости по параметру амплитуды напряжений цикла,  $\tau_{fSN}$  (рисунок 3, b).

3.9 机械—滑动疲劳曲线的拐点,  $N_{\sigma c}$ ,  $N_{\tau c}$ : 关于滑动摩擦接触应力参数的机械疲劳曲线的拐点  $N_{\sigma c}$  [参见图 3(a)], 或关于交变应力幅值参数的滑动疲劳曲线的拐点  $N_{\tau c}$  [参见图 3(b)].

turning point of mechano-sliding fatigue curve: turning point of mechanical fatigue curve, plotted on parameter of contact stresses under sliding friction,  $N_{\sigma c}$  (figure 3, a), or turning point of sliding fatigue curve, plotted on parameter of cycle stresses amplitude,  $N_{\tau c}$  (figure 3, b).

абсцисса точки перелома кривой фрикционно-механической усталости,  $N_{\sigma c}$ ,  $N_{\tau c}$ : абсцисса точки перелома кривой механической усталости, построенной по параметру фрикционных напряжений при трении скольжения,  $N_{\sigma c}$  (рисунок 3, a), либо абсцисса точки перелома кривой фрикционной усталости, построенной по параметру амплитуды напряжений цикла,  $N_{\tau c}$  (рисунок 3, b).

3.10 机械—滑动疲劳曲线的指数,  $m_{rs}$ ,  $m_{\tau s}$ : 关于滑动摩擦接触应力参数的机械疲劳曲线的指数  $m_{rs}$  [参见图 3(a)], 或关于交变应力幅值参数的滑动疲劳曲线的指数  $m_{\tau s}$  [参见图 3(b)].

mechano-sliding fatigue curve exponent,  $m_{rs}$ ,  $m_{\tau s}$ : mechanical fatigue curve exponent, plotted on parameter of contact stresses under sliding friction,  $m_{rs}$  (figure 3, a), or sliding fatigue curve exponent, plotted on parameter of cycle stresses amplitude,  $m_{\tau s}$  (figure 3, b).

показатель наклона кривой фрикционно-механической усталости,  $m_{rs}$ ,  $m_{\tau s}$ : показатель наклона кривой механической усталости, построенной по параметру фрикционных напряжений при трении скольжения,  $m_{rs}$  (рисунок 3, a), либо показатель

• 278 •

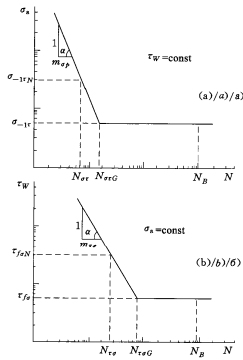


图 3 机械-滑动疲劳曲线示意图  
Figure 3. Schemes of mechano-sliding fatigue curves  
Рисунок 3. Схемы кривых фрикционно-механической усталости

наклона кривой фрикционной усталости, построенной по параметру амплитуды напряжений цикла,  $m_a$  (рисунок 3.б).

**3.11 荷载摩擦副系统的极限状态曲线:** 在考虑耐疲劳性、耐磨性和耐磨损-疲劳性准则的情况下, 为荷载摩擦副系统极限状态描述的关于交变应力幅值与接触压力关系的曲线。

**Limiting states diagram of an active system:** graph of cycle stress amplitude versus contact pressure for the limiting states of an active system with respect to fatigue resistance, wear resistance and wear-fatigue resistance criteria.

**диаграмма предельных состояний силовой системы:** график, характеризующий зависимость между амплитудой напряжений цикла и контактными давлением для предельных состояний силовой системы по критериям сопротивления усталости, износостойкости и сопротивления износоусталостным повреждениям.

**3.12 正向效应指数,  $K_{Dp}, K_{Dn}$ :** 对于机械-滚动疲劳, 定义机械-滚动疲劳极限  $\sigma_{-1p}$  与机械疲劳极限  $\sigma_{-1}$  之无量纲的比值  $(\sigma_{-1p}/\sigma_{-1})$  为正向效应指数  $K_{Dp}$ ; 对于机械-滑动疲劳, 则定义机械-滑动疲劳极限  $\sigma_{-1s}$  与机械疲劳极限  $\sigma_{-1}$  之无量纲的比值  $(\sigma_{-1s}/\sigma_{-1})$  为正向效应指数  $K_{Dn}$ , 即

