

# МЕХАНИКА ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 539.43

А.В. БОГДАНОВИЧ, д-р техн. наук, проф.  
профессор кафедры теоретической и прикладной механики  
E-mail: bogal@tut.by

Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 03.06.2024.

## ОСОБЕННОСТИ ДИАГРАММ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ СИЛОВЫХ СИСТЕМ ПРИ ФРИКЦИОННО-МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ

*Приводятся экспериментальные диаграммы предельных состояний разных силовых систем в условиях фрикционно-механической усталости, а также их аналитическое описание. Дается графическое представление предложенных уравнений для предельных напряжений (пределов фрикционно-механической усталости) на основе энергетического критерия предельных состояний в виде многокритериальных диаграмм предельных состояний различных силовых систем (ось ординат на них служит прочностной шкалой, а ось абсцисс — трибологической шкалой). Анализ предложенных уравнений для предельных напряжений, экспериментальных диаграмм предельных состояний разных силовых систем показал, что: 1) процессы трения и изнашивания, в зависимости от условий их реализации, могут значительно снижать, а также существенно повышать сопротивление усталости силовой системы; 2) циклические напряжения, в зависимости от условий испытания, могут значительно снизить, а также существенно повысить износостойкость силовой системы.*

**Ключевые слова:** фрикционно-механическая усталость, силовая система, диаграмма предельных состояний, предел выносливости, энергетический критерий, прямой эффект, обратный эффект

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-88-98>

**Введение.** В машинах и механизмах механические системы, в которых процессы трения и изнашивания при скольжении сопровождаются циклическим деформированием элементов, встречаются довольно часто. Как правило, это опоры валов, другие подшипниковые узлы с вкладышами (например, в двигателях внутреннего сгорания, компрессорах), нагруженные шарниры. Износостойкие повреждения (ИУП), характерные для этих силовых систем, называют фрикционно-механической усталостью (ФМУ) [1]. Закономерности ФМУ проявляются через прямой и обратный эффекты [1–4].

Прямой эффект определяется как изменение характеристик сопротивления усталости вследствие влияния процессов трения и изнашивания. Изучение его основных закономерностей ведут с позиций механики усталостного разрушения. Критерием предельного состояния является раз-

рушение образца на две части или появление трещины определенных размеров.

Обратный эффект проявляется во влиянии циклических напряжений на характеристики трения и изнашивания. Закономерности обратного эффекта изучают с позиций трибологии. Критерием предельного состояния является износ определенной величины.

Оба эффекта изучались экспериментально, их весьма удобно анализировать с помощью так называемых диаграмм предельных состояний.

В настоящей работе приведен ряд экспериментальных диаграмм предельных состояний различных силовых систем в условиях ФМУ, выполнен их анализ, показана возможность аналитического описания таких диаграмм и их прогнозирования на основе энергетического критерия предельных состояний.

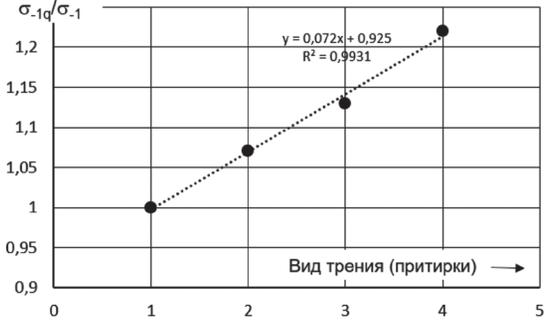
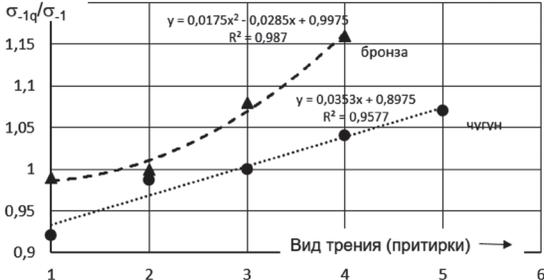
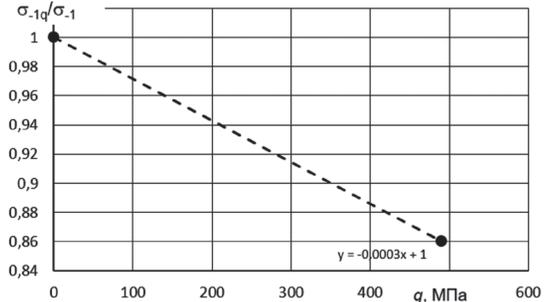
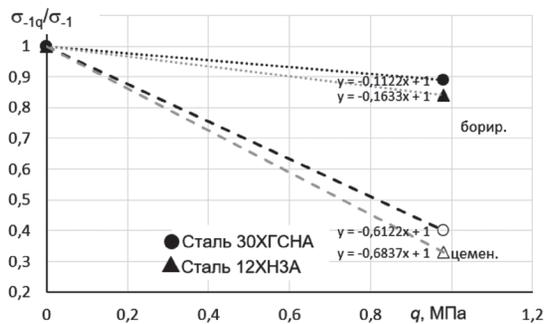
**Экспериментальные диаграммы предельных состояний.** Рассмотрим результаты немно-

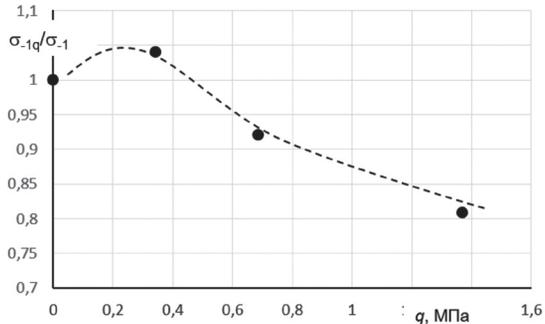
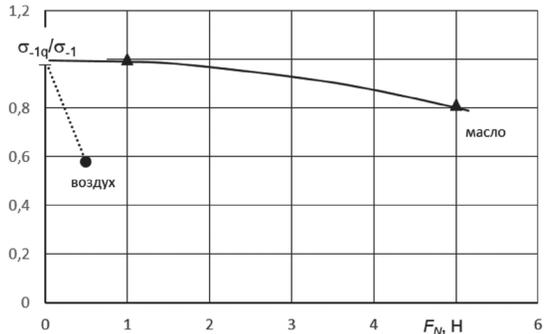
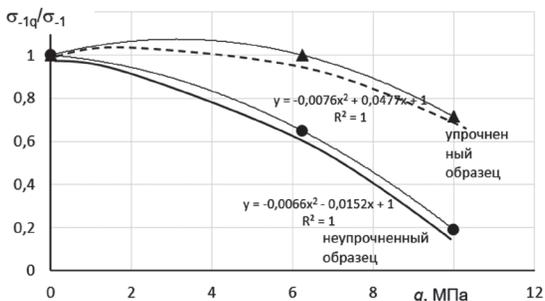
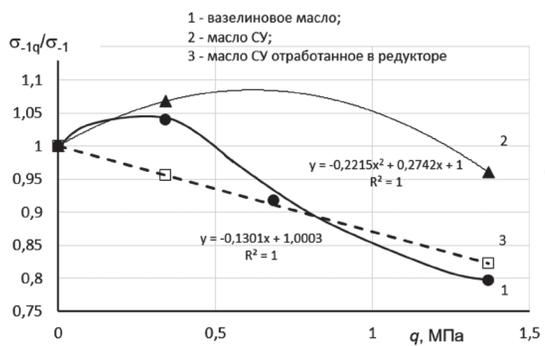
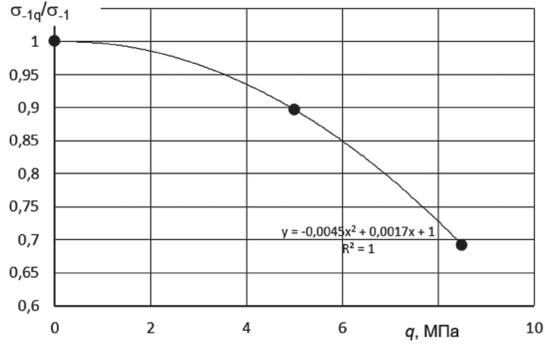
гочисленных экспериментальных исследований предельных состояний разных силовых систем при ФМУ (таблица). В первом столбце таблицы дается краткая информация о материалах элементов силовой системы, термообработке, условиях

