

Усталость малоуглеродистых и низколегированных сталей для автомобильной промышленности. Сообщение 2. Оценка уровня влияния фреттинга на долговечность посредством измерения электрических микротоков в зоне контакта и скольжения

Г. В. Цыбанев, С. Л. Пономарев

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Предложена методика измерения уровня электрических микротоков в зоне контакта и скольжения при фреттинг-усталости. Приведены экспериментальные закономерности изменения токов в процессе испытаний. Установлены существенно более высокие уровни токов при фреттинг-усталости низколегированных сталей по сравнению с малоуглеродистыми, что соответствует и более значительному снижению усталостных характеристик первых. Предложено использовать полученные электрические параметры для сравнительной оценки совместимости материалов в условиях фреттинга.

Введение. В настоящее время большое внимание уделяется повышению ресурса проектируемых машин и конструкций, а также обоснованию продления ресурса изделий, находящихся в эксплуатации. С увеличением времени нахождения изделий в эксплуатации возрастает вероятность обнаружения очагов повреждения, в образовании которых важную роль играет не только нагрузка, но и временной фактор. Одной из причин таких повреждений является фреттинг в контактирующих поверхностях. Последние публикации по вопросам фреттинг-усталости материалов в основном посвящены оценке влияния на интенсивность фреттинга различных силовых параметров [1–3], а также неоднородности напряженно-деформированного состояния в зоне контакта [4–6]. Однако оценка очагов фреттинга как своеобразных концентраторов напряжений со специфическим сложным напряженным состоянием показывает, что их влияние соответствует эффективному концентратору напряжений, составляющему для сталей среднего уровня прочности около 2,0 [7]. В то же время известны фреттинг-пары, в которых снижение предела выносливости в условиях фреттинга достигает 6...10 раз [8, 9], что, по-видимому, связано с некоторыми другими явлениями, кроме механических, присутствующими при фреттинг-усталости. В первую очередь – это может быть электрофизическое и электрохимическое повреждение зоны контакта и трения [10–12]. Существенную роль играет и временной фактор [13], отмеченный нами выше и участвующий в деградации материалов при длительной эксплуатации. Представленные в [14] данные свидетельствуют о различном влиянии концентрации напряжений и фреттинга на усталостные характеристики малоуглеродистых и низколегированных сталей, что также может быть связано с различным уровнем электрофизических и электрохимических повреждений этих материалов, учитывая их различный химический состав. Принимая во внимание такое предположение, ниже выполнен цикл исследований, направленный на выяснение особенностей поведения указанных сталей под влиянием концентраторов и фреттинга.

Методика и материалы для исследований. Основываясь на данных работ [8, 11, 15, 16], авторами экспериментально отмечено протекание электрического тока в контактирующей паре, которое сопровождается фреттинг. Причиной таких токов могут быть термоэлектрические, гальваномагнитные, электроэрозионные и электрохимические явления в процессе трения и циклического нагружения металлов. В связи с этим методика испытаний на фреттинг-усталость была дополнена схемой для измерения электрических микротоков фреттинга. При испытаниях использовали цилиндрические образцы круглого сечения 1 с диаметром рабочей части 5 мм, к которой для создания фреттинга прижимались винтами 4 через сферы 5 П-образные накладки 6 с расстоянием между контактирующими опорами 10 мм и шириной опор 1 мм (рис. 1). Прижатие накладок к образцу осуществляли с помощью динамометрического кольца 3, используемого одновременно для измерения усилия прижатия. С этой целью на поверхность кольца наклеивали полупроводниковые тензорезисторы. Изменение сопротивления тензорезисторов с изменением усилия прижатия было протарировано. Измерения выполняли цифровым вольтметром Ц68003, работающим в режиме омметра.

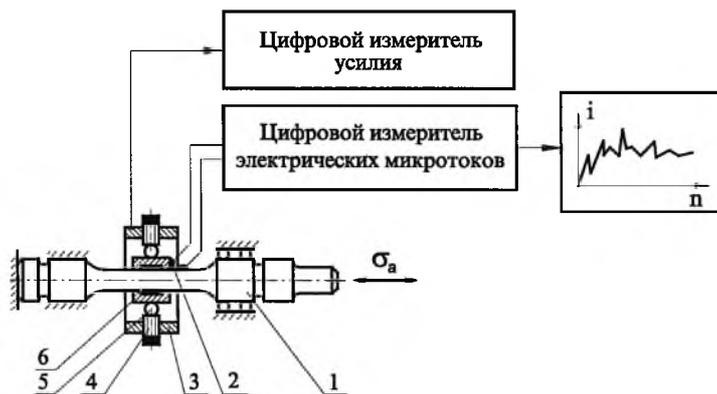


Рис. 1. Схема исследования образца на фреттинг-усталость.