$$K_{Dp} = \sigma_{-1p} / \sigma_{-1},$$

$$K_{Dn} = \sigma_{-1s} / \sigma_{-1}.$$

• 279 •

摩擦疲劳学

**direct effect index,  $K_{Dp}, K_{Dn}$ :** dimensionless value defined as a ratio of either mechano-rolling fatigue limit,  $\sigma_{-1p}$ , or mechano-sliding fatigue limit,  $\sigma_{-1s}$ , to mechanical fatigue limit,  $\sigma_{-1}$ :

$$K_{Dp} = \sigma_{-1p} / \sigma_{-1},$$

$$K_{Dn} = \sigma_{-1s} / \sigma_{-1}.$$

**коэффициент прямого эффекта,  $K_{Dp}, K_{Dn}$ :** безразмерная величина, определяемая как отношение предела контактно-механической  $\sigma_{-1p}$  либо фрикционно-механической  $\sigma_{-1s}$  выносливости к пределу выносливости при механической усталости  $\sigma_{-1}$

$$K_{Dp} = \sigma_{-1p} / \sigma_{-1},$$

$$K_{Dn} = \sigma_{-1s} / \sigma_{-1}.$$

**3.13 负向效应指数,  $K_{Bp}, K_{Bn}$ :** 对于机械-滚动疲劳, 定义机械-滚动疲劳极限  $\rho_f$  与滚动疲劳极限  $\rho_f$  之无量纲的比值  $(\rho_f / \rho_f)$  为负向作用指数  $K_{Bp}$ ; 对于机械-滑动疲劳, 则定义机械-滑动疲劳极限  $\tau_f$  与滑动疲劳极限  $\tau_f$  之无量纲的比值  $(\tau_f / \tau_f)$  为负向作用指数  $K_{Bn}$ , 即

$$K_{Bp} = \rho_f / \rho_f,$$

$$K_{Bn} = \tau_f / \tau_f.$$

**back effect index,  $K_{Bp}, K_{Bn}$ :** dimensionless value defined as a ratio of mechano-rolling fatigue limit,  $\rho_f$ , or mechano-sliding fatigue limit,  $\tau_f$ , to either rolling fatigue limit,  $\rho_f$ , or sliding fatigue limit,  $\tau_f$

$$K_{Bp} = \rho_f / \rho_f,$$

$$K_{Bn} = \tau_f / \tau_f.$$

**коэффициент обратного эффекта,  $K_{Bp}, K_{Bn}$ :** безразмерная величина, определяемая как отношение предела контактно-механической  $\rho_f$  либо фрикционно-механической  $\tau_f$  выносливости к пределу выносливости при контактной  $\rho_f$  либо фрикционной  $\tau_f$  усталости

$$K_{Bp} = \rho_f / \rho_f,$$

$$K_{Bn} = \tau_f / \tau_f.$$

**3.14 磨损-疲劳损伤控制参数,  $\Psi_{-1p}, \Psi_{-1s}$ :** 无量纲值, 它被定义为关于滚动摩擦接触应力参数的疲劳极限  $\sigma_{-1p}$  与关于交变应力参数的滚动疲劳极限  $\rho_f$  之比  $(\sigma_{-1p} / \rho_f)$ , 或关于滑动摩擦接触应力参数的疲劳极限  $\sigma_{-1s}$  与关于交变应力参数的滑动疲劳极限  $\tau_f$  之比  $(\sigma_{-1s} / \tau_f)$ , 即

$$\Psi_{-1p} = \sigma_{-1p} / \rho_f,$$

$$\Psi_{-1s} = \sigma_{-1s} / \tau_f.$$

**governing parameter of Wear-Fatigue damage,  $\Psi_{-1p}, \Psi_{-1s}$ :** dimensionless value defined either ratio of fatigue limit on parameter of contact stresses under rolling friction  $\sigma_{-1p}$  to rolling fatigue limit on parameter of cycle stresses  $\rho_f$ , or ratio of fatigue limit on parameter of contact stresses under sliding friction  $\sigma_{-1s}$  to sliding fatigue limit on parameter of cycle stresses  $\tau_f$ .

$$\Psi_{-1p} = \sigma_{-1p} / \rho_f,$$

$$\Psi_{-1s} = \sigma_{-1s} / \tau_f.$$

**управляющий параметр износоусталостного повреждения,  $\Psi_{-1p}, \Psi_{-1s}$ :**

• 280 •

безразмерная величина, определяемая либо как отношение предела выносливости по параметру контактных напряжений при трении качения  $\sigma_{-1p}$  к пределу контактной выносливости по параметру амплитуды напряжений цикла  $\rho_f$ , либо как отношение предела выносливости по параметру фрикционных напряжений при трении скольжения  $\sigma_{-1s}$  к пределу фрикционной выносливости по параметру амплитуды напряжений цикла  $\tau_f$