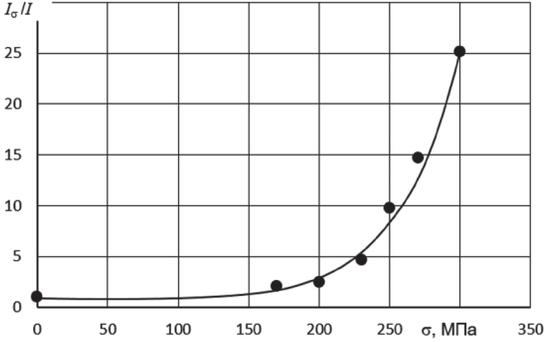
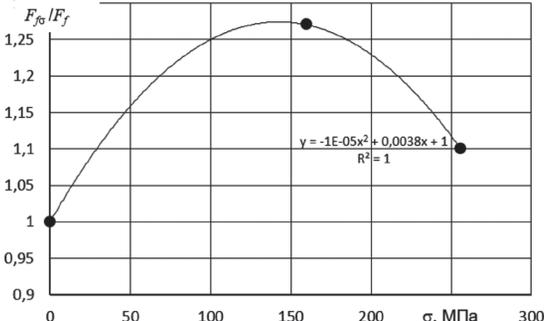
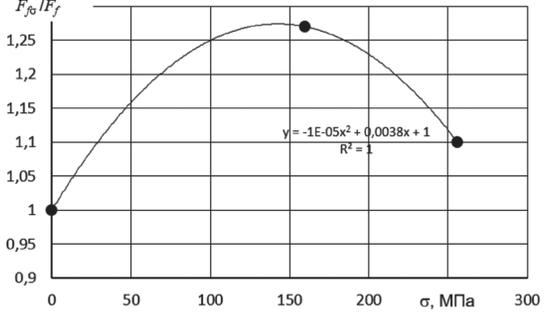
смазки, схеме испытаний (контакта) и ссылка на источник, во втором — экспериментальная диаграмма предельных состояний системы, уравнение, описывающее ее в преобразованных координатах, и значение коэффициента корреляции.

Таблица — Диаграммы предельных состояний разных силовых систем при ФМУ  
Table — Limiting state diagrams of various active systems under mechano-sliding fatigue

№ п.п.	Силовая система, источник	Экспериментальная диаграмма предельных состояний; уравнение, описывающее ее в преобразованных координатах; коэффициент корреляции
1	Образец и контролобразец — сталь 70 (нормализация) со структурой перлита и небольшого количества феррита твердостью 240...260 НВ в виде пластины. Сухое трение скольжения + плоский прямой изгиб [5].	$\lg\left(\frac{\sigma_{-1q}}{\sigma_{-1}}\right) = -0,0376q - 0,0079; \quad R^2 = 0,9897$
2	Образец — сталь 30 (нормализация), контролобразец в виде частичного вкладыша — чугуна. Сухое трение скольжения + консольный изгиб с вращением, контакт по схеме двух цилиндров с параллельными осями [6].	$\lg\left(\frac{\sigma_{-1q}}{\sigma_{-1}}\right) = -0,0616 \lg q - 0,0008; \quad R^2 = 0,9791$
3	Образец — сталь 45 (нормализация) [6].	$y = 0,0588x + 0,9322 \quad R^2 = 0,9671$ <p>Вид трения (притирки) →</p> <p>Виды трения (притирки): 1 — без трения в воздухе; 2 — притирка баббитовый вкладыш 15 мин; 3 — притирка свинцовый вкладыш 30 мин; 4 — без притирки трение; 5 — притирка бронзовый вкладыш 30 мин; 6 — притирка бронзовый вкладыш 60 мин.</p>

1	2	3
4	Образец — сталь 20X (термообработка в источнике не указана) [6].	 <p>Виды трения (притирки): 1 — без трения в воздухе; 2 — предварительная накатка роликом при давлении <math>q = 735</math> МПа в течение 60 мин; 3 — притирка чугунным вкладышем при давлении <math>q = 3,43</math> МПа в течение 60 мин; 4 — накатка роликом при давлении <math>q = 735</math> МПа все время.</p>
5	Образец — сталь 40X (нормализация, твердость 250 НВ, структура перлит-феррит), контрообразец — бронза и чугун [6].	 <p>Виды трения (притирки) при контрообразце-вкладыше из чугуна: 1 — без смазки при давлении <math>q = 1,23</math> МПа; 2 — в масле МС+2% олеиновая кислота при давлении <math>q = 0,98</math> МПа; 3 — без трения в воздухе; 4 — в масле МС+2% олеиновая кислота при давлении <math>q = 0,245</math> МПа; 5 — притирка в масле МС+2% олеиновая кислота при давлении <math>q = 0,245</math> МПа.</p> <p>Виды трения (притирки) при контрообразце-вкладыше из бронзы: 1 — в масле МС+2% олеиновая кислота; 2 — без трения в воздухе; 3 — притирка в воздухе при давлении <math>q = 0,245</math> МПа; 4 — притирка в масле МС+2% олеиновая кислота при давлении <math>q = 0,245</math> МПа.</p>
6	Образец — сталь AISI 1045, контрообразец — сталь AISI 52100 (термообработка не указана в источнике). Сухое трение скольжения в среде аргона + консольный изгиб с вращением, контакт по схеме двух цилиндров с параллельными осями [7].	 <p>Предел ограниченной выносливости определяли на базе 1 млн циклов.</p>
7	Образцы — сталь 30ХГСНА (борированная, цементованная), сталь 12ХН3А (борированная, цементованная), контрообразцы — сталь ШХ15 (термообработка до твердости HRC 62). Сухое трение с абразивом + чистый изгиб с вращением [8].	

