

Г. В. Цыбанев, Ю. П. Кураш

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев

УСТАЛОСТЬ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ФРЕТТИНГА

Описана модель предельного исчерпания пластичности для оценки многоциклового долговечности материалов в условиях блочного нагружения, а также при действии статической составляющей. В модели используются параметры локального неупругого деформирования для определения предельного состояния вследствие критической деградации материала в зоне локализации напряжений.

Ключевые слова: модель, долговечность, деградация, исчерпание пластичности, неупругая деформация, блочное нагружение.

Введение. Основными очагами зарождения и роста усталостных трещин в элементах конструкций являются механические и коррозионные дефекты, конструкционные концентраторы напряжений, очаги фреттинга, локализованные растягивающие остаточные напряжения. В последнее время в связи с необходимостью продления ресурса изделий длительного использования внимание уделяется исследованию и учету влияния фреттинга на долговечность материалов при воздействии переменных во времени нагрузок. Это связано с тем, что, как и в случае возникновения коррозионных дефектов, для фреттинг-усталости важным является не только количество циклов воздействия переменных нагрузок, но и время эксплуатации, так как в условиях фреттинга также присутствует зависящий от времени процесс прохождения окислительных реакций в зоне контакта и скольжения. Разработанные подходы к оценке долговечности в условиях фреттинг-усталости предполагают учет многих факторов механическо-физической природы [1-5], однако, отмеченный фактор присутствия коррозионных процессов свидетельствует о необходимости включения в расчетные зависимости факторов, отражающих наличие химических, электрохимических, термоэлектрических воздействий металла на металл в зонах трения и скольжения [6,7]. В этой связи была поставлена задача оценки влияния факторов немеханической природы на циклическую долговечность сталей, которые используются или предполагаются для использования в элементах грузовых автомобилей. Предварительный экспериментальный результат, который был получен на соединении диска колеса автомобиля со ступицей, и привел к выводу о необходимости таких исследований – это установление причины разрушения этого соединения в результате фреттинг-усталости диска. На рис. 1 приведены вид соединения, фрактография усталостного излома и схема распространения трещины. Для повышения долговечности соединения выполнены испытания на образцах, методика и

некоторые результаты которых приведены в докладе.

Методика проведения испытаний. Экспериментальные исследования выполнены на цилиндрических образцах круглого сечения диаметром 5 мм. Испытания проводили на гладких образцах, таких же образцах с концентратором в виде поперечного отверстия диаметром 1 мм и с накладками в виде П-образных мостиков для создания фреттинга. Расстояние между опорами накладки составляет 10 мм, а ширина опоры – 1 мм. Образец с фреттинг-накладками показан на рис. 2 вместе со схемой для испытаний на фреттинг-усталость. Частота нагружения составляла 36 Гц, контактные напряжения имитировали эксплуатационный фактор и составляли 120 МПа. Для их измерения использовали динамометрическое кольцо, посредством которого накладки прижимали к образцу. На кольцо наклеивали полупроводниковые тензорезисторы, электрическое сопротивление которых тарировали по величине усилия прижатия и измеряли цифровым прибором.

В последнее время в подобных исследованиях используется схема нагружения без П-образного мостика (рис. 3), а величины всех параметров фреттинга и циклического нагружения отслеживаются персональным компьютером (рис. 4).

Исследования выполнены на низколегированных и малоуглеродистых сталях феррито-перлитного класса. Характеристики их механических свойств приведены в табл. 1, а химический состав – в табл. 2. В качестве контртела при испытаниях на фреттинг-усталость использовали сталь 45, широко применяемую в машиностроении. Ее свойства и состав также приведены в табл. 1 и 2.

