

УДК 539.43

А.В. БОГДАНОВИЧ, д-р техн. наук, И.Н. ЛИС

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, г. Лида, Беларусь

О.М. ЕЛОВОЙ, канд. техн. наук

Аппарат Совета Министров Республики Беларусь, г. Минск

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗНОСОУСТАЛОСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ СИЛОВОЙ СИСТЕМЫ «СТАЛЬ 45 — СИЛУМИН» ПРИ ФРИКЦИОННО-МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ

Приведены результаты испытания металл-металлической силовой системы «цилиндрический образец из стали 45 диаметром рабочей части 10 мм — контроробразец в виде частичного вкладыша из силумина» на фрикционно-механическую усталость при главном вращательном движении в условиях консольного изгиба. Получены экспериментальные значения характеристик сопротивления фрикционно-механической усталости исследуемой силовой системы, выполнен анализ результатов испытаний, установлены новые закономерности обратного эффекта в заданных условиях нагружения.

Ключевые слова: силовая система, фрикционно-механическая усталость, круговая диаграмма износа, кривая усталости

Введение. 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.

В работе анализируются 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.

Фрикционная усталость. Проводились испытания металл-металлической силовой системы для частного случая фрикционно-механической усталости — фрикционной усталости по схеме «вал — вкладыш». 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). Контроробразец — 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 — контроробразец».

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

В качестве предельного состояния был принят суммарный износ пары «образец — вкладыш», равный 100 мкм, а база испытаний составила 107 циклов в соответствии с СТБ 1448-2004 [1].

Отметим, что в процессе испытаний периодически проводилось измерение с помощью индикаторной головки с точностью 2 мкм величины линейного износа i фрикционной пары в восьми локальных точках по пе-

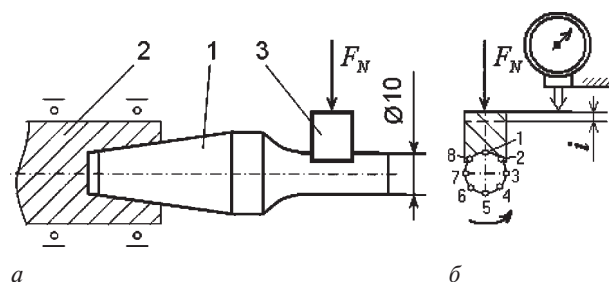


Рисунок 1 — Схема испытания на трение скольжения (фрикционную усталость): 1 — образец; 2 — шпиндель; 3 — контроробразец

риметру опасной зоны образца дискретным способом. При таком способе в опасном сечении образца, где возбуждаются наибольшие циклические напряжения и одновременно реализуется процесс трения скольжения, отмечаются по длине окружности восемь точек, в каждой из которых с высокой точностью измеряется параметр i в течение 1 оборота образца при его вращении (рисунок 1 б). Естественно, что такие измерения могут быть проведены в любой момент испытаний (по времени t). Таким образом, можно изучать кинетику повреждения конкретной локальной точки (зоны) элемента силовой системы.

Рассмотрим некоторые результаты испытаний фрикционной пары при контактной нагрузке $F_N=280$ Н. На рисунке 2 приведена круговая диаграмма износа i , мкм, на которой отражено изменение величины i каждой из восьми точек, равномерно распределенных по периметру опасного сечения образца в заданные моменты времени (при заданной наработке). Значения i в этих локальных точках при наработке n , выраженной числом циклов нагружения, соединяли ломаными линиями.

Видно, что изнашивание происходит неравномерно по периметру опасного сечения образца, причем наибольшая неравномерность наблюдается на начальном этапе (см. диаграмму a на рисунке 2).

С ростом числа циклов неравномерность снижается. Наибольший износ имел место при $N=6500$ тыс. циклов в области локальных точек 5—6 (101—103 мкм). Неравномерность изнашивания обусловлена, главным образом, различием физико-механических свойств поверхностного слоя металла [2—4].

Кинетика изменения износа в локальных точках 1, 2, 5, 6 представлена на рисунке 3.

Установлено, что экспериментальные точки удовлетворительно описываются степенной зависимостью вида $i=a \cdot N^b+c$.

Значения коэффициентов a , b , c и коэффициента корреляции k , полученные путем математического анализа в системе MathCAD, приведены в таблице 1.