1	2	3
8	<p>Образец — сталь 45 (отжиг), контрообразцы — сталь 45. Трение в среде вазелинового масла + чистый изгиб с вращением [9].</p>	
9	<p>Образец — сталь 0,46 % С (отжиг), контрообразец — сталь подшипниковая, 20,6 HRC (закалка в масле после нагревания при 1093 К в течение 30 мин в вакууме и отпуск в течение 1 ч при 973 К в вакууме). Трение + чистый изгиб с вращением, контакт по схеме двух цилиндров с параллельными осями [10].</p>	 <p>Использовали шпиндельное масло (кинематическая вязкость <math>1,36 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}</math> при 298 К).</p>
10	<p>Образец — сталь 316L (в исходном состоянии и после термообработки методом плазменной электролитической нитроцементации), контрообразцы — пальцы из стали 52100. Сухое трение скольжения + консольный изгиб с вращением [11].</p>	
11	<p>Образец — сталь 45 (отжиг), контрообразец — бронза БрОТс-5-5-5. Трение + чистый изгиб с вращением, контакт по схеме двух цилиндров с параллельными осями [12].</p>	
12	<p>Образец — улучшенная сталь 40Х, контрообразец — полиамид Дуретан ВКВ-30Н. Сухое трение скольжения + консольный изгиб с вращением, контакт по схеме двух цилиндров с перпендикулярными осями [13].</p>	

1	2	3
13	Образец — улучшенная сталь 40X, контролбразец — сополимер формальдегида СФД. Сухое трение скольжения + консольный изгиб с вращением, контакт по схеме двух цилиндров с перпендикулярными осями [13].	 $\lg(I_\sigma / I) = 2 \cdot 10^{-5} \sigma^2 - 0,0026\sigma - 0,0018.$
14	Образец — сталь 45 в состоянии поставки, контролбразец — частичный вулдаыш — силумин. Трение скольжения с капельным подводом масла моторного «Лукойл супер 15W-40» + консольный изгиб с вращением [14].	 $y = -1E-05x^2 + 0,0038x + 1$ $R^2 = 1$
15	Образец — сталь 45 в состоянии поставки, контролбразец — фторпласт Ф4-В. Трение скольжения с капельным подводом масла моторного «Лукойл супер 15W-40» + консольный изгиб с вращением [15].	 $y = -1E-05x^2 + 0,0038x + 1$ $R^2 = 1$

Диаграммы, представленные в таблице под номерами 1–12, характеризуют влияние процессов трения и изнашивания на предел выносливости образца (прямой эффект). По вертикальной оси на этих диаграммах откладывалось отношение предела выносливости  $\sigma_{-1q}$  образца при ФМУ, установленное при заданном уровне контактного давления  $q$ , к пределу выносливости  $\sigma_{-1}$  этого же образца при обычной механической усталости. Отметим, что приведенные диаграммы выражают влияние только одного нагрузочного параметра — контактного давления — на величину  $\sigma_{-1}$ . Несомненно, важную роль играют исходные механические свойства материалов образцов и контролбразцов, термообработка, условия смазки и среда, схема нагружения и параметры контакта, а также сложные изменения в структуре, напряженно-деформированном состоянии, шероховатости поверхности, связанные с длительностью процесса испытаний. В источниках [6–14] в той или

иной степени дается соответствующий анализ. По горизонтальной оси на диаграммах 1, 2, 6–8, 10–12 — величина контактного давления  $q$  (максимальное давление в центре площадки контакта по Герцу) (на диаграмме 9 величина контактной нагрузки  $F_N$ ) в результате прижатия контролбразца к рабочей части образца, а на диаграммах 3–5 горизонтальная ось характеризует виды трения (притирки). Диаграммы, представленные в таблице под номерами 13–15, характеризуют влияние циклических напряжений изгиба  $\sigma$  на процессы трения и изнашивания в системе (обратный эффект). По вертикальной оси на диаграмме 13 откладывалось отношение интенсивности изнашивания контролбразца  $I_\sigma$  при определенном уровне циклических напряжений к интенсивности изнашивания  $I$  контролбразца при отсутствии напряжений  $\sigma$ . А на диаграммах 14, 15 вертикальная ось представляет собой отношение предела ФМУ  $F_{fs}$ , выраженного величиной контактной нагрузки,

при определенном уровне циклических напряжений к пределу фрикционной усталости  $F_f$  (при отсутствии напряжений  $\sigma$ ).

Описание всех экспериментов, по результатам которых построены диаграммы предельных состояний силовых систем (см. таблицу), выходит за рамки статьи ввиду ограниченного ее объема, хотя сами эксперименты, несмотря на то, что некоторые из них проводились уже много лет назад, представляют большой интерес.

**Энергетический критерий и диаграммы предельных состояний.** В работах [2, 3, 16] был предложен и обоснован энергетический критерий предельного состояния силовых систем, из которого можно получить выражения для оценки предельных напряжений — предела выносливости по нормальным напряжениям  $\sigma_{-1\tau}$  с учетом влияния процессов трения, изнашивания при заданной температуре (прямой эффект):

$$\sigma_{-1\tau} = \left[ \frac{(U_0 / R_{T/M} - a_T T_\Sigma) / R_{\sigma/\tau} - a_\tau \tau_w^2}{a_\sigma} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

и предельных фрикционных напряжений  $\tau_{j\sigma}$  с учетом влияния циклических напряжений при заданной температуре (обратный эффект):

$$\tau_{j\sigma} = \left[ \frac{(U_0 / R_{T/M} - a_T T_\Sigma) / R_{\sigma/\tau} - a_\sigma \sigma^2}{a_\tau} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $U_0$  — энергия разрыва межатомных связей;  $T_\Sigma$  — суммарная температура в зоне силового контакта, обусловленная всеми источниками тепла, в том числе выделяемого при механическом (объемном и поверхностном) деформировании, структурных превращениях;  $R$  — параметры взаимодействия тепловой и механической составля-

ющих эффективной энергии  $R_{T/M}$ , а также механической энергии, обусловленной взаимодействием изгибающих  $\sigma$  и фрикционных  $\tau_w$  напряжений  $R_{\sigma/\tau}$ ;  $a$  — коэффициенты, выделяющие из полных тепловой и механической энергий их эффективные части [2, 3].

Графическое представление уравнений (1) и (2) дано на рисунке 1 в виде многокритериальных диаграмм 1–5 предельных состояний различных силовых систем. Здесь ось ординат служит прочностной шкалой, а ось абсцисс — трибологической.

В результате испытаний на механическую усталость (трение отсутствует, так что  $\tau_w = 0$ ) определяют предел выносливости вала  $\sigma_{-1}$  (см. рисунок 1). При износоусталостных испытаниях силовой системы его значение изменяется вследствие влияния процессов трения и изнашивания (на рисунке 1  $a$  обозначено  $\sigma_{-1\tau}$ ). Это изменение определяет основные закономерности прямого эффекта, которые могут быть описаны характерными кривыми 1–5 (см. рисунок 1  $a$ ) в зависимости от типа силовой системы и условий ее эксплуатации (уровень контактной нагрузки, температура, свойства окружающей среды).