При реализации принятой схемы испытаний амплитуду относительного скольжения образца и контртела определяли оптическим методом. Проведенные испытания показали, что достаточно точным приближением для определения амплитуды скольжения может быть зависимость

$$A_c = 0,5b \left[\frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{E_H} \right)^k \right] = 0,5b\varepsilon_a, \quad (1)$$

где b – базовое расстояние между опорами П-образных накладок; σ_a – амплитуда циклического напряжения; ε_a – амплитуда циклической деформации; E – модуль продольной упругости материала образца; E_H, k – постоянные, определяющие циклическое неупругое деформирование материала.

Для регистрации кинетики электрических микротоков фреттинга $\dot{i}(n)$, где n – текущее значение числа циклов нагружения, на поверхностях накладки и образца вблизи зоны их контакта устанавливали контакты 2, подключенные к высокочувствительному цифровому вольтметру В7-21/А1, имеющему нижний предел измерения при работе в режиме амперметра $1 \cdot 10^{-11}$ А. В разработанной схеме измерения микротоков используются достоинства цифровых измерительных приборов, что позволяет избежать инерционности и громоздкости компенсационных схем, применяемых ранее [8].

Частота нагружения образцов симметричным растяжением–сжатием составляла 36 Гц, контактное давление σ_k в фреттинг-паре – 120 МПа, материал накладки – сталь 45.

На основании полученных ранее данных [14] для исследований с измерением электрических микротоков фреттинга использовались образцы из трех сталей совместно с накладками из стали 45. Механические свойства исследуемых материалов приведены в таблице.

Механические свойства исследуемых сталей

Сталь	σ_B , 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	–
45	620,0	390,0	26,0	67,0

Эти стали выбраны исходя из следующих соображений:

15кп – базовая сталь в проводимых испытаниях, относительно нее оцениваются характеристики других сталей. Кроме того, она представляет собой малоуглеродистую сталь, не содержащую легирующих добавок, и при испытаниях на фреттинг-усталость показала малое снижение предела выносливости;

15Г2АФДпс – низколегированная сталь, обладающая высокой циклической пластичностью, сравнимой со сталью 15кп. При испытаниях на фреттинг-усталость показала наибольшее снижение предела выносливости;

22Г2ТЮ – низколегированная сталь с невысокой циклической пластичностью, проявившая наименьшее среди испытанных низколегированных сталей снижение предела выносливости при фреттинг-усталости.

Исследования выполняли при трех уровнях амплитуды напряжения, выбранных таким образом, чтобы для каждой стали они соответствовали диапазону долговечностей $(1-5) \cdot 10^5 \dots (2-3) \cdot 10^6$ цикл до разрушения. При испытаниях с указанной долговечностью успевает проявиться эффект влияния фреттинга и в то же время длительность испытаний не очень велика.

Результаты экспериментального исследования электрических токов при фреттинг-усталости и их обсуждение. Протекание электрического тока в проводнике является следствием движения выделяющихся

заряженных частиц. При фреттинг-усталости исследуемых сталей это может быть связано со следующими процессами:

коррозией металла, содержащего включения другого металла, отличающегося значением электродного потенциала;

контактной коррозией, обусловленной контактом металлов с различными электродными потенциалами в присутствии атмосферной влаги;

окислением железа (стали), при котором присутствие металла легирующих добавок оказывает поляризующее воздействие на основной металл, увеличивая скорость реакции окисления;

механическим разрушением металла при износе, сопровождающимся образованием заряженных частиц (ионов металла и электронов) в результате эффекта Крамера.

Выделением заряженных частиц характеризуется не только последнее из перечисленных явлений, но и первые три, являющиеся реакциями окислительного типа. Таким образом, интенсивность химических реакций в зоне фреттинга, усиливаемая сложным напряженным состоянием, может быть оценена по количеству выделившихся при этом заряженных частиц. Измеряя текущие значения тока i в зависимости от числа циклов нагружения по описанной выше методике, величину суммарного заряда, выделившегося в течение времени нагружения, найдем путем интегрирования:

$$Q = \int_0^{t_H} i(t) dt, \quad (2)$$

где $t_H = n / f$ – время испытаний; f – частота нагружения; n – текущее число циклов нагружения; t – текущее время.