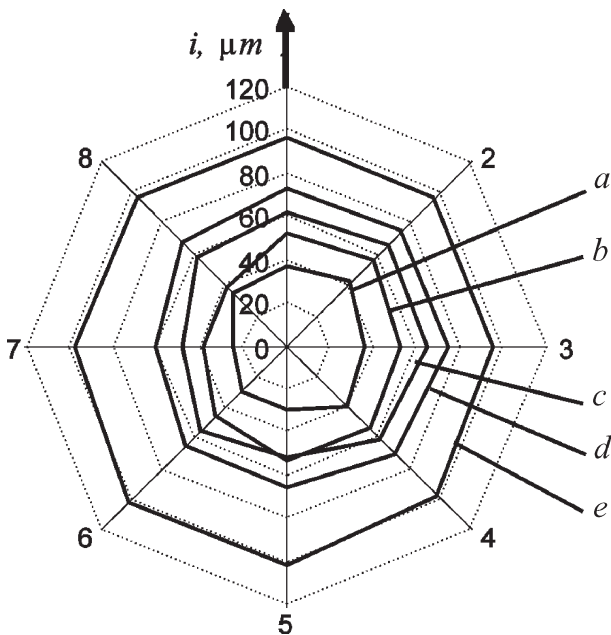


Рисунок 2 — Круговая диаграмма износа вкладыша при нагрузке $F_N=280$ Н и наработке (тыс. циклов): $a - 200$; $b - 510$; $c - 1000$; $d - 2200$; $e - 6500$

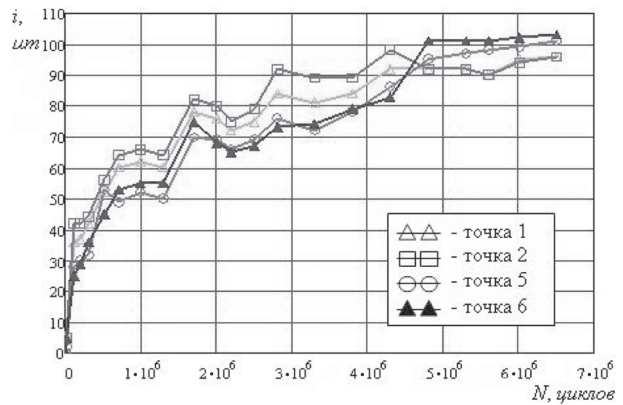


Рисунок 3 — Кинетические кривые износа в локальных точках 1, 2, 5, 6 при $F_N=280$ Н

Рисунок 3 наглядно показывает, что наиболее интенсивное изнашивание происходит при заданной нагрузке за первые 700—800 тыс. циклов нагружения.

Этот период, называемый этапом приработки, обусловлен срезанием микровыступов поверхности. В результате увеличивается площадь контакта трущихся поверхностей, и интенсивность линейного изнашивания снижается (кривые на рисунке 3 после 800 тыс. циклов нагружения становятся более пологими).

Установлено, что закономерности изнашивания сохраняются и при других значениях контактной нагрузки, при этом ее величина оказывает большое влияние на интенсивность изнашивания: с ростом F_N скорость изнашивания увеличивается, что согласуется с известными результатами испытаний других пар трения [2, 5—7 и др.].

Результаты испытаний серии исследуемых силовых систем представлены на рисунке 4 в виде кривой фрикционной усталости I в координатах контактная нагрузка F_N — число циклов N до наступления предельного состояния вкладыша.

Оказалось, что кривая I в заданном диапазоне контактной нагрузки F_N имеет три характерных участка: I — область малоциклового разрушения (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 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.

Фрикционно-механическая усталость

Таблица 1 — Характеристики уравнений регрессии локальных точек

Коэффициенты	Номер локальной точки							
	1	2	3	4	5	6	7	8
a	1,99	2,94	2,03	1,85	0,52	0,44	0,22	0,99
b	0,25	0,23	0,25	0,26	0,34	0,35	0,39	0,30
c	-4,31	-5,12	-5,15	-3,88	-2,47	-1,70	-2,23	-3,33
k	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,98