В результате испытаний пары трения (циклические напряжения отсутствуют, т. е.  $\sigma = 0$ ) находят предельную величину фрикционного напряжения  $\tau_f$ , которую называют также пределом фрикционной усталости (либо предельную величину контактного давления  $p_f$ , которая соответствует значению  $\tau_f$ ) (см. рисунок 1). При износоусталостных испытаниях силовой системы его значение изменяется вследствие влияния уровня циклических напряжений (на рисунке 1  $b$  обозначено  $\tau_{f\sigma}$ ). Это изменение определяет основные закономерности обратного эффекта, которые аналогично могут быть описаны характерными кривыми

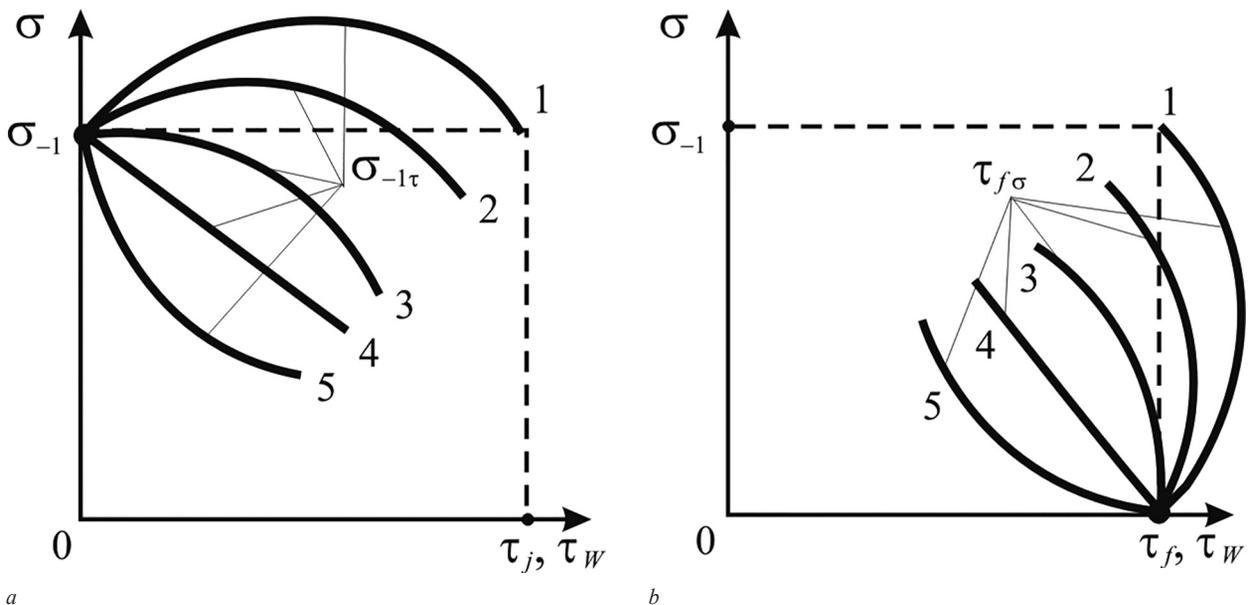


Рисунок 1 — Диаграммы предельных состояний различных силовых систем  
Figure 1 — Limiting state diagrams of various active systems

выми 1–5 (см. рисунок 1 *b*) в зависимости от типа силовой системы и условий ее эксплуатации (уровень циклической нагрузки, температура, свойства окружающей среды). Здесь кривые 1–5 имеют тот же смысл, что и кривые 1–5 на рисунке 1 *a*. Существенное различие состоит в том, что при прямом эффекте, как уже отмечалось, предельное состояние достигается по критериям сопротивления механической усталости, тогда как при обратном эффекте предельное состояние достигается по критериям трения и изнашивания.

Анализ уравнений (1), (2) и рисунка 1 показывает следующее.

1. Процессы трения и изнашивания, в зависимости от условий их реализации, могут значительно снижать (см. кривые 3–5 на рисунке 1 *a*), а также существенно повышать (см. кривые 1 и 2 на рисунке 1 *a*) сопротивление усталости силовой системы, т. е., изменяя условия трения и изнашивания должным образом, можно эффективно управлять процессами ИУП конкретной силовой системы.

2. Циклические напряжения, в зависимости от условий испытания, могут значительно снизить (см. кривые 3–5 на рисунке 1 *b*), а также существенно повысить (см. кривые 1 и 2 на рисунке 1 *b*) износостойкость силовой системы. Это означает, что, изменяя условия циклического нагружения должным образом, можно эффективно управлять процессами ИУП конкретной силовой системы.

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

$$\psi = \frac{\sigma}{\tau_w} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (3)$$

которое имеет критическое значение

$$\psi_K = \frac{\sigma_{-1}}{\tau_f} = \operatorname{tg} \alpha_K. \quad (4)$$

При  $\psi > \psi_K$  реализуется прямой эффект, а при  $\psi < \psi_K$  — обратный.

Предельное состояние силовой системы следует рассматривать при проявлении прямого и обратного эффектов.

Для прямого эффекта при  $\sigma > 0$ ,  $\tau_w > 0$ ,  $T_\Sigma > 0$  имеем формулу оценки предельных напряжений (1), которую при изотермическом силовом нагружении можно преобразовать к виду:

$$\sigma_{-1\tau} = \sigma_{-1T} \cdot \varphi_\sigma(\tau_w). \quad (5)$$

В выражении (5) функция

$$\varphi_\sigma(\tau_w) = \sqrt{\frac{1}{R_{\sigma/\tau}} - \frac{\tau_w^2}{\tau_{fT}^2}}, \quad (6)$$

при этом должно соблюдаться условие

$$\frac{1}{R_{\sigma/\tau}} - \frac{\tau_w^2}{\tau_{fT}^2} \geq 0. \quad (7)$$

Это значит, что предел ФМУ  $\sigma_{-1\tau}$  можно оценить расчетным путем, если известны значение предела выносливости  $\sigma_{-1T}$  при обычной механической усталости в условиях изотермического ( $T = \text{const}$ ) нагружения, а также, согласно (6), условия трения  $\tau_w$  и свойства силовой системы (значение параметра  $R_{\sigma/\tau}$  и предела фрикционной усталости  $\tau_{fT}$  при  $T = \text{const}$ ).

Как видно из (5) и (6), функция  $\varphi_\sigma(\tau_w)$  прогнозирует снижение предельного напряжения  $\sigma_{-1\tau}$  с ростом  $\tau_w$  в диапазоне его изменения  $0 \leq \tau_w \leq \tau_{fT}$  для случая, когда величина  $R_{\sigma/\tau} = \text{const}$ .

