



ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 539.43

Л.А. СОСНОВСКИЙ, д-р техн. наук
ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», г. Гомель, Республика Беларусь

А.В. БОГДАНОВИЧ, д-р техн. наук; И.Н. ЛИС
УО «Гродненский государственный университет им. Я. Купалы», Республика Беларусь

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ СИЛОВОЙ СИСТЕМЫ «ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ОБРАЗЕЦ ИЗ СТАЛИ 45 — КОНТРОБРАЗЕЦ В ВИДЕ ЧАСТИЧНОГО ВКЛАДЫША ИЗ СИЛУМИНА» ПРИ ФРИКЦИОННО-МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ (ОБРАТНЫЙ ЭФФЕКТ)

Приведены результаты механических испытаний силовой системы «цилиндрический образец из стали 45 — контрообразец в виде частичного вкладыша из силумина» на фрикционно-механическую усталость при главном вращательном движении в условиях консольного изгиба. Построены кривые механической и фрикционно-механической усталости данной системы по критерию достижения предельно допустимого износа. Получены основные характеристики сопротивления фрикционно-механической усталости исследуемой силовой системы. Установлены значения необходимых параметров и коэффициентов для исследуемой силовой системы и дан анализ полученных экспериментальных результатов с помощью энергетического критерия предельных состояний. Показано, что энергетический критерий позволяет удовлетворительно описывать состояние силовых систем, работающих при фрикционно-механической усталости.

Ключевые слова: энергетический критерий предельных состояний, силовая система, фрикционно-механическая усталость, предел выносливости

Введение. В элементах силовых систем машин при их эксплуатации, как известно [1–3], развиваются комплексные износоусталостные повреждения. Исследование основных закономерностей повреждения и прогнозирования долговечности силовых систем, работающих в условиях фрикционно-механической усталости, является необходимым для корректной оценки надежности и долговечности таких систем. Система «вал — вкладыш» представляет собой характерную силовую систему и является моделью такого практически важного объекта как «вал — подшипник скольжения». Экспериментальные значения характеристик сопротивления фрикционно-механической усталости исследуемых моделей силовых систем и анализ результатов испытаний позволяют установить новые закономерности износоусталостного повреждения силовых систем машин.

При проектировании таких силовых систем, прогнозировании их ресурса, оценке технического состояния должны использоваться критерии, учитывающие сложное взаимодействие различных

по природе повреждающих явлений, приводящих к износоусталостному повреждению. В настоящей работе дается анализ одного из таких критериев, предложенного ранее [4, 5] и построенного на основе энергетического подхода, поскольку такой подход является наиболее общим при решении задач прочности и износостойкости [6, 7], ведь энергетические критерии универсальны и интегрально характеризуют напряженно-деформированное состояние [8].

В статье анализируются на основе энергетического критерия результаты экспериментального исследования обратного эффекта металл-металлической силовой системы «сталь 45 — силумин». Для сравнения предварительно проведены испытания на трение скольжения данной системы (фрикционную усталость), и полученные характеристики сопоставлены с экспериментально установленными характеристиками ее фрикционно-механической усталости.

Методика испытаний. В соответствии с [9] проводились испытания металл-металлической сило-

вой системы на фрикционную и фрикционно-механическую усталость. Образец-вал 1 из стали 45 с диаметром рабочей части 10 мм консольно закреплялся в шпинделе 2 испытательной машины УКИ-6000-2 и вращался с частотой 3000 мин⁻¹ (рисунок 1 а). Контробразец-вкладыш 3 шириной 4 мм, выполненный из силумина, прижимался к опасному сечению образца 1 контактной нагрузкой F_N , величину которой задавали при помощи специального приспособления и поддерживали постоянной в процессе испытания каждой пары «образец — контробразец».

В процессе испытаний обеспечивался капельный подвод смазочного материала — универсального всесезонного моторного масла Лукойл супер 15W-40.

При испытаниях на фрикционно-механическую усталость изгибная нагрузка Q (см. рисунок 1) поддерживалась одинакового уровня для каждой пары «образец — контробразец», что обеспечивает амплитуду циклических напряжений изгиба в опасном сечении образца $\sigma_a = \text{const}$. Прочие условия испытаний оставались такими же, как и при испытаниях на фрикционную усталость.