Результаты исследований и их обсуждение. Для испытаний выбраны условия влияния не только фреттинга, но и концентрации напряжений, чтобы оценить опасность одного и другого факторов для выбранного набора сталей. Так как пластическая деформация при наличии геометриче-

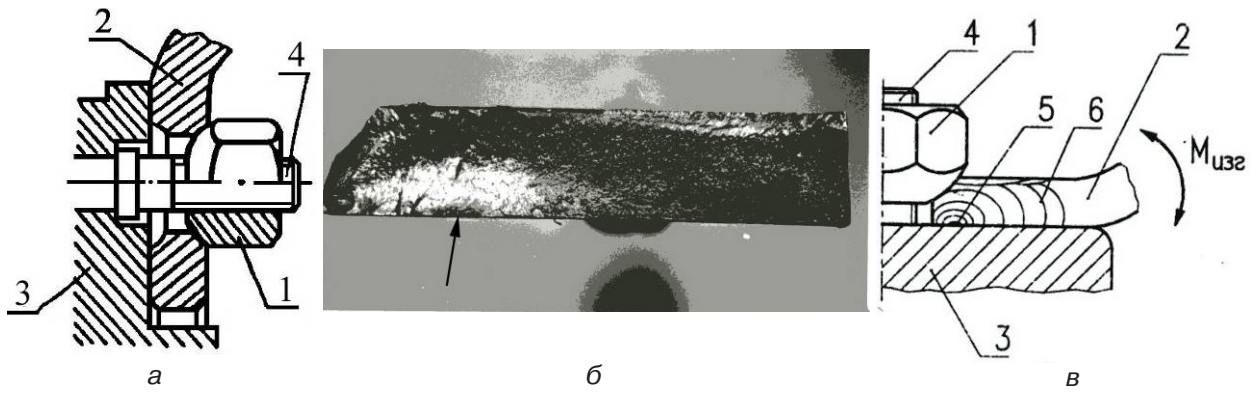


Рис. 1. Крепления дискового колеса по ГОСТу 10409-74 (а), фрактография разрушения диска (б) и схема роста трещины фреттинг-усталости (в): 1 – гайка; 2 – диск; 3 – ступица; 5 – шпилька; 5 – очаг зарождения трещины; 6 – фронт роста трещины; стрелкой показан очаг зарождения трещины на фотографии излома

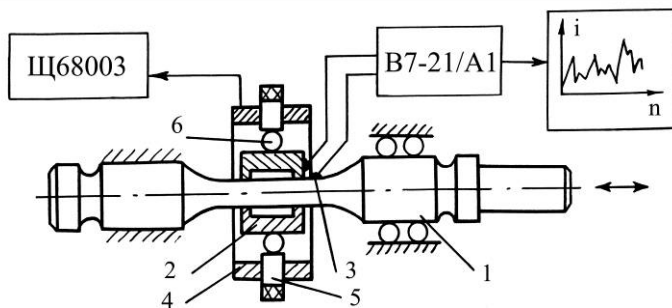


Рис. 2. Образец, приспособления и аппаратура для испытаний на фреттинг-усталость при циклическом растяжении-сжатии: 1 – образец; 2 – фреттинг-накладка; 3 – место подсоединения электрода; 4 – динамометрическое кольцо; 5 – винт; 6 – шарик

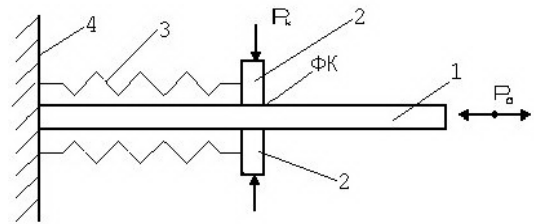


Рис. 3. Схема испытаний на фреттинг-усталость плоских образцов при растяжении-сжатии и контакте плоскость-плоскость: P_a – амплитуда циклической нагрузки; P_k – контактное давление; ФК – место фреттинг-процесса, ведущего к разрушению образца

ского концентратора напряжений играет существенную роль в снижении упругих напряжений, при испытании гладких образцов измеряли также значения неупругих циклических деформаций в процессе многоциклового напряжения [8], нижний предел измерения составлял $1 \cdot 10^{-5}$ относительных единиц деформации. Отметим также, что в последнее время некоторые исследователи трактуют условия фреттинга как специфический концентратор напряжений, в связи с чем сопоставление влияния на усталость геометрического концентратора напряжений и создаваемого фреттингом представляет интерес с точки зрения обеспечения и расчета циклической долговечности.