Если изучается обратный эффект, то аналогично из (2) при изотермическом фрикционном нагружении имеем:

$$\tau_{f\sigma} = \tau_{fT} \cdot \varphi_\tau(\sigma), \quad (8)$$

где функция

$$\varphi_\tau(\sigma) = \sqrt{\frac{1}{R_{\sigma/\tau}} - \frac{\sigma^2}{\sigma_{-1T}^2}}, \quad (9)$$

и должно быть:

$$\frac{1}{R_{\sigma/\tau}} - \frac{\sigma^2}{\sigma_{-1T}^2} \geq 0. \quad (10)$$

На основе зависимостей (5) и (8) построены диаграммы предельных состояний для типичных силовых систем по любому критерию повреждения и (или) разрушения в относительных координатах  $\sigma/\sigma_{-1\tau} - \tau_w/\tau_{f\sigma}$  (рисунок 2 *a*). Предельное состояние достигается всякий раз, когда реализуются равенства  $\sigma = \sigma_{-1\tau}$  либо  $\tau_w = \tau_{f\sigma}$ . Дополнительно построены (см. рисунок 2 *b*) в двойных логарифмических координатах функциональные связи коэффициента взаимодействия  $R_{\sigma/\tau}$  с относительным параметром асимметрии процессов фрикционного и силового повреждений:

$$\bar{\rho} = \left( \frac{\tau_w}{\tau_{fT}} \right)^2 \cdot \left( \frac{\sigma_{-1T}}{\sigma_{-1\tau}} \right)^2 = \left( \frac{\tau_{f\sigma}}{\tau_{fT}} \right)^2 \cdot \left( \frac{\sigma_{-1T}}{\sigma} \right)^2. \quad (11)$$

Учитывая, что [2]

$$K_D = \sigma_{-1\tau} / \sigma_{-1T}; \quad K_B = \tau_{f\sigma} / \tau_{fT}, \quad (12)$$

параметр  $\bar{\rho}$  можно записать и через коэффициенты прямого  $K_D$  и обратного  $K_B$  эффектов.

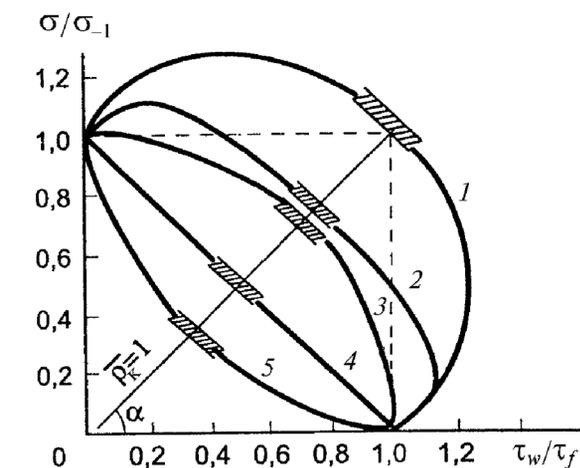
Геометрический смысл параметра  $\bar{\rho}$  следует из диаграммы предельных состояний:

$$\bar{\rho} = \operatorname{ctg}^2 \alpha. \quad (13)$$

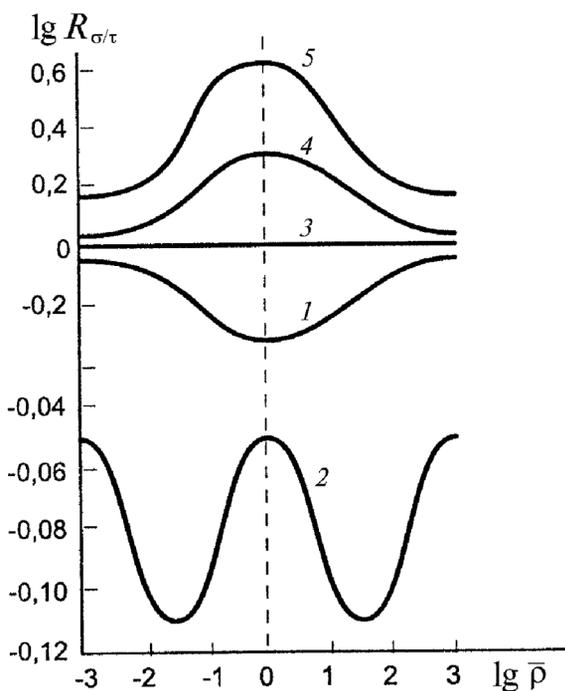
Критическое значение  $\bar{\rho}_K$  достигается при  $\alpha = 45^\circ$ . В этом случае

$$\bar{\rho}_K = \frac{K_D}{K_B} = 1. \quad (14)$$

Вообще параметр  $\bar{\rho}$  имеет энергетическое содержание, так как он определяется соотношением эффективных составляющих энергии износоустойчивого повреждения [2, 3, 16].



a



b

Рисунок 2 — Схемы: a — пять типов (1–5) возможных диаграмм предельных состояний силовых систем; b — соответствующих пяти типов (1–5) зависимостей  $R_{\sigma/\tau}(\bar{p})$

Figure 2 — Diagrams of: a — five types (1–5) of possible limiting state diagrams of active systems; b — corresponding five types (1–5) of dependences  $R_{\sigma/\tau}(\bar{p})$

Сравнение рисунков 2 a и b показывает, что процессами упрочнения-разупрочнения в силовой системе управляют величина  $R_{\sigma/\tau}$  и связанный с ним параметр  $\bar{p}$ . Линии 1–3 отвечают тем силовым системам (включая материалы, их состояние, структура, свойства) и условиям их эксплуатации, в которых во всем диапазоне изменения напряжений пределы фрикционно-механической выносливости  $\sigma_{-1\tau}$  и  $\tau_{f\sigma}$  снижаются, т. е.  $\varphi_{\sigma}(\tau_w) < 1$ ,  $\varphi_{\tau}(\sigma) < 1$ , а процессы разупрочнения при ИУП — преобладают. Кривая 1 на рисунке 2 a характеризует высокую степень разупрочнения силовой си-

стемы при ИУП — имеет место резкое снижение предельных напряжений  $\sigma_{-1\tau}$  и  $\tau_{f\sigma}$  по мере увеличения соответственно  $\tau_w$  и  $\sigma$ . Заметим, что для указанной зависимости характерным является то, что  $R_{\sigma/\tau} \geq 1 = \text{var}$  при  $0 \leq \tau_w \leq \tau_{f\tau}$ ,  $0 \leq \sigma \leq \sigma_{-1\tau}$ , а связь  $R_{\sigma/\tau}(\bar{p})$  в двойных логарифмических координатах (см. рисунок 2 b) представляет собой экспоненциальную функцию с одним максимумом (при  $\bar{p} = 1$ ); при этом  $R_{\sigma/\tau} = 1$ , когда  $\bar{p} = 0$  или  $\bar{p} = \infty$ . Аналогичной функцией описывается и связь  $R_{\sigma/\tau}(\bar{p})$  для силовых систем с обратной пропорциональной линейной зависимостью 2 на диаграмме (см. рисунок 2 a, b); для нее также имеет место  $R_{\sigma/\tau} \geq 1 = \text{var}$  при  $0 \leq \tau_w \leq \tau_{f\tau}$ ,  $0 \leq \sigma \leq \sigma_{-1\tau}$ . Характерной является также кривая 3 на диаграмме, для которой

$$\varphi_{\sigma}(\tau_w) = \sqrt{1 - \frac{\tau_w^2}{\tau_{f\tau}^2}}; \quad \varphi_{\tau}(\sigma) = \sqrt{1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_{-1\tau}^2}}, \quad (15)$$

т. е.  $R_{\sigma/\tau} = 1,0 = \text{const}$  в заданных диапазонах изменения  $\tau_w$  и  $\sigma$ . В этом случае процессы упрочнения и разупрочнения, протекающие в системе при ИУП, взаимно уравниваются друг друга. Поэтому связь между  $R_{\sigma/\tau}$  и  $\bar{p}$  отсутствует. Можно отметить, что диаграммы предельных состояний, приведенные в таблице под номерами 1, 6, 7, 9 (для испытаний в воздухе), отвечают линии 2 на рисунке 2 a. Диаграммы 9 (для испытаний в масле), 10 (для неупрочненных образцов), 11 (кривая 3), 12 отвечают линии 3 на рисунке 2 a.