$$\Psi_{-1p} = \sigma_{-1p} / \rho_f,$$

$$\Psi_{-1s} = \sigma_{-1s} / \tau_f.$$

**3.15 磨损-疲劳损伤控制参数门限值,  $\Psi_{Dp}, \Psi_{Ds}$ :** 磨损-疲劳损伤(WFD)控制参数的值, 它被定义为机械疲劳的极限应力  $\sigma_{-1}$  与滚动疲劳极限  $\rho_f$  或滑动疲劳极限  $\tau_f$  之比, 即

$$\Psi_{Dp} = \sigma_{-1} / \rho_f,$$

$$\Psi_{Ds} = \sigma_{-1} / \tau_f.$$

**governing parameter threshold of Wear-Fatigue damage,  $\Psi_{Dp}, \Psi_{Ds}$ :** value of governing parameter of WFD defined as ratio of limiting stresses under mechanical fatigue  $\sigma_{-1}$  to rolling  $\rho_f$  or sliding  $\tau_f$  fatigue limit

$$\Psi_{Dp} = \sigma_{-1} / \rho_f,$$

$$\Psi_{Ds} = \sigma_{-1} / \tau_f.$$

**граничное значение управляющего параметра износоусталостного повреждения,  $\Psi_{Dp}, \Psi_{Ds}$ :** значение управляющего параметра износоусталостного повреждения, определяемое как отношение предельных напряжений при механической  $\sigma_{-1}$  и контактной  $\rho_f$  либо фрикционной  $\tau_f$  усталости

$$\Psi_{Dp} = \sigma_{-1} / \rho_f,$$

$$\Psi_{Ds} = \sigma_{-1} / \tau_f.$$

**3.16 相对受损体积,  $\omega_{VP}$ :** 荷载摩擦副系统的元件疲劳损伤程度, 它被定义为受损物体积  $V_{VP}$  与工作体积  $V_0$  之比, 即

$$\omega_{VP} = V_{VP} / V_0,$$

$$0 \leq \omega_{VP} \leq 1.$$

**relative damaged volume,  $\omega_{VP}$ :** extent of fatigue damage of an active system's element defined as a ratio of damaged volume,  $V_{VP}$ , to its working volume  $V_0$

$$\omega_{VP} = V_{VP} / V_0,$$

$$0 \leq \omega_{VP} \leq 1.$$

**относительный опасный объем,  $\omega_{VP}$ :** мера усталостного повреждения элемента силовой системы, определяемая как отношение опасного объема  $V_{VP}$  к его рабочему объему  $V_0$

$$\omega_{VP} = V_{VP} / V_0,$$

$$0 \leq \omega_{VP} \leq 1.$$

**3.17 相对受损表面积,  $\omega_{SP}$ :** 荷载摩擦副系统的元件在滑动摩擦或滚动摩擦条件下的疲劳损伤程度, 它被定义为为受损表面积  $S_{SP}$  与工作面积  $S_0$  之比, 即

$$\omega_{SP} = S_{SP} / S_0,$$

$$0 \leq \omega_{SP} \leq 1.$$

• 281 •

摩擦疲劳学

**relative damaged surface,  $\omega_{SP}$ :** extent of damage of an active system's element under friction (sliding or rolling) defined as a ratio of damaged surface,  $S_{SP}$ , to its working surface,  $S_0$

$$\omega_{SP} = S_{SP} / S_0,$$

$$0 \leq \omega_{SP} \leq 1.$$

**относительная опасная поверхность,  $\omega_{SP}$ :** мера поврежденности элемента силовой системы при трении, определяемая как отношение опасной поверхности  $S_{SP}$  к его рабочей поверхности  $S_0$

$$\omega_{SP} = S_{SP} / S_0,$$

$$0 \leq \omega_{SP} \leq 1.$$

**3.18 相对受损损伤范围,  $\omega_{WP}$ :** 磨损-疲劳损伤程度, 它被定义为综合受损物体积  $W_{WP}$  与荷载摩擦副系统的元件的工作体积  $V_0$  之比, 即

$$\omega_{WP} = W_{WP} / V_0,$$

$$0 \leq \omega_{WP} \leq 1.$$

**relative damaged zone,  $\omega_{WP}$ :** extent of wear-fatigue damage defined as a ratio of complex damaged volume,  $W_{WP}$ , to the working volume of an active system's element  $V_0$

$$\omega_{WP} = W_{WP} / V_0,$$

$$0 \leq \omega_{WP} \leq 1.$$

**относительная опасная зона,  $\omega_{WP}$ :** мера износоусталостного повреждения, определяемая как отношение комплексного опасного объема  $W_{WP}$  к рабочему объему элемента силовой системы  $V_0$