В качестве предельного состояния при испытаниях на фрикционную и фрикционно-механическую усталость был принят суммарный износ пары «образец — вкладыш» $i_{\text{пред}} = 100$ мкм, а база испытаний составляла 10^7 циклов в соответствии с [9].

В процессе испытаний периодически проводилось измерение (с помощью индикаторной головки с точностью 2 мкм) величины линейного износа i фрикционной пары в локальных восьми точках, равномерно распределенных по периметру опасной зоны образца дискретным способом (см. рисунок 1 б). Таким образом, можно изучать кинетику повреждения конкретной локальной точки (зоны) элемента силовой системы.

Результаты испытаний. По критерию наступления предельного состояния силовой системы были построены кривые фрикционной (1) и фрикционно-механической (2, 3) усталости (рисунок 2).

Оказалось, что кривая 1 в заданном диапазоне контактной нагрузки F_N имеет три характерных участка: I — область малоциклового разрушения (число циклов до достижения предельного износа

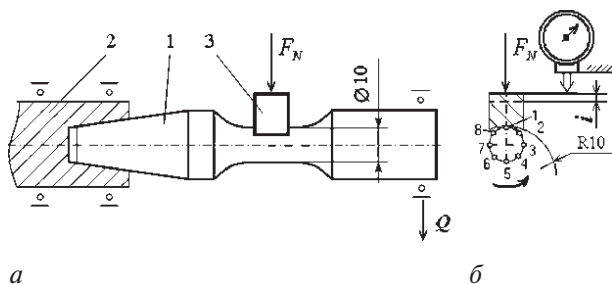


Рисунок 1 — Схема испытания на фрикционную (при $Q = 0$) и фрикционно-механическую (при $Q > 0$) усталость: 1 — образец; 2 — шпиндель; 3 — контробразец

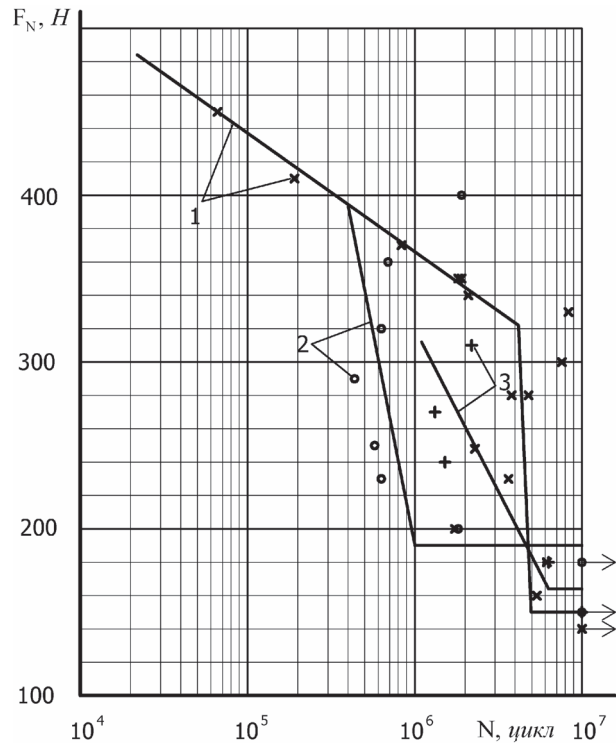


Рисунок 2 — Кривые фрикционной (1) и фрикционно-механической (2, 3) усталости силовой системы «сталь 45 — силумин»: 2 — при $\sigma_a = 160$ МПа; 3 — при $\sigma_a = 256$ МПа

$i_{\text{пред}}$ примерно до $N = 4,2 \cdot 10^6$ циклов, $F_N = 320 \div 450$ Н), II — область многоциклового разрушения ($N = 4,2 \cdot 10^6 \div 5 \cdot 10^6$ циклов, $F_N = 150 \div 320$ Н), III — область высокоресурсного разрушения ($N > 5 \cdot 10^6$ циклов, $F_N < 150$ Н). Видно, что кривая фрикционной усталости 1 состоит из трех ветвей: левой с большим наклоном, средней, расположенной почти вертикально, и правой, которую провели горизонтально. Контактная нагрузка, соответствующая пределу фрикционной выносливости исследуемой пары трения на заданной базе испытаний, составила $F_f = 150$ Н.