Оценку влияния отмеченных концентраторов выполняли посредством определения эффективных концентраторов напряжений

$$K_{\sigma}(N) = \frac{\sigma_a(N)}{\sigma_H(N)}; \quad (1)$$

$$K_{\sigma_{фр}}(N) = \frac{\sigma_a(N)}{\sigma_{фр}(N)}, \quad (2)$$

где $\sigma_a(N)$, $\sigma_H(N)$, $\sigma_{фр}(N)$ – амплитуды напряжений по кривым усталости гладких образцов, образцов с

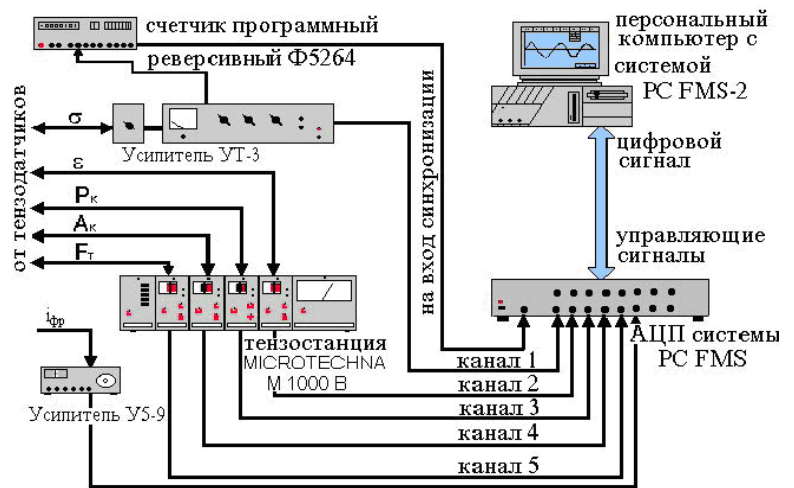


Рис. 4. Схема измерительной системы на базе персонального компьютера

Таблица 1

Характеристики механических свойств исследованных сталей

Марка стали	σ_a , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
15кп	380,0	230,0	32,0	69,0
15Г2АФДпс	532,0	410,0	32,0	72,0
22Г2ТЮ	600,0	–	16,0	–
08ГСЮТ	540,0	403,0	30,0	75,0
45	620,0	390,0	26,0	67,0

Химический состав исследованных сталей

Химический состав, %	Марка стали				
	15кп	20кп	15Г2АФДпс	08ГСЮТ	45
C	0,12-0,19	0,17-0,27	0,12-0,18	до 0,09	0,42-0,50
Si	до 0,07	0,05-0,17	до 0,17	0,3-0,6	0,17-0,37
Mn	0,25-0,5	0,35-0,65	1,2-1,6	0,7-1,1	0,5-0,8
Ni	до 0,25	до 0,25	до 0,3	до 0,3	до 0,25
S	до 0,04	до 0,04	до 0,04	до 0,03	до 0,04
P	до 0,035	до 0,035	до 0,035	до 0,03	до 0,035
Cr	до 0,25	до 0,25	до 0,3	до 0,3	до 0,25
V			0,08-0,15		
N			0,015-0,3		
Ti			до 0,08	0,02-0,08	
Al				0,02-0,07	
Cu	до 0,25	до 0,25	0,2-0,4	до 0,3	до 0,25
As	до 0,08	до 0,08			до 0,08

поперечным отверстием и с накладками для фреттинга соответственно, взятые при одном и том же значении долговечности; N – число циклов до разрушения. Значения $\sigma_H(N)$ и $\sigma_{фр}(N)$ определены как номинальные величины, то есть без учета локального повышения напряжений за счет исследуемых факторов.