$$\omega_{WP} = W_{WP} / V_0,$$

$$0 \leq \omega_{WP} \leq 1.$$

**3.19 磨损-疲劳损伤相似性判据,  $\Pi_{SK}$ :** 无量纲参数, 它被定义为任意荷载摩擦副系统的元件综合受损物体积  $W_{SP}$  与一个标准的荷载摩擦副系统模型的相同元件的工作体积  $V_s$  之间的比值, 即

$$\Pi_{SK} = W_{SP} / V_s.$$

**similarity criterion of Wear-Fatigue damage,  $\Pi_{SK}$ :** dimensionless parameter defines as ratio of complex damage volume  $W_{SP}$  of element of any active system to working volume of the same element of an active system model  $V_s$  which is standard one

$$\Pi_{SK} = W_{SP} / V_s.$$

**критерий подбора износоусталостных повреждений,  $\Pi_{SK}$ :** безразмерный параметр, определяемый как отношение комплексного опасного объема  $W_{SP}$  элемента любой силовой системы к рабочему объему аналогичного элемента модельной силовой системы  $V_s$ , которая принимается в качестве стандартной

$$\Pi_{SK} = W_{SP} / V_s.$$

**3.20 荷载摩擦副系统的磨损,  $i_s$ :** 由任何一种摩擦过程与交变负荷同时作用而导致的磨损, 即

$$i_s = i_s(\sigma).$$

• 282 •

**wear of an active system**  $I_w$ : wear caused by any form of friction processes and cyclic loading simultaneously

$$i_w = i_w \varphi_1(\sigma)$$

**износ силовой системы**  $I_w$ : износ, обусловленный процессами трения (в любых его проявлениях) и циклического нагружения одновременно

$$i_w = i_w \varphi_1(\sigma)$$

**3.21 荷载摩擦副系统的磨损强度**  $I_w$ : 由任何一种摩擦过程与交变负荷同时作用而导致的磨损强度, 即

$$I_w = I_w \varphi_2(\sigma)$$

**wear intensity of an active system**  $I_w$ : wear intensity caused by any form of friction processes and cyclic loading simultaneously

$$I_w = I_w \varphi_2(\sigma)$$

**интенсивность изнашивания силовой системы**  $I_w$ : интенсивность изнашивания, обусловленная процессами трения (в любых его проявлениях) и циклического нагружения одновременно

$$I_w = I_w \varphi_2(\sigma)$$

**3.22 荷载摩擦副系统的耐磨性级别**: 磨损—疲劳损伤(WFD)特性, 它由荷载摩擦副系统在其试验或测试条件下的磨损强度变化区间所定义(表 1)。

表 1 荷载摩擦副系统的耐磨性级别

级 别	A	B	C
$I_w$	$<10^{-7}$	$10^{-7} \sim 10^{-5}$	$>10^{-5}$
$\lg(1/I_w)$	$>7$	$7 \sim 5$	$<5$

**wear resistance group of an active system**: characteristic of WFD defined by interval of changing of wear intensity of an active system under its testing or exploration (table 1).

Table 1 wear resistance group of an active system

Group	A	B	C
$I_w$	$<10^{-7}$	$10^{-7} \dots 10^{-5}$	$>10^{-5}$
$\lg(1/I_w)$	$>7$	$7 \dots 5$	$<5$

**группа износостойкости силовой системы**: характеристика износостойкости повреждения, определяемая интервалом изменения интенсивности изнашивания силовой системы при ее испытаниях или эксплуатации (таблица 1).

机械—腐蚀疲劳	1.12
机械—滚动疲劳	1.10
机械—滚动疲劳极限	3.2
机械—滚动疲劳曲线	3.1
机械—滚动疲劳曲线的拐点	3.4
机械—滚动疲劳曲线的指数	3.5
机械—滑动疲劳	1.11
机械—滑动疲劳极限	3.7
机械—滑动疲劳曲线	3.6
机械—滑动疲劳曲线的拐点	3.9
机械—滑动疲劳曲线的指数	3.10
机械—浸蚀疲劳	1.14
摩擦力的交变分量	2.2
摩擦疲劳学	1.1
磨损—疲劳试验	1.8
磨损—疲劳试验机	1.9
磨损—疲劳损伤	1.4
磨损—疲劳损伤控制参数	3.14
磨损—疲劳损伤控制参数门槛值	3.15
磨损—疲劳损伤相似性判据	3.19
摩擦系数的交变分量	2.4