Кривая 4 на диаграмме (см. рисунок 2 a) характеризует ИУП таких силовых систем и условий их эксплуатации, для которых процессы упрочнения ( $\varphi_{\sigma}(\tau_w) > 1$ ,  $\varphi_{\tau}(\sigma) > 1$ ) преобладают на одном участке заданного интервала изменения напряжений, а процессы разупрочнения ( $\varphi_{\sigma}(\tau_w) < 1$ ,  $\varphi_{\tau}(\sigma) < 1$ ) — на другом. В приведенном примере первые имеют место при увеличении  $\tau_w$  от 0 до  $\sim 0,45\tau_{f\tau}$  и  $\sigma$  от 0 до  $\sim 0,45\sigma_{-1}$ . Можно также отметить, что для рассматриваемого случая связь  $R_{\sigma/\tau}(\bar{p})$  представляет собой сложную экспоненциальную функцию с одним максимумом (при  $\bar{p} = 1$ ) и двумя минимумами, соответствующими максимально возможным значениям  $\sigma_{-1\tau_{\text{max}}}$  и  $\tau_{f\sigma_{\text{max}}}$  предельных напряжений. Величина  $R_{\sigma/\tau} \leq 1$  во всем заданном диапазоне изменения напряжений, причем  $R_{\sigma/\tau} = 1,0$  при  $\bar{p} = 0$  и  $\bar{p} = \infty$ . Диаграммы предельных состояний, приведенные в таблице под номерами 2, 8, 10 (для упрочненных образцов), 11 (кривые 1, 2) вполне соответствуют кривой 4 на рисунке 2 a.

Кривая 5 на диаграмме (см. рисунок 2 a) отличается тем, что во всем диапазоне  $0 \leq \tau_w \leq \tau_{f\tau}$ ,  $0 \leq \sigma \leq \sigma_{-1\tau}$  в силовой системе доминируют процессы упрочнения ( $\varphi_{\sigma}(\tau_w) > 1$ ,  $\varphi_{\tau}(\sigma) > 1$ ). Поэтому зависимость  $R_{\sigma/\tau}(\bar{p})$ , ей соответствующая (кривая 5 на рисунке 2 b), описывается функцией, обратной зависимости  $R_{\sigma/\tau}(\bar{p})$  для силовых систем, в которых имеют место процессы разупрочнения (см. кривые 1, 2 на рисунке 2). Кривой 5 на рисунке 2 a

отвечают диаграммы предельных состояний, приведенные в таблице под номерами 13–15.

Отметим, что относительный параметр  $\bar{p}$  асимметрии процессов фрикционного и силового повреждений изменяется в интервале  $0 \leq \bar{p} \leq \infty$ . По существу, параметр  $\bar{p}$  дает возможность оценивать вклад сдвиговых и отрывных процессов в комплексную поврежденность силовой системы. Можно полагать, что если  $\bar{p} = 1$ , то влияние  $\sigma$  и  $\tau_w$  на поврежденность системы равноценно. На рисунке 2  $b$  нанесена штриховая линия, соответствующая  $\bar{p} = 1$  ( $\lg \bar{p} = 0$ ); ей отвечает прямая, проведенная из начала координат под углом  $\alpha = 45^\circ$  на диаграмме (см. рисунок 2  $a$ ). Если  $\bar{p} > 1$ , то в силовой системе доминируют механизмы поверхностного разрушения (изнашивание, например, при трении скольжения) и в предельном случае  $\bar{p} \rightarrow \infty$  (при  $\sigma = 0$ ) отказ системы может быть обусловлен только энергией трения (по критерию достижения предельного износа). Если  $\bar{p} < 1$ , в системе преимущественными становятся механизмы объемного разрушения (механическая усталость) и в предельном случае  $\bar{p} = 0$  (при  $\tau_w = 0$ ) разрушение может быть вызвано только механической энергией, обусловленной нормальными циклическими напряжениями  $\sigma$  (по критерию образования магистральной трещины). В переходной зоне  $\bar{p} \rightarrow 1$  (каждая такая зона на рисунке 2  $a$  для кривых 1–5 заштрихована) предельное состояние системы может наступить по критерию образования магистральной трещины и по критерию достижения предельного износа одновременно (или почти одновременно).

Следует отметить, что полный анализ диаграммы предельных состояний силовой системы «сталь 45 — силумин» (см. диаграмму под номером 14 в таблице) на основе энергетического критерия дан в работах [17–19].

**Заключение.** Выполнен анализ предложенных уравнений для предельных напряжений на основе энергетического критерия, экспериментальных диаграмм предельных состояний разных силовых систем при ФМУ, который показал:

- процессы трения и изнашивания, в зависимости от условий их реализации, могут значительно снижаться, а также существенно повышать сопротивление усталости силовой системы;
- циклические напряжения, в зависимости от условий испытания, могут значительно снизить, а также существенно повысить износостойкость силовой системы. Эти данные полезно использовать при прогнозировании предельных напряжений и долговечности силовых систем [20–23].

### Список литературы

1. Трибофатика. Термины и определения: ГОСТ 30638-99. — Введ. 01.01.2000. — Минск: Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. — 24 с.
2. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2007. — 434 с.