Кривые фрикционно-механической усталости 2 и 3 (см. рисунок 2) имеют по два характерных участка — область многоциклового и высокоресурсного разрушения. Контактная нагрузка, соответствующая пределу фрикционно-механической выносливости, составила $F_{fs} = 190$ Н (при $\sigma_a = 160$ МПа) и $F_{fs} = 165$ Н (при $\sigma_a = 256$ МПа), что, соответственно, в 1,3 и 1,1 раза превышает значение контактной нагрузки, соответствующей пределу фрикционной выносливости $F_f = 150$ Н. Значения характеристик фрикционной и фрикционно-механической усталости силовой системы «сталь 45 — силумин», определяемых согласно рекомендаций [9], представлены в таблице 1.

Энергетический анализ результатов испытаний. Закономерность обратного эффекта при фрикционно-механической усталости может быть предсказана теоретически с помощью, например, энергетической теории предельных состояний силовых систем [3–5].

Таблица 1 — Характеристики кривых фрикционной и фрикционно-механической усталости силовой системы «сталь 45 — силумин» (условные обозначения соответствуют [9])

Характеристика	Значение характеристик		
	кривой фрикционной усталости	кривых фрикционно-механической усталости	
		$N(F_N)$	$N(F_N, \sigma_a = 160 \text{ МПа})$
Предел выносливости, Н	$F_f = 150$	$F_{f\sigma} = 190$	$F_{f\sigma} = 165$
Абсцисса точки перелома кривой усталости, цикл	$N_{FG} = 5,0 \cdot 10^6$	$N_{FG} = 1,0 \cdot 10^6$	$N_{FG} = 6,3 \cdot 10^6$
Показатель наклона кривой усталости	$m_f = 0,246$	$m_{f\sigma} = 1,34$	$m_{f\sigma} = 3,93$

Проведем анализ экспериментальных данных с помощью энергетического критерия предельного состояния силовой системы [3–5]:

$$U^{ef} = R_{T/M} \cdot [a_T \cdot T_{\Sigma} + R_{\sigma/\tau} \cdot (a_{\sigma} \cdot \sigma^2 + a_{\tau} \cdot \tau_w^2)] = U_0, \quad (1)$$

где U^{ef} — часть полной энергии, которая затрачивается на образование и накопление повреждений в силовой системе (U^{ef} включает тепловую, силовую и фрикционную составляющие, которые пропорциональны, соответственно, температуре T_{Σ} , квадрату амплитуды максимальных изгибающих напряжений σ^2 , квадрату фрикционных напряжений τ_w^2); $R_{T/M}$ — функция взаимодействия тепловой и механических составляющих эффективной энергии; a — коэффициенты, выделяющие из полных тепловой и механической энергий их эффективные части; U_0 — энергия разрыва межатомных связей.

Температуру T_{Σ} определяли по формуле:

$$T_{\Sigma} = T_2 - T_1, \quad (2)$$

где $T_1 = 293 \text{ К}$ — исходная (комнатная) температура; T_2 — температура вблизи поверхности трения.

Значения коэффициентов a определяли из граничных условий, приняв условно исходную (комнатную) температуру 293 К за ноль:

$$T = 0, \tau_w = 0: a_{\sigma} \cdot \sigma^2 = U_0, a_{\sigma} = U_0 / \sigma^2; \quad (3)$$

$$T = 0, \sigma = 0: a_{\tau} \cdot \tau_w^2 = U_0, a_{\tau} = U_0 / \tau_w^2; \quad (4)$$

$$\sigma = 0, \tau_w = 0: a_T \cdot T = U_0, a_T = U_0 / T, \quad (5)$$

где σ_d, τ_d — нормальные и фрикционные предельные напряжения при $T = 293 \text{ К}$, называемые пределами (механической) деструкции; для расчетов при циклических нагружениях принимали $\sigma_d = \sigma^{-1}, \tau_d = \tau^{-1}; T_d$ — температура деструк-