耐磨损—疲劳性	1.5
受损伤面积	1.17
受损伤体积	1.16

• 283 •

• 285 •

#### 摩擦疲劳学

таблица 1 группа износостойкости силовой системы			
Группа	A	B	C
$I_w$	$<10^{-7}$	$10^{-7} \dots 10^{-5}$	$>10^{-5}$
$\lg(1/I_w)$	$>7$	$7 \dots 5$	$<5$

## 4 字母顺序索引

### Alphabetical index

### Алфавитные указатели терминов

#### 4.1 中文拼音字母顺序索引

表面片屑	1.15
负向效应	1.7
负向效应指数	3.13
荷载摩擦副系统	1.2
荷载摩擦副系统的极限状态	1.19
荷载摩擦副系统的极限状态曲线	3.11
荷载摩擦副系统的磨损	3.20
荷载摩擦副系统的摩擦力	2.1
荷载摩擦副系统的磨损强度	3.21
荷载摩擦副系统的摩擦系数	2.3
荷载摩擦副系统的耐磨性级别	3.22
荷载摩擦副系统的寿命	1.20
基于摩擦疲劳学准则的可靠性	1.3

• 284 •

#### 摩擦疲劳学

微动疲劳	1.13
相对受损伤范围	3.18
相对受损伤面积	3.17
相对受损伤体积	3.16
循环 N 次的机械—滚动疲劳极限	3.3
循环 N 次的机械—滑动疲劳极限	3.8
正向效应	1.6
正向效应指数	3.12
综合受损伤体积	1.18

#### 4.2 英文字母顺序索引

##### English alphabetical index

active system	1.2
active system life	1.20
back effect	1.7
back effect index	3.13
complex damaged volume	1.18
cyclic component of the friction coefficient	2.4
cyclic component of the friction force	2.2
damaged surface	1.17
damaged volume	1.16
direct effect	1.6

• 286 •



direct effect index	3.12
fretting fatigue	1.13
friction coefficient in an active system	2.3
friction force in an active system	2.1
governing parameter of wear-fatigue damage	3.14
governing parameter threshold of wear-fatigue damage	3.15
limiting states diagram of an active system	3.11
limiting state of an active system	1.19
mechano-corrosion fatigue	1.12
mechano-erosion fatigue	1.14
mechano-rolling fatigue	1.10
mechano-rolling fatigue curve	3.1
mechano-rolling fatigue curve exponent	3.5
mechano-rolling fatigue limit	3.2
mechano-rolling fatigue limit at N cycles	3.3
mechano-sliding fatigue	1.11
mechano-sliding fatigue curve	3.6
mechano-sliding fatigue curve exponent	3.10
mechano-sliding fatigue limit	3.7
mechano-sliding fatigue limit at N cycles	3.8
relative damaged surface	3.17
relative damaged volume	3.16
relative damaged zone	3.18

• 287 •

## 摩擦疲劳学

reliability on tribo-fatigue criteria	1.3
similarity criterion of wear-fatigue damage	3.19
surface chipping	1.15
Tribo-fatigue	1.1
turning point of mechano-rolling fatigue curve	3.4
turning point of mechano-sliding fatigue curve	3.9
Wear-fatigue damage	1.4
Wear-fatigue resistance	1.5
Wear-fatigue tests	1.8
Wear-fatigue test machine	1.9
wear of an active system	3.20
wear intensity of an active system	3.21
wear resistance group of an active system	3.22

## 4.3 俄文字母顺序索引

## Алфавитный указатель терминов на русском языке

Абсцисса точки перелома кривой контактно-механической усталости	3.4
Абсцисса точки перелома кривой фрикционно-механической усталости	3.9
Граничное значение управляющего параметра износоусталостного повреждения	3.15
Группа износостойкости силовой системы	3.22
Диаграмма предельных состояний силовой системы	3.11
Долговечность силовой системы	1.20

• 288 •

Зона опасная относительная	3.18
Износ силовой системы	3.20
Интенсивность изнашивания силовой системы	3.21
Испытания износоусталостные	1.8
Коэффициент обратного эффекта	3.13
Коэффициент прямого эффекта	3.12
Коэффициент трения в силовой системе	2.3
Коэффициента трения циклическая составляющая	2.4
Кривая контактно-механической усталости	3.1
Кривая фрикционно-механической усталости	3.6
Критерий подобия износоусталостных повреждений	3.19
Крошение поверхностное	1.15
Машина для износоусталостных испытаний	1.9
Надежность по критериям трибофатика	1.3
Объем опасный	1.16
Объем опасный комплексный	1.18
Объем опасный относительный	3.16
Параметр износоусталостного повреждения управляющий	3.14
Поверхность опасная	1.17
Поверхность опасная относительная	3.17
Повреждение износоусталостное	1.4
Показатель наклона кривой контактно-механической усталости	3.5
Показатель наклона кривой фрикционно-механической усталости	3.10