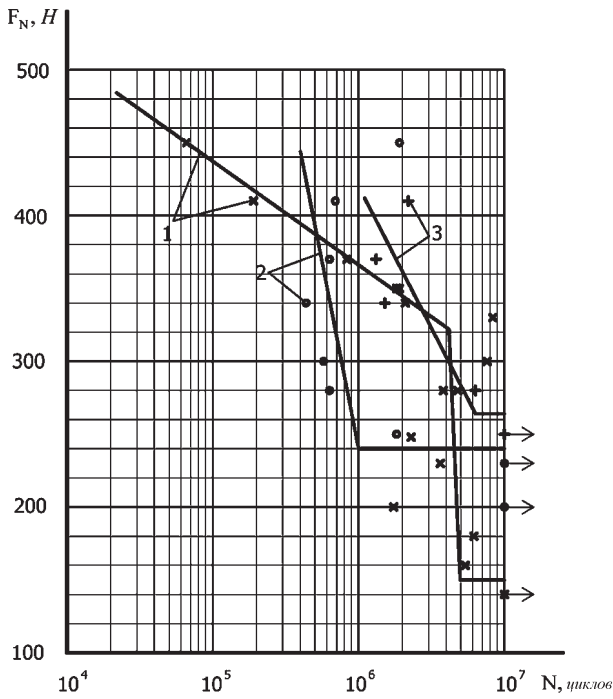


Рисунок 4 — Кривые фрикционной (1) и фрикционно-механической (2, 3) усталости силовой системы «сталь 45 — силумин»: при σ_a равном: 1 — 0 МПа; 2 — 160 МПа; 3 — 256 МПа

Испытания силовой системы «вал из стали 45 — вкладыш из силумина» на фрикционно-механическую усталость проводили согласно схеме на рисунке 5 по разработанной ранее методике при различной величине контактной нагрузки, которую поддерживали постоянной для каждой модели «вал — вкладыш».

При этом изгибная нагрузка Q (см. рисунок 5) поддерживалась одинакового уровня, что обеспечивало амплитуду циклических напряжений изгиба в опасном сечении образца σ_a . Для первой серии износоусталостных испытаний приняли $\sigma_a=0,5\sigma_{-1}=160$ МПа, где $\sigma_{-1}=320$ МПа — предел выносливости образца (вала) стали 45 при симметричном цикле изгиба. Прочие условия испытаний оставались такими же, как и при испытании на фрикционную усталость.

В качестве предельного состояния был принят суммарный износ системы «вал — вкладыш», равный 100 мкм, а база испытаний составила 10^7 циклов в соответствии с СТБ 1448—2004. Закономерности фрикционно-механической усталости исследуемой силовой системы при комплексном нагружении представлены на рисунке 4 в виде кривой фрикционно-механической усталости 2. На рисунке 6 приведена круговая диаграмма износа для силовой системы при $F_N=300$ Н, $\sigma_a=160$ МПа.

Видно, что изнашивание по периметру образца, как и при обычном трении (при $\sigma_a=0$), происходит неравно-

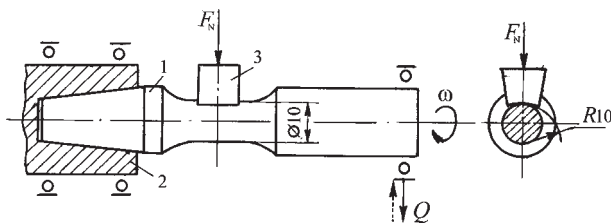


Рисунок 5 — Схема испытания на фрикционно-механическую усталость: 1 — образец; 2 — шпindelь; 3 — контрообразец

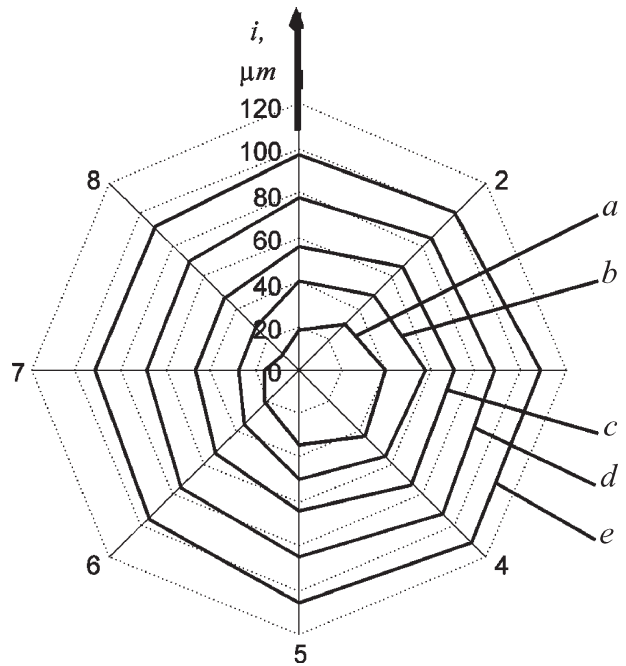


Рисунок 6 — Круговая диаграмма износа вкладыша при испытании на фрикционно-механическую усталость при нагрузке $F_N=300$ Н и $\sigma_a=160$ МПа при наработке, тысяч циклов: a — 40; b — 130; c — 280; d — 520; e — 770

мерно. При этом с ростом числа циклов нагружения n неравномерность уменьшается.