Результаты анализа всех исследованных сталей приведены на рис. 5, где в вертикальном столбце *а* представлены кривые усталости гладких образцов и образцов с наличием исследуемых факторов; в столбце *б* – диаграммы циклического деформирования, построенные по стабилизированным значениям неупругих деформаций [8]; в столбце *в* – изменение коэффициентов $K_\sigma(N)$, $K_{фр}(N)$ определенных по соотношениям (1), (2), в зависимости от циклической долговечности N .

Феноменологический анализ полученных результатов свидетельствует, что низколегированные стали имеют более высокие характеристики сопротивления усталости на гладких образцах, чем малоуглеродистые – соответственно, стали 22Г2ТЮ, 08ГСЮТ, 15Г2АФДпс и стали 15кп, 20кп, что связало их более высокими прочностными характеристиками при статическом нагружении.

Исследование концентрации напряжений показывает другие соотношения в циклической прочности низколегированных и малоуглеродистых сталей. Сравнивая пределы выносливости и значения K_σ этих сталей, можно отметить, что низколегированная сталь 08ГСЮТ имеет такой же предел выносливости (при наличии идентичного концентратора), как и более низкопрочная малоуглеродистая сталь 15кп, и самое высокое значение $K_\sigma = 2,17$, в то время как для остальных сталей эта величина составляет 1,3-1,56.

Качественное объяснение этому факту может быть получено из анализа циклических диаграмм деформирования (рис. 5, *в*) из которых следует самая низкая циклическая пластичность стали 08ГСЮТ. Известно, что пластичность и раскрытие микротрещин в надрезе сглаживают локальные напряжения в концентраторах напряжений [9, 10], что позволяет циклически пластичным материа-

лам лучше работать в условиях геометрической концентрации напряжений и иметь более низкие значения K_σ , чем непластичным. Это и наблюдается в представленных результатах.

Анализируя коэффициенты $K_{фр}(N)$ на уровне предела выносливости в условиях фреттинга исследованных сталей, можно отметить отсутствие закономерности, установленной для случая концентрации напряжений. Из данных, приведенных на рис. 5, следует, что наиболее циклически пластиче-