• 289 •

## 摩擦疲劳学

Предел контактно-механической выносливости	3.2
Предел ограниченной контактно-механической усталости	3.3
Предел ограниченной фрикционно-механической усталости	3.8
Предел фрикционно-механической выносливости	3.7
Предельное состояние силовой системы	1.19
Сила трения в силовой системе	2.1
Силы трения циклическая составляющая	2.2
Система силовая	1.2
Сопротивление износоусталостным повреждениям	1.5
Трибофатика	1.1
Усталость контактно-механическая	1.10
Усталость коррозионно-механическая	1.12
Усталость фрикционно-механическая	1.11
Усталость эрозионно-механическая	1.14
Фреттинг-усталость	1.13
Эффект обратный	1.7
Эффект прямой	1.6

• 290 •

5 测量定义和单位

Definitions and units of measurement

Обозначения и единицы измерения величин

符号 Symbol Обозначение	名称及在本标准中的序号 Name, No. as per standard Параметр-пункт по стандарту	测量单位 Unit of measurement Единица измерения
A, B, C	荷载摩擦副系统的耐磨性级别; 3.22 Wear resistance group of an active system; 3.22 Условное обозначение группы износостойкости силовой системы; 3.22	—
$P_{\text{ск}}$	磨损—疲劳损伤相似性判据; 3.19 Similarity criterion of wear-fatigue damage; 3.19 Критерий подобия износостойкости повреждений; 3.19	—
$F_C$	摩擦力的交变分量; 2.2	N
$F_C$	Cyclic component of a friction force; 2.2	N
$F_C$	Циклическая составляющая силы трения; 2.2	H
$F_f$	总摩擦系统的摩擦力; 2.1 Friction force in assembly friction; 2.1 Сила трения в узле трения; 2.1	N N H
$F_d$	荷载摩擦副系统的摩擦力; 2.1 Friction force in an active system; 2.1 Сила трения в силовой системе; 2.1	N N H
$F_N$	接触载荷; 2.3	N
$F_N$	Contact load; 2.3	N
$F_N$	Контактная нагрузка; 2.3	H
$f_C$	摩擦系数的交变分量; 2.4	—
$f_C$	Cyclic component of a friction coefficient; 2.4	—
$f_C$	Циклическая составляющая коэффициента трения; 2.4	—
$f_a$	荷载摩擦副系统的摩擦系数; 2.3 Friction coefficient in an active system; 2.3 Коэффициент трения в силовой системе; 2.3	—

续表

符号 Symbol Обозначение	名称及在本标准中的序号 Name, No. as per standard Параметр-пункт по стандарту	测量单位 Unit of measurement Единица измерения
$N_{\text{сл}}, N_{\text{сл}}$	机械—滑动疲劳曲线的拐点; 3.9 Turning point of mechano-sliding fatigue curve; 3.9 Абсцисса точки перелома кривой фрикционно-механической усталости; 3.9	周次 Cycle цикл
$p_0$	滚动摩擦中的接触应力; 3.1 Contact stress under rolling friction; 3.1 Контактное напряжение при трении качения; 3.1	MPa MPa МПа
$p_f$	滚动疲劳极限; 3.13 Rolling fatigue limits; 3.13 Предел выносливости при контактной усталости; 3.13	MPa MPa МПа
$S_{\text{Dy}}$	受损伤面积; 1.17 Damaged surface; 1.17 Опасная поверхность; 1.17	m <sup>2</sup> m <sup>2</sup> м <sup>2</sup>
$V_w$	一个标准的荷载摩擦副系统的相同元件的工作体积; 3.19 Working volume of the same element of an active system which is standard one; 3.19	m <sup>3</sup>
$V_w$	Рабочий объем элемента силовой системы, принимаемой в качестве стандартной; 3.19	м <sup>3</sup>
$V_{\text{Dy}}$	受损伤体积; 1.16 Damaged volume; 1.16 Опасный объем; 1.16	m <sup>3</sup> m <sup>3</sup> м <sup>3</sup>
$W_{\text{Dy}}$	综合受损伤体积; 1.18 Complex damaged volume; 1.18 Комплексный опасный объем; 1.18	m <sup>3</sup> m <sup>3</sup> м <sup>3</sup>
$\varphi(\sigma)$	荷载摩擦副系统中交变应力对摩擦系数影响的函数; 2.1 Function of influence of cycle stresses on friction force in an active system; 2.1 Функция влияния циклических напряжений на силу трения в силовой системе; 2.1	—
$\varphi_i(\sigma)$	荷载摩擦副系统中交变应力对磨损影响的函数; 3.20 Function of influence of cycle stresses on wear of an active system; 3.20 Функция влияния циклических напряжений на износ силовой системы; 3.20	—