Кинетика изменения износа в локальных точках 1, 2, 3, 6 для этой силовой системы при заданных уровнях контактной и изгибной нагрузок приведена на рисунке 7, из которого следует, что наиболее интенсивный износ происходит при начальной наработке до 80—90 тыс. циклов.

Следующая серия силовых систем была испытана при более высоком уровне напряжений изгиба $\sigma_a=0,7\sigma_{-1}\approx 256$ МПа. Результаты испытания по принятому предельному состоянию исследуемой силовой системы при $\sigma_a=256$ МПа представлены на рисунке 4 в виде кривой фрикционно-механической усталости 3.

Установлено, что в целом характер неравномерности изнашивания и кинетических кривых износа сохраняется. Сравнение некоторых результатов испытаний исследуемой силовой системы на фрикционную и фрикционно-механическую усталость представлено на рисунке 8 в виде кинетических кривых изнашивания.

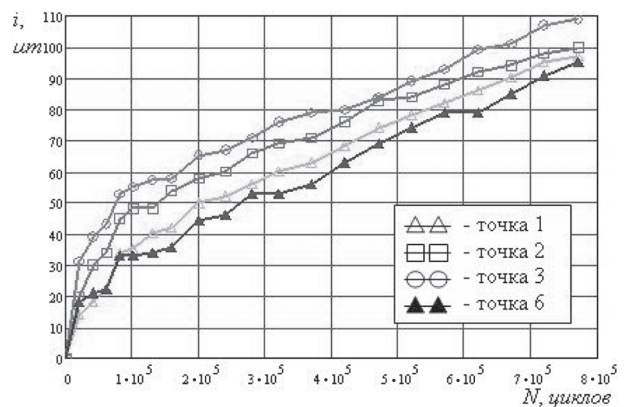


Рисунок 7 — Кинетические кривые износа в локальных точках 1, 2, 3, 6 при $F_N=300$ Н и $\sigma_a=160$ МПа

При увеличении амплитуды циклических напряжений изгиба в опасном сечении образца σ_a (от 0 до 256 МПа) при одинаковой контактной нагрузке $F_N=410$ Н интенсивность изнашивания уменьшается. Однако при $F_N=250$ Н $=const$ с увеличением напряжений изгиба σ_a в опасном сечении образца от 0 до 160 МПа интенсивность изнашивания увеличивается, а при дальнейшем повышении σ_a до 256 МПа резко снижается.

Это подтверждается и построенными по принятому критерию предельного состояния кривыми усталости силовой системы (см. рисунок 4): при высоких значениях контактной нагрузки $F_N > 380-400$ Н предельный износ достигается в условиях чистого трения скольжения ($\sigma_a=0$) значительно быстрее, чем при фрикционно-механической усталости ($\sigma_a > 0$); причем с ростом σ_a долговечность N вкладыша из силумина также увеличивается. В области средних контактных нагрузок ~ 250 Н $< F_N < \sim 360$ Н добавление циклических напряжений изгиба низкого уровня $\sigma_a=0,5$, $\sigma_1=160$ МПа приводит к интенсификации процесса изнашивания вкладыша, — так, при $F_N=300$ Н число циклов до наступления предельного износа снижается \sim в 2 раза по сравнению с изнашиванием при трении скольжения (когда $\sigma_a=0$). Однако последующее повышение напряжений изгиба до 256 МПа приводит к тому, что в этом диапазоне контактных нагрузок долговечность системы становится почти такой же, как и в условиях обычного трения скольжения (см. рисунок 4).

Значения характеристик фрикционной и фрикционно-механической усталости силовой системы «сталь 45 — силумин», определяемых согласно рекомендациям [1], представлены в таблице 2.