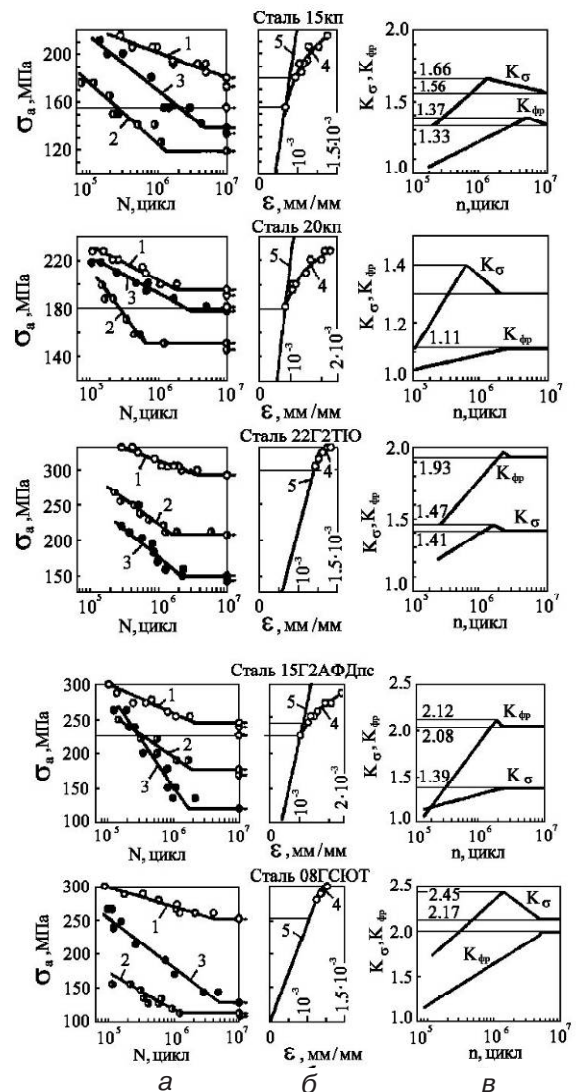


Рис. 5. Результаты испытаний образцов из малоуглеродистых и низколегированных сталей: *а* – гладкие образцы (1), образцы с концентратором (2) и в условиях фреттинга (3); *б* – диаграммы циклического деформирования (4) и упругая линия $\sigma_a - \epsilon_p$ (5); *в* – зависимости K_σ , $K_{фр}$ от долговечности N ; *а-в* – вертикальные столбцы на рисунке

ская из исследуемых сталей 15Г2АФДпс снижает свой предел выносливости в условиях фреттинга несколько больше, чем наименее пластичная сталь 08ГСЮТ, что свидетельствует о снижении роли циклической пластичности в формировании предельного состояния сталей в этих условиях. Из анализа величин $K_{фр}$ на пределе фреттинг-выносливости можно отметить закономерность: эта величина более высокая для низколегированных сталей ($K_{фр} = 2,08$ – для стали 15Г2АФДпс; $2,0$ – для стали 08ГСЮТ; $1,93$ – для стали 22Г2ТЮ) и низкая – для малоуглеродистых сталей ($K_{фр} = 1,33$; $1,11$ – для сталей 15кп и 20кп соответственно). Учитывая установленный факт, далее выполнен второй этап исследований.

Так как процесс фреттинг-усталости сопровождается химическими реакциями окислительного типа в зоне контакта и скольжения с выделением заряженных частиц в виде ионов и электронов, этот процесс происходит более интенсивно при наличии легирующих элементов. Для оценки интенсивности процессов различной природы, включая термоэлектрические, гальваномагнитные, электроэрозийные и электрохимические явления, выбрали суммарный заряд заряженных частиц, выделившихся в процессе фреттинг-усталости. Уровень этого суммарного заряда Q может быть определен интегрированием величин электрических микро-токов фреттинга i , протекающих во время испытаний на фреттинг-усталость $t_{фр}$ через контакт образца с фреттинг-накладкой:

$$Q = \int_0^{t_{фр}} i(t) dt. \quad (3)$$

Дискретные значения микротока i_j в течение циклической наработки n_j экспериментально определяли с использованием схемы, приведенной на рис. 2. Выделенный суммарный заряд как результат фреттинг-процессов определяли численным интегрированием полученных результатов измерения

$$Q = \frac{1}{f} \sum_{j=1}^m \frac{i_j + i_{j+1}}{2} (n_{j+1} - n_j), \quad (4)$$

где f – частота циклического нагружения; m – количество измерений величины; i_j , n_j – дискретные значения измеренного микротока фреттинга и циклическая наработка до этого измерения соответственно.

Для исследований фреттинг-усталости на втором этапе с измерением микротоков фреттинга

выбрали три стали из испытанных на первом этапе: базовая малоуглеродистая сталь 15кп, проявляющая самое низкое ухудшение циклической долговечности в условиях фреттинга; сталь 15Г2АФДпс – циклически пластичная (как и сталь 15кп) низколегированная сталь, показавшая наибольшее снижение усталостных характеристик в условиях фреттинга; сталь 22Г2ТЮ, у которой фреттинг снижает усталостные характеристики несколько меньше, чем у стали 15Г2АФДпс.

Испытания выполнены на трех уровнях амплитуды напряжений σ_a для каждой стали, исходя из предварительно полученных кривых фреттинг-усталости и реализации долговечностей многоциклового усталости.