Таблица 2 — Значения основных параметров и коэффициентов критерия (1)

Параметр	Значение параметра	
	сталь 45	силумин
U_0 , кДж/моль	419 (для чистого железа)	222 (для чистого алюминия)
$T_{пл}$, К	1773	830
σ_{-1} , МПа	280	42
τ_{-1} , МПа	170	30
a_T	0,236	0,267
a_{σ}	0,005	0,126
a_{τ}	0,014	0,247

ции (при $\sigma = 0, \tau_w = 0$); в качестве T_d принимали температуру плавления $T_{пл}$.

Значения основных параметров и коэффициентов критерия (1) приведем в таблице 2.

В первом приближении выполним оценку параметров $R_{T/M}$ и $R_{\sigma/\tau}$. Из уравнения (1) выразим $R_{T/M}$. Для первой серии испытаний (при $\sigma_a = 0$) получим:

$$R_{T/M} = \frac{U_0}{a_T \cdot T_{\Sigma} + a_{\tau} \cdot \tau_w^2}. \quad (6)$$

В уравнении (6) переменными являются температура и фрикционные напряжения. Температура в поставленном эксперименте не подводится извне, а является следствием трения и механической деформации. Зависимость температуры от фрикционных напряжений аппроксимируется прямой линией [10]. Значит $R_{T/M}$ однозначно определяется значением τ_w . Было установлено, что зависимость $R_{T/M}(\tau_w)$ в двойных логарифмических координатах аппроксимируется прямой линией. Для стали 45 получили выражение $\lg R_{T/M} = -1,8771 \lg \tau_w + 4,161$ с коэффициентом корреляции $k = 0,9998$, для силумина — $\lg R_{T/M} = -1,991 \lg \tau_w + 2,931$, $k = 0,9999$. Далее при известных $R_{T/M}$ и σ_a (для второй серии испытаний при $\sigma_a = 160 \text{ МПа}$, для третьей при $\sigma_a = 256 \text{ МПа}$) в условиях фрикционно-механической усталости получаем

$$R_{\sigma/\tau} = \frac{U_0 / R_{T/M} - a_T \cdot T_{\Sigma}}{a_{\sigma} \cdot \sigma^2 + a_{\tau} \cdot \tau_w^2}. \quad (7)$$

Как было показано в [4], значение параметра $R_{T/M}$ коррелирует с отношением механической и тепловой энергий, т. е. с величиной $\rho_{\tau/T}$, являющейся мерой асимметрии процессов фрикционного и теплового повреждения силовой системы:

$$\rho_{\tau/T} = \frac{a_{\tau} \cdot \tau_w^2}{a_T \cdot T_{\Sigma}}. \quad (8)$$

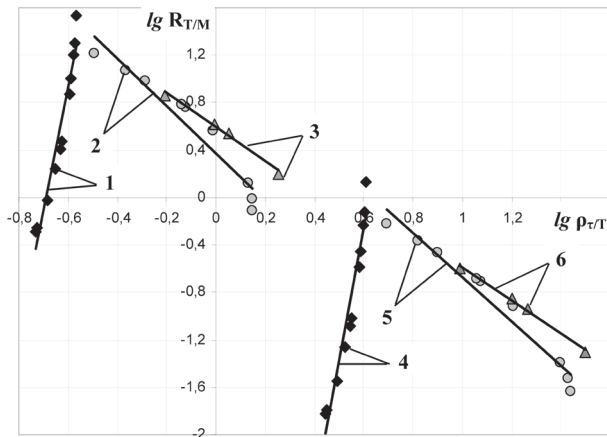


Рисунок 3 — Зависимость $R_{T/M}(\rho_{\tau/T})$ для стали 45 (1–3) и для силумина (4–6)

По результатам расчетов были построены графики зависимости $R_{T/M}(\rho_{\tau/T})$ для стали 45 и для силумина, показанные на рисунке 3. Кривые 1 и 4 построены по результатам испытаний на фрикционную усталость (при $\sigma_a = 0$), а по результатам испытаний на фрикционно-механическую усталость построены кривые 2, 5 (при $\sigma_a = 160$ МПа) и кривые 3, 6 (при $\sigma_a = 256$ МПа).