Контактная нагрузка для предела фрикционно-механической выносливости исследуемой модели силовой системы составила $F_{f\sigma}=240$ Н (при $\sigma_a=160$ МПа) и $F_{f\sigma}=265$ Н (при $\sigma_a=256$ МПа), что, соответственно, в 1,6 и 1,7 раза превышает значение контактной нагрузки, соответствующей пределу фрикционной выносливости $F_f=150$ Н. График зависимости величины $F_{f\sigma}$ от амплитуды циклических напряжений изгиба σ_a изображен на рисунке 9 и отражает новую закономерность обратного эффекта при фрикционно-механической усталости для металл-металлической силовой системы «сталь 45 — силумин» в заданных условиях испытаний, которая может быть предсказана теоретически с помощью, например, энергетической теории предельных состояний силовых систем [2, 8, 9].

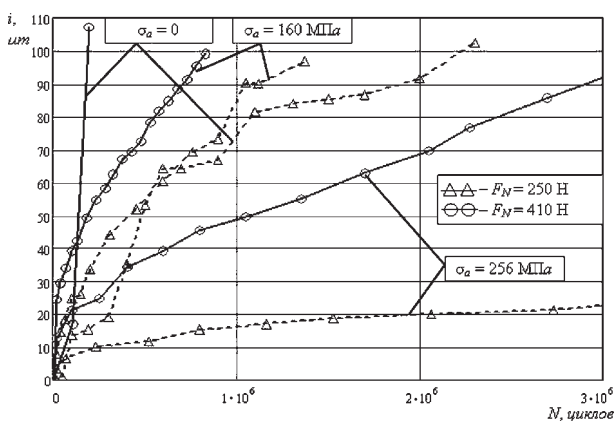


Рисунок 8 — Кинетические кривые износа (средние значения) при различных значениях контактной нагрузки и амплитуды циклических напряжений изгиба

Таблица 2 — Характеристики кривых фрикционной и фрикционно-механической усталости силовой системы «сталь 45 — силумин» (условные обозначения соответствуют [1])

Характеристика	Значение характеристик		
	кривой фрикционной усталости	кривых фрикционно-механической усталости	
		$N(F_N)$	$N(F_N, \sigma_a = 160 \text{ МПа})$
Предел выносливости, Н	$F_f = 150$	$F_{f\sigma} = 240$	$F_{f\sigma} = 265$
Абсцисса точки перелома кривой усталости, цикл	$N_{FG} = 5,0 \cdot 10^6$	$N_{FG\sigma} = 1,0 \cdot 10^6$	$N_{FG\sigma} = 6,3 \cdot 10^6$
Показатель наклона кривой усталости	$m_F = 0,246$	$m_{F\sigma} = 1,34$	$m_{F\sigma} = 3,93$

В области многоциклового разрушения наблюдается увеличение значений показателя наклона кривой фрикционно-механической усталости $m_{F\sigma}$ с увеличением амплитуды циклических напряжений изгиба σ_a . При этом указанная зависимость носит нелинейный характер (рисунок 10).

Заключение. Таким образом, проведены по стандартной методике испытания силовой системы «сталь 45 — силумин» на трение скольжения и фрикционно-механическую усталость, по результатам которых выполнена экспериментальная оценка характеристик сопротивления фрикционной и фрикционно-механической усталости исследуемой силовой системы по критерию достижения предельного износа в широком диапазоне изменения величины контактной нагрузки (см. таблицу 2).

Построены графики изменения величины износа в локальных точках по периметру опасного сечения образца — вала от наработки в виде круговых диаграмм (см. рисунки 2 и 6) и кинетических кривых изнашивания (см. рисунки 3, 7, 8), а также кривые фрикционной и фрикционно-механической усталости (см. рисунок 4). Установлено, что пределы фрикционно-механической выносливости исследуемой силовой системы в задан-

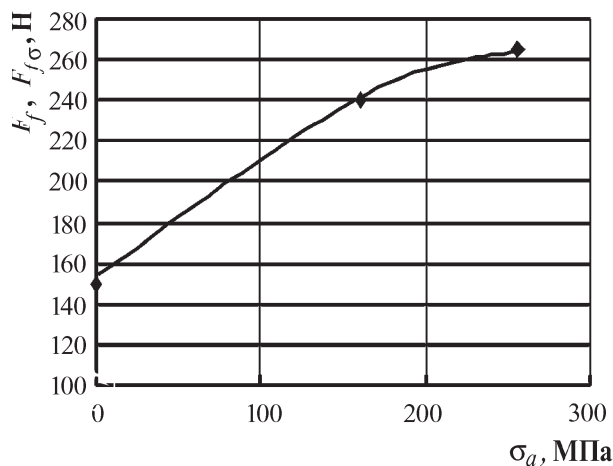


Рисунок 9 — Зависимость предела фрикционно-механической выносливости $F_{f\sigma}$ вкладыша из силумина от амплитуды σ_a циклических напряжений изгиба в опасном сечении вала из стали 45