Результаты экспериментального измерения микротоков фреттинга приведены на рис. 6. Из

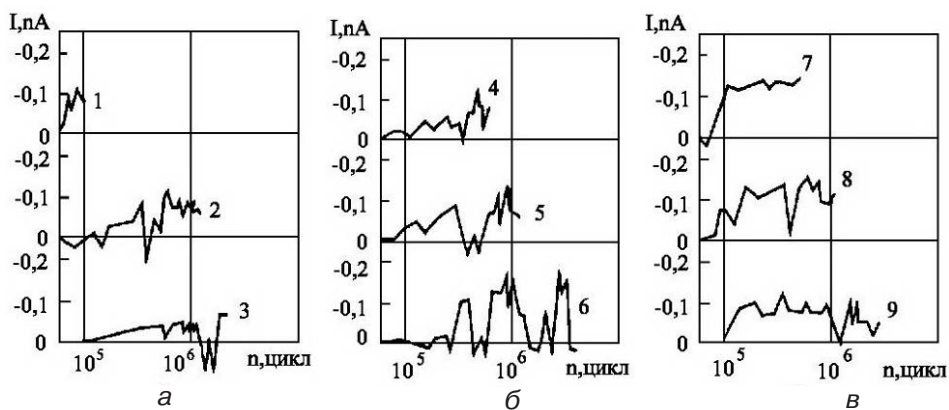


Рис. 6. Кинетика микротока фреттинга в процессе испытаний сталей 15кп (а), 15Г2АФДпс (б) и 22Г2ТЮ (в): 1 – $\sigma_a = 210$ МПа, $Q = 0,083; 10^{-4}$ Кл; 2 – $\sigma_a = 180$ МПа, $Q = 0,0854; 10^{-4}$ Кл; 3 – $\sigma_a = 170$ МПа, $Q = 1,170; 10^{-4}$ Кл; 4 – $\sigma_a = 200$ МПа, $Q = 5,01; 10^{-4}$ Кл; 5 – $\sigma_a = 160$ МПа, $Q = 7,88; 10^{-4}$ Кл; 6 – $\sigma_a = 130$ МПа, $Q = 23,43; 10^{-4}$ Кл; 7 – $\sigma_a = 200$ МПа, $Q = 1,19; 10^{-4}$ Кл; 8 – $\sigma_a = 180$ МПа, $Q = 2,28; 10^{-4}$ Кл; 9 – $\sigma_a = 160$ МПа, $Q = 5,13; 10^{-4}$ Кл

этих данных видно, что, несмотря на сложную кинетику токов, закономерным является их увеличение с наработкой или достижение стабилизации, а также увеличение уровня при повышении амплитуды напряжения. Скачкообразное изменение токов с возрастанием, снижением и изменением знака на противоположный связано с процессами схватывания и образованием слоя окислов между контактирующими поверхностями.

Из рис. 7, где приведены рассчитанные по уравнению (4) величины Q , следует ее возрастание для испытанных сталей с увеличением числа циклов до разрушения. Подобная величина Q' для наработки $n = 0,8 N$ также возрастает.

Кроме отмеченных закономерностей $Q = f_1(\sigma_a)$ и $Q = f_2(N)$, $Q = f_3(n)$, по результатам исследований наблюдается значительное различие величин Q в зависимости от химического состава сталей: для малоуглеродистой стали 15кп, значения Q на $0,5-1,0$ порядок ниже, чем у низколегированных. Принимая, что это соотношение характеризует более интенсивные фреттинг-процессы в легированных сталях, на рис. 8 результаты испытаний представлены в виде графиков зависимости $K_{фр}$ и Q , из которых следует их взаимосвязь: более высо-