摩擦疲劳学

续表

符号 Symbol Обозначение	名称及在本标准中的序号 Name, No. as per standard Параметр-пункт по стандарту	测量单位 Unit of measurement Единица измерения
$I_a$	总摩擦系统的磨损强度; 3.21 Wear intensity of assembly friction; 3.21 Интенсивность изнашивания узла трения; 3.21	—
$I_a$	荷载摩擦副系统的磨损强度; 3.21 Wear intensity of an active system; 3.21 Интенсивность изнашивания силовой системы; 3.21	—
$i_a$	总摩擦系统的磨损; 3.20 Wear of assembly friction; 3.20 Износ узла трения; 3.20	m <sup>2</sup> ; kg m <sup>2</sup> ; kg м <sup>2</sup> ; кг
$i_a$	荷载摩擦副系统的磨损; 3.20 Wear of an active system; 3.20 Износ силовой системы; 3.20	m <sup>2</sup> ; kg m <sup>2</sup> ; kg м <sup>2</sup> ; кг
$K_{\text{Dy}}, K_{\text{Dy}}$ $K_{\text{Dy}}, K_{\text{Dy}}$ $K_{\text{Dy}}, K_{\text{Dy}}$	负向效应指数; 3.13 Back effect index; 3.13 Коэффициент обратного эффекта; 3.13	—
$K_{\text{Dy}}, K_{\text{Dy}}$ $K_{\text{Dy}}, K_{\text{Dy}}$ $K_{\text{Dy}}, K_{\text{Dy}}$	正向效应指数; 3.12 Direct effect index; 3.12 Коэффициент прямого эффекта; 3.12	—
$m_{\text{Dy}}, m_{\text{Dy}}$	机械—滚动疲劳曲线的指数; 3.5 Mechano-rolling fatigue curve exponent; 3.5 Показатель наклона кривой контактно-механической усталости; 3.5	—
$m_{\text{sl}}, m_{\text{sl}}$	机械—滑动疲劳曲线的指数; 3.10 Mechano-sliding fatigue curve exponent; 3.10 Показатель наклона кривой фрикционно-механической усталости; 3.10	—
$N(\sigma_s, p_0 = \text{const})$ $N(p_0, \sigma_s = \text{const})$	机械—滚动疲劳曲线; 3.1 Mechano-rolling fatigue curve; 3.1 Кривая контактно-механической усталости; 3.1	—
$N_{\text{сл}}, N_{\text{сл}}$	机械—滚动疲劳曲线的拐点; 3.4 Turning point of mechano-rolling fatigue curve; 3.4 Абсцисса точки перелома кривой контактно-механической усталости; 3.4	周次 Cycle цикл
$N(\sigma_s, \tau_{\text{Dy}} = \text{const})$ $N(\tau_{\text{Dy}}, \sigma_s = \text{const})$	机械—滑动疲劳曲线; 3.6 Mechano-sliding fatigue curve; 3.6 Кривая фрикционно-механической усталости; 3.6	—