3. Богданович, А.В. Прогнозирование предельных состояний силовых систем / А.В. Богданович. — Гродно: ГрГУ, 2008. — 371 с.
4. From fatigue and tribology to tribo-fatigue / L.A. Sosnovskiy [et al.] // Int. J. Materials and Structural Integrity. — 2021. — Vol. 14, Nos. 2/3/4. — Pp. 164–237. — DOI: <https://dx.doi.org/10.1504/IJMSI.2021.125815>.
5. Скаков, А.П. Об испытаниях на выносливость при одновременном действии переменного изгиба и трения / А.П. Скаков, Л.М. Школьник // Заводская лаборатория. — 1951. — Т. 17, № 10. — С. 1254–1258.
6. Драйгор, Г.А. Влияние износа на усталостную прочность стали с учетом масштабного фактора / Г.А. Драйгор, Г.И. Вальчук. — Киев: Изд-во АН УССР, 1962. — 111 с.
7. Nagao, T. Behavior of medium carbon steel under combined fatigue and wear/ T. Nagao, J.J. Pamies-Teixeira, N.P. Suh // Wear. — 1977. — Vol. 44, iss. 1. — Pp. 101–108. — DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(77\)90088-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(77)90088-6).
8. Безручко, В.П. Влияние трения в абразивной среде на усталостную прочность стали 30ХГСНА и 12ХН3А после борирования и цементации / В.П. Безручко, А.С. Коротя // Проблемы прочности. — 1977. — № 3. — С. 42–45.
9. Лизанец, М.В. Влияние трения на усталость стали / М.В. Лизанец, В.И. Похмурский, Г.В. Карпенко // Физико-химическая механика материалов. — 1969. — Т. 5, № 5. — С. 629–630.
10. Effect of sliding friction on the fatigue strength of a medium carbon steel / N. Yahata [et al.] // Wear. — 1988. — Vol. 121, iss. 2. — Pp. 197–209. — DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(88\)90043-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(88)90043-9).
11. Study the fatigue-wear behavior of a plasma electrolytic nitrocarburized (PEN/C) 316L stainless steel / F. Mahzoon [et al.] // Journal of Materials Engineering and Performance. — 2012. — Vol. 21, iss. 8. — Pp. 1751–1756. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-011-0072-4>.
12. Лизанец, М.В. Изменение усталостной прочности стали при трении в зависимости от качества смазки / М.В. Лизанец, В.И. Похмурский // Физико-химическая механика материалов. — 1970. — Т. 6, № 2. — С. 99–100.
13. Сосновский, Л.А. Надежность и долговечность элементов силового металлополимерного трибосопряжения в процессе износоусталостных испытаний / Л.А. Сосновский // Надежность и долговечность машин и сооружений. — 1986. — Вып. 9. — С. 93–102.
14. Bogdanovich, A. Experimental research of back effect for mechano-sliding fatigue of the 0.45 % carbon steel — siluminium active system / A. Bogdanovich, I. Lis // Strength of Materials. — 2011. — Vol. 43, iss. 4. — Pp. 405–410. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-011-9309-6>.
15. Лис, И.Н. Экспериментальное исследование закономерностей обратного эффекта металлополимерной силовой системы при фрикционно-механической усталости / И.Н. Лис, А.В. Богданович // Трибофатика = Tribo-fatigue: тр. VI Междунар. симп. по трибофатике МСТФ 2010, Минск, 25 окт. — 1 нояб. 2010 г.: в 2 ч. / БГУ; редкол.: М.А. Журавков (пред.) [и др.]. — Минск, 2010. — Ч. 1. — С. 707–712.
16. Сосновский, Л.А. Энергетический подход к анализу поврежденности силовой системы / Л.А. Сосновский // Изв. АН БССР. Серия физ.-техн. наук. — 1991. — № 4. — С. 87–92.
17. Сосновский, Л.А. Энергетический анализ предельных состояний силовой системы «цилиндрический образец из стали 45 — контролобразец в виде частичного вкладыша из силумина» при фрикционно-механической усталости (обратный эффект) / Л.А. Сосновский, А.В. Богданович, И.Н. Лис // Механика машин, механизмов и материалов. — 2014. — № 3(28). — С. 12–16.
18. Лис, И.Н. Анализ предельных состояний силовой системы «сталь 45 — силумин» при фрикционно-механической усталости по энергетическому критерию / И.Н. Лис, А.В. Богданович // Весн. Гродзенскага дзярж. ун-та ім. Янкі Купалы. Сер. 6. Тэхніка. — 2014. — № 2(175). — С. 28–35.
19. Лис, И.Н. Трибофатические системы, работающие в условиях фрикционно-механической усталости: прогнозирование долговечности на основе энергетического критерия / И.Н. Лис, А.В. Богданович // Механика машин, механизмов и материалов. — 2020. — № 3(52). — С. 89–94. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-89-94>.

20. Определяющие факторы безопасности технических систем в условиях контактных взаимодействий нагруженных элементов / Н.А. Махутов [и др.] // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций: науч.-инф. сб. — 2022. — № 2. — С. 5–14. — DOI: <https://doi.org/10.36535/0869-4176-2022-02-1>.
21. Лис, И.Н. Об алгоритмах расчетно-экспериментальной оценки долговечности и надежности трибофатических систем, работающих в условиях фрикционно-механической усталости / И.Н. Лис, А.В. Богданович // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2022. — Вып. 11. — С. 185–190.
22. Лис, И.Н. Прогнозирование долговечности силовой системы, работающей в условиях фрикционно-механической усталости на примере подшипника коленчатого вала / И.Н. Лис, А.В. Богданович // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2021. — Вып. 10. — С. 129–135.
23. Лис, И.Н. Прогнозирование долговечности подшипника опоры мотвила зерноуборочного комбайна, работающего при нерегулярном нагружении в условиях фрикционно-механической усталости / И.Н. Лис // Механика машин, механизмов и материалов. — 2022. — № 3(60). — С. 35–41. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-3-60-35-41>.

BOGDANOVICH Alexander V., D. Sc. in Eng., Prof.

Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics

E-mail: bogal@tut.by

Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

Received 03 June 2024.

## FEATURES OF LIMITING STATE DIAGRAMS FOR ACTIVE SYSTEMS UNDER MECHANO-SLIDING FATIGUE

*Experimental diagrams of limiting states of active systems under conditions of mechano-sliding fatigue are presented, as well as their analytical description. A graphical representation of the proposed equations for limit stresses (limits of mechano-sliding fatigue) is given based on the energy criterion of limiting states in the form of multicriteria diagrams of limiting states of various active systems (the ordinate axis on them serves as a strength scale, and the abscissa axis – as a tribological scale). Analysis of the proposed equations for limiting stresses, experimental diagrams of limiting states of different active systems showed that: 1) processes of friction and wear, depending on the conditions of their implementation, can significantly reduce, as well as significantly increase, the fatigue resistance of the active system; 2) cyclic stresses, depending on the test conditions, can both significantly reduce and increase the wear resistance of the active system.*

**Keywords:** mechano-sliding fatigue, active system, limiting state diagram, fatigue limit, energy criterion, direct effect, reverse effect