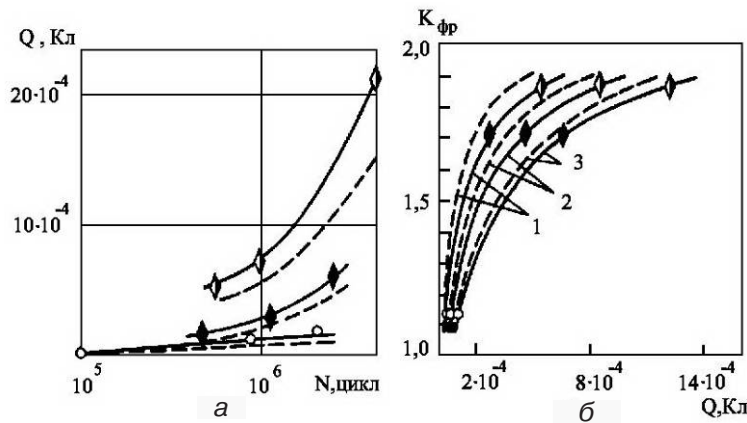


Рис. 7. Взаимосвязь величины накопленного заряда с долговечностью образцов (а) и с эффективным коэффициентом фреттинга (б) для стали марок 15кп (светлые точки), 22Г2ТЮ (темные) и 15Г2АФДпс (полузатемненные): 1-3 – значения $K_{фр}$, рассчитанные соответственно для долговечностей $0,8 \cdot 10^6$; $1,5 \cdot 10^6$; $2 \cdot 10^6$ цикл (сплошные линии – данные для накопленного заряда, рассчитанные для наработки N ; штриховые – то же для $0,8 N$)

кие токи фреттинга соответствуют большему снижению характеристик сопротивления усталости в условиях фреттинга и наоборот.

Так как величина Q зависит от числа циклов нагружения, для сравнимости материалов по интенсивности фреттинг-процессов введем характеристику удельного заряда q , выделяемого в очаге фреттинга за один цикл нагружения

$$q = \frac{Q}{N} = \frac{1}{N} \int_0^{t_{fr}} i(t) dt. \quad (5)$$

Кроме того, учитывая, что при прекращении нагружения, то есть отсутствии скольжения в контакте ($Q = 0$), можно считать, что значения Q зависят от величины взаимного проскальзывания контактирующих поверхностей, которая для использованной схемы нагружения определяется зависимостью

$$A_c = 0,5L \left(\frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{E_p} \right)^k \right) = 0,5L \cdot \varepsilon_a, \quad (6)$$



ЛИТЕРАТУРА

1. *Dominguez J.* Cyclic variation in friction forces and contact stresses during fretting fatigue // *Wear*. – 1998. – V. 218. – P. 43-53.
2. *Szolwinski MP, Farris TN.* Observation, analysis and prediction of fretting fatigue in 2024-T351 aluminum alloy // *Wear*. – 1998. – V. 221. – P. 24-36.
3. *Giannakopoulos AE, Suresh S.* A three-dimensional analysis of fretting fatigue // *Acta Mater*. – 1998. – V. 46. – P. 92-177.
4. *Hattori T, Nakamura M., Watanabe T.* Simulation of fretting-fatigue life by using stress-singularity parameters and fracture mechanics // *Tribol Int*. – 2003. – V. 36. – P. 87-97.
5. *Navarro C., Muoz S., Dominguez J.* On the use of multiaxial fatigue criteria for fretting fatigue life assessment // *Int. J. Fat.* – 2008. – Vol. 30, № 1. – P. 4-32.
6. *Uhlig H.H.* Mechanism of fretting corrosion // *J. Appl. Mech.* – 1954. – V. 21, № 4. – P. 401-415.
7. *Barbas F., Caton G.* Corrosion de frottement // *Techiques du petrole. Special Consacre a la Corrosion*. – 1961. – № 3. – P. 64.