摩擦疲劳学

续表

符号 Symbol Обозначение	名称及在本标准中的序号 Name, No. as per standard Параметр-пункт по стандарту	测量单位 Unit of measurement Единица измерения
$\Phi_i(\sigma)$	荷载摩擦副系统中交变应力对磨损强度影响的函数; 3.21 Function of influence of cycle stresses on wear intensity of an active system; 3.21 Функция влияния циклических напряжений на интенсивность изнашивания силовой системы; 3.21	—
$\varphi_{\text{Dy}}$	受损伤体积和受损伤面积之间交互作用函数; 1.18 Interaction function of damaged volume and damaged surface; 1.18 Функция взаимодействия опасного объема и опасной поверхности; 1.18	—
$\sigma_{-1}$	机械疲劳极限; 3.12 Mechanical fatigue limit; 3.12 Предел выносливости при механической усталости; 3.12	MPa MPa МПа
$\sigma_s$	交变应力幅值; 3.1 Cycle stress amplitude; 3.1 Амплитуда напряжений цикла; 3.1	MPa MPa МПа
$\sigma_{-1\text{Dy}}, \rho_{\text{Dy}}$	机械—滚动疲劳极限; 3.2 Mechano-rolling fatigue limit; 3.2 Предел контактно-механической выносливости; 3.2	MPa MPa МПа
$\sigma_{-1\text{Dy}}, \rho_{\text{Dy}}, N$	循环 N 次的机械—滚动疲劳极限; 3.3 Mechano-rolling fatigue limit at N cycles; 3.3 Предел ограниченной контактно-механической усталости; 3.3	MPa MPa МПа
$\sigma_{-1\text{sl}}, \tau_{\text{Dy}}$	机械—滑动疲劳极限; 3.7 Mechano-sliding fatigue limit; 3.7 Предел фрикционно-механической выносливости; 3.7	MPa MPa МПа
$\sigma_{-1\text{sl}}, \tau_{\text{Dy}}, N$	循环 N 次的机械—滑动疲劳极限; 3.8 Mechano-sliding fatigue limit at N cycles; 3.8 Предел ограниченной фрикционно-механической усталости; 3.8	MPa MPa МПа
$\tau_{\text{Dy}}$	滑动摩擦的摩擦应力; 3.6 Friction stress under sliding friction; 3.6 Фрикционное напряжение при трении скольжения; 3.6	MPa MPa МПа
$\tau_f$	滑动疲劳极限; 3.15 Sliding fatigue limits; 3.15 Предел выносливости при фрикционной усталости; 3.15	MPa MPa МПа

续表		
符号 Symbol Обозначение	名称及在本标准中的序号 Name, No. as per standard Параметр-пункт по стандарту	测量单位 Unit of measurement Единица измерения
$\omega_{sp}$	相对受损伤面积; 3.17 Relative damaged surface; 3.17 Относительная опасная поверхность; 3.17	—
$\omega_{vp}$	相对受损伤体积; 3.16 Relative damaged volume; 3.16 Относительный опасный объем; 3.16	—
$\omega_{wp}$	相对受损伤范围; 3.18 Relative damaged zone; 3.18 Относительная опасная зона; 3.18	—
$\Psi_{-1p}, \Psi_{-1v}$	磨损—疲劳损伤控制参数; 3.14 Governing parameter of wear-fatigue damage; 3.14 Управляющий параметр износоустойчивого повреждения; 3.14	—
$\Psi_{-1p}^{lim}, \Psi_{-1v}^{lim}$	磨损—疲劳损伤控制参数门限值; 3.15 Boundary value of the governing parameter of wear-fatigue damage; 3.15 Граничное значение управляющего параметра износоустойчивого повреждения; 3.15	—

Получено 20.01.2016

**V. I. Senko, L. A. Sosnovskiy, A. V. Putyato, V. V. Komissarov, E. S. Taranova, S. S. Sherbakov, A. V. Bogdanovich, V. B. Popov.** Twenty years of experience teaching the course «Fundamentals of Tribo-Fatigue».

The paper summarizes two decades of experience teaching the course «Fundamentals of Tribo-Fatigue» in BelSUT. The presentation of achievements of Tribo-Fatigue students within an academic discipline, no doubt, contributes to the level of training of mechanical engineers in the Belarusian State University of Transport.

1 **Sosnovskiy, L. A.** Mechanothermodynamical System and Its Behavior / L. A. Sosnovskiy, S. S. Sherbakov // Continuum Mechanics and Thermodynamics. – 2012. – № 24. – P. 239–256.

2 **Сосновский, Л. А.** О возможности построения механотермодинамики / Л. А. Сосновский, С. С. Щербаков // Наука и инновации. – 2008. – № 2 (60). – С. 24–29.

3 **Высоцкий, М. С.** Механотермодинамическая система как новый объект исследования / М. С. Высоцкий, П. А. Витязь, Л. А. Сосновский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 2 (15). – С. 5–10.

4 **Сосновский, Л. А.** Динамические системы с элементами разума: проблема и перспективы исследования / Л. А. Сосновский // Механика-2011 : материалы V Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике, Минск, 26–28 окт. 2011 г. : в 2 т. – Минск : ОИМ НАН Беларуси, 2011. – Т. I. – С. 64–79.

5 **Сосновский, Л. А.** О возможности построения общей теории эволюции систем / Л. А. Сосновский // Философия в Беларуси и перспективы мировой интеллектуальной культуры : материалы Междунар. науч. конф. к 80-летию Института философии НАНБ, Минск, 14–15 апр. 2011 г. – Минск : Право и экономика, 2011. – С. 152–157.