На рисунке 3 кривые 1–3 для стали 45 и кривые 4–6 для силумина описываются уравнением вида $\lg R_{T/M} = A + B \lg \rho_{\tau/T}$. Значения коэффициентов A и B и коэффициенты корреляции приведены в таблице 3.

Зависимости 1–3 и 4–6 (см. рисунок 3) имеют подобный вид, т. к. материалы работали в паре и в расчетах принимали одинаковые термосиловые нагрузки. Разницу составляют характеристики материалов — $U_0, T_{пл}, \sigma_{-1}, \tau_{-1}$.

Выполним экспериментальную проверку критерия (1) для трех серий испытаний с амплитудой циклической изгибающей нагрузки σ_a , равной 0, 160 и 256 МПа. Решая (1) относительно фрикционных напряжений τ_w и логарифмируя его, получаем

$$\lg \tau_w = \frac{1}{2} \cdot \lg \left[\frac{1}{a_\tau} \cdot \left(\frac{U_0/R_{T/M} - a_T \cdot T_\Sigma}{R_{\sigma/\tau}} - a_\sigma \cdot \sigma^2 \right) \right] = \frac{1}{2} \cdot C_T. \quad (9)$$

Таблица 3 — Коэффициенты A и B уравнений кривых 1–6 (см. рисунок 3) и их коэффициенты корреляции

Номер кривой (см. рисунок 3)	A	B	Коэффициент корреляции
1	7,22	10,55	0,94
2	0,42	-1,99	0,93
3	0,61	-1,44	0,99
4	-6,99	11,19	0,94
5	1,19	-1,86	0,96
6	0,81	-1,40	0,99