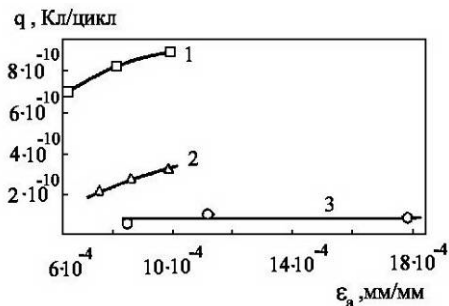


Рис. 8. Зависимость удельного электрического заряда от амплитуды деформации для исследуемой стали марок 15Г2АФДпс (1), 22Г2ТЮ (2) и 15кп (3)

где L – расстояние между опорами П-образной накладки; k , E , E_p – постоянные упруго-пластического деформирования материала образца.

Зависимости $q = q(\varepsilon_a)$, приведенные на рис. 8 дают информацию для трактовки полученных результатов: удельный заряд q возрастает с увеличением амплитуды скольжения у низколегированных сталей и остается постоянным для малоуглеродистой стали, что можно связать с прогрессирующим фреттинг-повреждением у первых сталей и их стабилизацией у вторых.

Заключение. Несмотря на такой неординарный результат проведенных исследований и описание закономерностей изменения фреттинг-токов при циклическом нагружении, остается открытым вопрос: выявленные закономерности, взаимосвязи величины фреттинг-токов связаны непосредственно с процессом повреждения материала образца этими токами (направление протекания микротокков соответствует движению положительных зарядов – ионов металла – от образца к контртелу, что соответствует разрушению материала образца) или же это только индикатор сложных процессов взаимодействия материалов и продуктов фреттинга в зоне контакта и трения? Этому вопросу будут посвящены последующие исследования с целью нахождения параметра, учитывающего исследованные в данной работе процессы на циклическую долговечность материалов и введение этого параметра в алгоритмы расчета долговечности при фреттинг-усталости контактирующих поверхностей.

8. Трощенко В. Т., Хамаза Л. А., Цыбанев Г. В. Методы ускоренного определения пределов выносливости металлов на основе деформационных и энергетических критериев. – Киев: Наук.думка, 1979. – 175 с.
9. Трощенко В. Т., Драган В. И. Исследование влияния концентрации напряжений на характеристики сопротивления усталостному разрушению сталей по критерию зарождения трещины // Пробл. проч. – 1986. – № 12. – С. 3-8.
10. Цыбанев Г. В. Оценка циклической долговечности образцов с концентраторами напряжений по величине раскрытия надреза // Там же. – 1987. – № 3. – С. 26-30.

ЦЫБАНЕВ Г. В., КУРАШ Ю. П. Утома маловуглецевих та низьколегованих сталей в умовах фретингу.

Виконано експериментальне дослідження втомі маловуглецевих та низьколегованих сталей за наявності концентрації напружень та зон фретингу. Рівень пошкодження в зонах фретингу запропоновано оцінювати величиною електричних мікрострумів або накопиченим електричним зарядом.

Ключові слова: концентрація напружень, фретинг-утома, циклічна пластичність, електричний мікрострум при фретингу.

TSYBAN'OV G. V., KURASH YU. P., PISARENKO G. S. Fatigue of low-carbon and low-alloys steels under conditions of fretting

Experimental investigations have been conducted into fatigue of low-carbon and low-alloy steels with stress concentration and sites of fretting origin. It is proposed to evaluate the level of damage accumulation in the fretting zone by the magnitude of electric microcurrents or by the accumulated electric charge developed across the specimen-pad circuit.

Keywords: stress concentrator, fretting fatigue, cyclic plasticity, electric microcurrents in fretting zone.

Продолжается подписка журнала на 2010 год

Для того, чтобы подписаться на журнал через редакцию, необходимо направить письмо-запрос или факс в адрес редакции. Счет-фактура согласно запросу высылается письмом или по факсу. Редакция готова предоставить электронную версию журнала на компакт-диске.

Стоимость одного журнала – 28 грн.

Годовая подписка – 336 грн. (для Украины).

Годовая подписка для зарубежных стран – 90 \$.