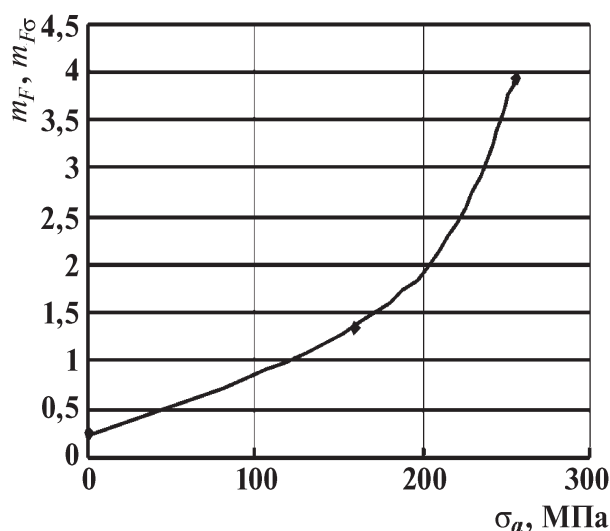


Рисунок 10 — Зависимость показателя наклона кривой фрикционно-механической выносливости $m_{F\sigma}$ вкладыша из силумина от амплитуды σ_a циклических напряжений изгиба в опасном сечении вала из стали 45

ных условиях испытаний (при двух уровнях циклических напряжений изгиба σ_a) оказались значительно выше предела ее фрикционной выносливости (см. рисунки 4 и 9, таблицу 2). Долговечность системы по критерию достижения предельно допустимого износа при высоких уровнях контактной нагрузки существенно увеличивается в случае дополнительного воздействия изгибающей силы. Показатель наклона кривых фрикционно-механической усталости увеличивается с ростом σ_a (см. рисунок 10, таблицу 2).

Список литературы

1. Трибофатика. Методы износоустойчивых испытаний. Испытания на фрикционно-механическую усталость: СТБ 1448-2004. — Введ. 01.09.04. — Минск: ГОССТАНДАРТ, 2004. — 14 с.
2. Сосновский, Л.А. Механика износоустойчивого повреждения: монография / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2007. — 434 с.
3. Еловой, О.М. Локальные характеристики износоустойчивого повреждения и сопротивление разрушению силовых систем / О.М. Еловой, А.В. Богданович // Горная механика. — 2007. — № 1. — С. 76—83.
4. Сосновский, Л.А. Локальные повреждения и долговечность силовых систем мобильных машин / Л.А. Сосновский, А.В. Богданович, О.М. Еловой // Механика машин, механизмов и материалов. — 2008. — № 1 (2). — С. 24—29.
5. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.
6. Когаев, В.П. Прочность и износоустойчивость деталей машин: учеб. пособие для вузов / В.П. Когаев, Ю.Н. Дроздов. — М.: Высш. шк., 1991. — 319 с.
7. Богданович, П.Н. Трение и износ в машинах: учеб. для вузов / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак. — Минск.: Высш. шк., 1999. — 374 с.
8. Сосновский, Л.А. Теория накопления износоустойчивых повреждений / Л.А. Сосновский, А.В. Богданович; под ред. Н.А. Махутова. — Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», 2000. — 60 с.
9. Богданович, А.В. Прогнозирование предельных состояний силовых систем / А.В. Богданович. — Гродно: ГрГУ, 2008. — 371 с.

Bogdanovich A.V., Lis I.N., Yelovoy O.M.

Experimental research of wear-fatigue damage for mechano-sliding fatigue of the 0,45 % carbon steel-siluminum active system

The operation purpose is the experimental research of damage's regularities for a metal-to-metal active system at sliding and mechano-sliding fatigue tests. In the report the test technique is given. Experimental values of characteristics of resistance of sliding and mechano-sliding fatigue of an examined active system are received. The tests results analysis is given. New regularities of a back effect for mechano-sliding fatigue of the 0,45% carbon steel-siluminum active systems are found.

Поступила в редакцию 17.03.2011.