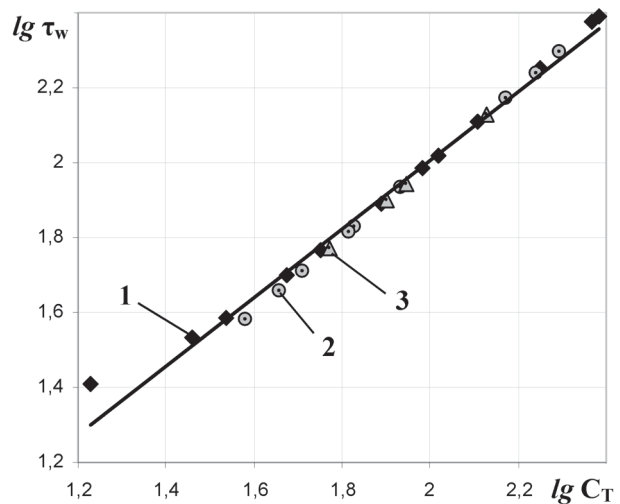


Рисунок 4 — Зависимость $\tau_w(C_T)$ для стали 45

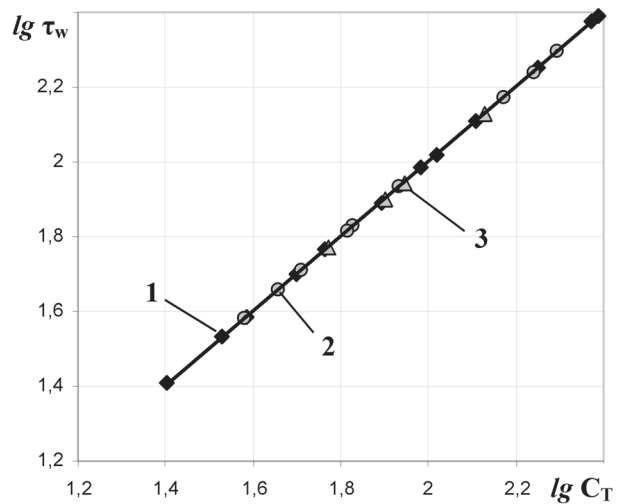


Рисунок 5 — Зависимость $\tau_w(C_T)$ для силумина

Согласно (9), зависимость фрикционных напряжений τ_w от параметра C_T в двойных логарифмических координатах должна быть прямой линией с коэффициентом наклона, равным 0,5. Это утверждение хорошо согласуется с экспериментальными данными. Так, на рисунке 4 показана зависимость $\tau_w(C_T)$ для стали 45, которая описывается уравнением $\lg \tau_w = 0,918 \lg C_T + 0,172$ с коэффициентом корреляции $k = 0,988$. На рисунке 5 показана зависимость $\tau_w(C_T)$ для силумина, которая описывается уравнением $\lg \tau_w = 0,996 \lg C_T + 0,008$ с коэффициентом корреляции $k = 0,9999$.

Заключение. Таким образом, проанализированы результаты испытаний на фрикционно-механическую усталость силовой системы «сталь 45 — силумин» с помощью энергетической теории предельных состояний силовых систем. Установлено, что энергетический критерий (1) позволяет удовлетворительно описывать предельные состояния силовых систем типа «сталь 45 — силумин» по критерию достижения предельного износа, работающих в условиях фрикционно-механической усталости.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при расчете металл-металлических силовых систем типа «вал — вкладыш», работающих в условиях фрикционно-механической усталости.

Список литературы

1. Сосновский, Л.А. Трибофатика: износоусталостные повреждения в проблемах ресурса и безопасности / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов. — 2000. — 304 с.
2. Когаев, В.П. Прочность и износостойкость деталей машин: Учебное пособие для вузов / В.П. Когаев, Ю.Н. Дроздов. — М.: Высш. школа, 1991. — 319 с.
3. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения: моногр. / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2007. — 434 с.
4. Сосновский, Л.А. Теория накопления износоусталостных повреждений / Л.А. Сосновский, А.В. Богданович / под ред. Н.А. Махутова. — Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», 2000 — 60 с.
5. Богданович, А.В. Прогнозирование предельных состояний силовых систем: моногр. / А.В. Богданович. — Гродно: ГрГУ, 2008. — 371 с.
6. Циклические деформации и усталость металлов: в 2 т. / В.Т. Трошенко [и др.] / под ред. В.Т. Трошенко. — Киев: Наук. думка, 1985. — Т. 1. — 224 с.
7. Механика малоциклового разрушения / Н.А. Махутов [и др.]. — М.: Наука, 1986. — 264 с.
8. Иванова, В.С. Усталостное разрушение металлов / В.С. Иванова. — М.: Металлургия, 1963. — 272 с.
9. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на фрикционно-механическую усталость. СТБ 1448-2004. — Минск: Госстандарт, 2004. — 14 с.
10. Богданович, А.В. Закономерности изнашивания силовой системы «сталь 45 — силумин» при фрикционно-механической усталости с учетом геометрии контакта / А.В. Богданович, И.Н. Лис, О.М. Еловой // Механика машин, механизмов и материалов. — 2013. — № 1. — С. 76–81.

Sosnovskiy L.A., Bogdanovich A.V., Lis I.N.

An energetic analysis of limiting states for the 0,45% carbon steel — siluminum active system at mechano-sliding fatigue (back effect)

Mechanical test results for the active system the cylindrical specimen of the 0,45% carbon steel — counter body as a partial liner from siluminum at mechano-sliding fatigue are given. Curves of mechanical fatigue and mechano-sliding fatigue by the criteria of achieving the maximum permissible wear are constructed for this system. The main characteristics of mechano-sliding fatigue resistance for the studied active system are obtained. The values of the required parameters and coefficients for the for the studied active system are defined and the analysis of the obtained experimental results by using the energy criterion of limit states is made. It is shown that the energy criterion permit to describe satisfactorily the state of the active systems which operate at a mechano-sliding fatigue.

Keywords: *energy criterion of limiting states, active system, mechano-sliding fatigue, durability limit*

Поступила в редакцию 19.05.2014.