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-88-98>

### References

- State Standard 30638-99. *Tribofatika. Terminy i opredeleniya* [Tribology. Terms and definitions]. Minsk, Mezhsosudarstvennyy Sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., 1999. 24 p. (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A. *Mekhanika iznosoustalostnogo povrezhdeniya* [Mechanics of wear-fatigue damage]. Gomel, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta Publ., 2007. 434 p. (in Russ.).
- Bogdanovich A.V. *Prognozirovanie predelnykh sostoyaniy silovykh sistem* [Prediction of limiting states of active systems]. Grodno, Grodnenskiy gosudarstvennyy universitet imeni Yanki Kupaly Publ., 2008. 371 p. (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A., Sherbakov S.S., Khonsari M.M., Bogdanovich A.V. From fatigue and tribology to tribo-fatigue. *International journal of materials and structural integrity*, 2021, vol. 14, nos. 2/3/4, pp. 164–237. DOI: <https://dx.doi.org/10.1504/IJMSI.2021.125815>.
- Skakov A.P., Shkolnik L.M. Ob ispytaniyakh na vynoslivost pri odnovremennom deystvii peremennogo izgiba i treniya [On endurance tests under the simultaneous action of alternating bending and friction]. *Zavodskaya laboratoriya*, 1951, vol. 17, no. 10, pp. 1254–1258 (in Russ.).
- Draygor G.A., Valchuk G.I. *Vliyanie iznosa na ustalostnyuyu prochnost stali s uchetom masshtabnogo faktora* [The influence of wear on the fatigue strength of steel taking into account the scale factor]. Kiev, AN USSR Publ., 1962. 111 p. (in Russ.).
- Nagao T., Pamies-Teixeira J.J., Suh N.P. Behavior of medium carbon steel under combined fatigue and wear. *Wear*, 1977, vol. 44, iss. 1, pp. 101–108. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(77\)90088-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(77)90088-6).
- Bezruchko V.P., Korotyа A.S. Vliyanie treniya v abrazivnoy srede na ustalostnyuyu prochnost stali 30KhGSNA i 12KhN3A posle borirovaniya i tsementatsii [The influence of friction in an abrasive environment on the fatigue strength of steel 30KhGSNA and 12KhN3A after boriding and carburizing]. *Problemy prochnosti*, 1977, no. 3, pp. 42–45 (in Russ.).
- Lizanets M.V., Pokhmurskiy V.I., Karpenko G.V. Vliyanie treniya na ustalost stali [Effect of friction on steel fatigue]. *Physicochemical mechanics of materials*, 1969, vol. 5, no. 5, pp. 629–630 (in Russ.).
- Yahata N., Hirata T., Kato T., Watanabe M. Effect of sliding friction on the fatigue strength of a medium carbon steel. *Wear*, 1988, vol. 121, iss. 2, pp. 197–209. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(88\)90043-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(88)90043-9).
- Mahzoon F., Behgozin S.A., Bahrololoom M.E., Javadpour S. Study the fatigue-wear behavior of a plasma electrolytic nitro-carburized (PEN/C) 316L stainless steel. *Journal of materials*

- engineering and performance*, 2012, vol. 21, iss. 8, pp. 1751–1756. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-011-0072-4>.
12. Lizanets M.V., Pokhmurskiy V.I. Izmenenie ustalostnoy prochnosti stali pri trenii v zavisimosti ot kachestva smazki [Change in the fatigue strength of steel during friction depending on the quality of the lubricant]. *Physicochemical mechanics of materials*, 1970, vol. 6, no. 2, pp. 99–100 (in Russ.).
  13. Sosnovskiy L.A. Nadezhnost i dolgovechnost elementov silovogo metallopolimernogo tribosopryazheniya v protsesse iznosoustalostnykh ispytaniy [Reliability and durability of power metal-polymer tribological coupling elements during wear-fatigue testing]. *Nadezhnost i dolgovechnost mashin i sooruzheniy*, 1986, iss. 9, pp. 93–102 (in Russ.).
  14. Bogdanovich A., Lis I. Experimental research of back effect for mechano-sliding fatigue of the 0.45 % carbon steel – siluminum active system. *Strength of materials*, 2011, vol. 43, iss. 4, pp. 405–410. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-011-9309-6>.
  15. Lis I.N., Bogdanovich A.V. Eksperimentalnoe issledovanie zakonmernostey obratnogo effekta metallopolimernoy silovoy sistemy pri friktsionno-mekhanicheskoy ustalosti [Experimental study of the patterns of the reverse effect of a metal-polymer force system during mechano-sliding fatigue]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo simpoziuma po tribofatike MSTF 2010 “Tribofatika = Tribo-fatigue”* [Proc. 6th international symposium on tribo-fatigue “Tribofatika = Tribo-fatigue”]. Minsk, 2010, part 1, pp. 707–712 (in Russ.).
  16. Sosnovskiy L.A. Energeticheskiy podkhod k analizu povrezhdennosti silovoy sistemy [Energy approach to active system damage analysis]. *Izvestiya Akademii nauk Belorusskoy SSR. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk*, 1991, no. 4, pp. 87–92 (in Russ.).
  17. Sosnovskiy L.A., Bogdanovich A.V., Lis I.N. Energeticheskiy analiz predelnykh sostoyaniy silovoy sistemy “tsilindricheskoy obrazets iz stali 45 – kontrobrazets v vide chastichnogo vkladysha iz silumina” pri friktsionno-mekhanicheskoy ustalosti (obratnyy effekt) [An energetic analysis of limiting states for the 0.45 % carbon steel – siluminum active system at mechano-sliding fatigue (back effect)]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2014, no. 3(28), pp. 12–16 (in Russ.).
  18. Lis I.N., Bogdanovich A.V. Analiz predelnykh sostoyaniy silovoy sistemy “stal 45 – silumin” pri friktsionno-mekhanicheskoy ustalosti po energeticheskomu kriteriyu [The analysis of limiting states of power system of “45 carbon steel – siluminum” at frictional and mechanical fatigue on energetic criterion]. *Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering science*, 2014, no. 2(175), pp. 28–35 (in Russ.).
  19. Lis I.N., Bogdanovich A.V. Tribofaticheskie sistemi, rabotayushchie v usloviyakh friktsionno-mekhanicheskoy ustalosti: prognozirovanie dolgovechnosti na osnove energeticheskogo kriteriya [Tribo-fatigue systems operating under the conditions of mechano-sliding fatigue: forecasting of durability on the basis of energy criterion]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2020, no. 3(52), pp. 89–94. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-89-94> (in Russ.).
  20. Makhutov N.A., et. al. Opredelyayushchie faktory bezopasnosti tekhnicheskikh sistem v usloviyakh kontaktnykh vzaimodeystviy nagruzhennykh elementov [Governing factors of safety of technical systems at the conditions of contact interactions of loaded parts]. *Safety and emergency problems*, 2022, no. 2, pp. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.36535/0869-4176-2022-02-1> (in Russ.).
  21. Lis I.N., Bogdanovich A.V. Ob algoritmakh raschetno-eksperimentalnoy otsenki dolgovechnosti i nadezhnosti tribofaticheskikh sistem, rabotayushchikh v usloviyakh friktsionno-mekhanicheskoy ustalosti [On algorithms for the computational and experimental estimation of the lifetime and reliability of tribo-fatigue systems operating under conditions of mechano-sliding fatigue]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2022, iss. 11, pp. 185–190 (in Russ.).
  22. Lis I.N., Bogdanovich A.V. Prognozirovanie dolgovechnosti silovoy sistemy, rabotayushchey v usloviyakh friktsionno-mekhanicheskoy ustalosti na primere podshipnika kolenchatogo vala [Prediction of the active system durability operating under mechano-sliding fatigue using the example of a crankshaft bearing]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2021, iss. 10, pp. 129–135 (in Russ.).
  23. Lis I.N. Prognozirovanie dolgovechnosti podshipnika opory motovila zernouborochnogo kombayna, rabotayushchego pri neregulyarnom nagruzhении v usloviyakh friktsionno-mekhanicheskoy ustalosti [Prediction of the durability of the grain harvester reel support bearing operating under irregular load under mechano-sliding fatigue]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2022, no. 3(60), pp. 35–41. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-3-60-35-41> (in Russ.).