Зависимости $i = i(t)$ были экспериментально определены для трех сталей. Интегрирование выполняли численным методом:

$$Q = \left(\frac{1}{f} \right) \sum_{j=1}^m 0,5(i_j + i_{j+1})(n_{j+1} - n), \quad (3)$$

где m – количество дискретных измеренных значений микротока i_j ; $j = (1 - m)$ – порядковый номер измерения.

Экспериментальные значения токов фреттинга в зависимости от числа циклов нагружения представлены на рис. 2. (Данные получены по испытаниям 2-3 образцов на каждом уровне σ_a .) Как следует из приведенных графиков, на начальной стадии нагружения для всех сталей и уровней σ_a токи фреттинга быстро нарастают с увеличением числа циклов, достигая некоторого уровня насыщения. Процессы схватывания и образования слоя окислов между контактирующими поверхностями также отражаются на кинетике микротоков: в течение испытаний наблюдается их случайное скачкообразное возрастание и снижение с изменением знака на противоположный. Несмотря на эти колебания, в среднем наблюдается постепенное увеличение тока или наступление его стабилизации по достижении опре-

деленной наработки. Уровень микротоков зависит от реализуемых параметров фреттинга, а также, как будет показано ниже, от природы контактирующих материалов.

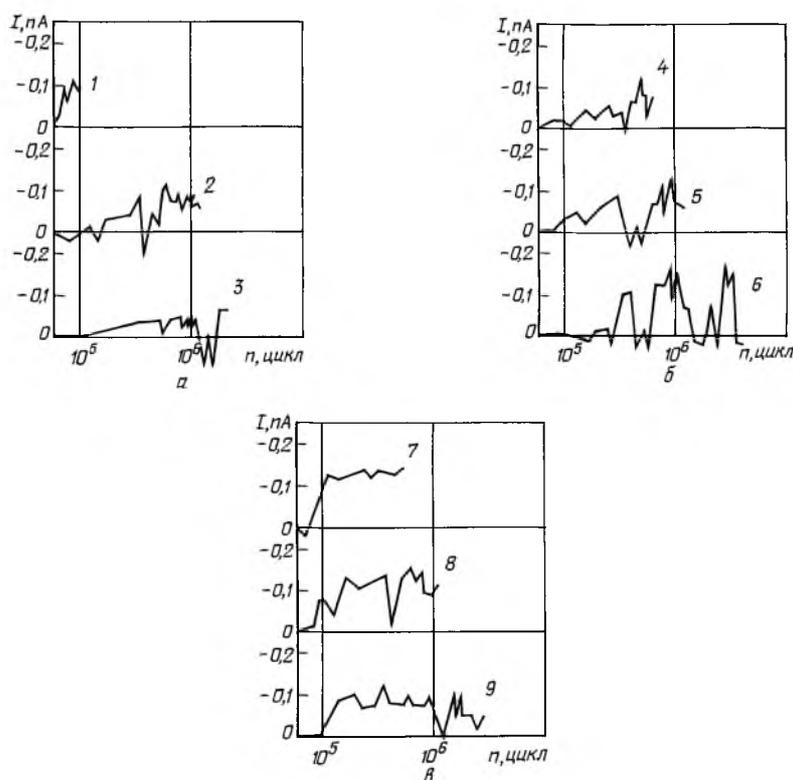


Рис. 2. Кинетика микротоков фреттинга в процессе испытания сталей 15кп (а), 15Г2АФДпс (б) и 22Г2ТЮ (в): 1 – $\sigma_a = 210$ МПа, $Q = 0,083 \cdot 10^{-4}$ Кл; 2 – $\sigma_a = 180$ МПа, $Q = 0,854 \cdot 10^{-4}$ Кл; 3 – $\sigma_a = 170$ МПа, $Q = 1,170 \cdot 10^{-4}$ Кл; 4 – $\sigma_a = 200$ МПа, $Q = 5,01 \cdot 10^{-4}$ Кл; 5 – $\sigma_a = 160$ МПа, $Q = 7,88 \cdot 10^{-4}$ Кл; 6 – $\sigma_a = 130$ МПа, $Q = 23,43 \cdot 10^{-4}$ Кл; 7 – $\sigma_a = 200$ МПа, $Q = 1,19 \cdot 10^{-4}$ Кл; 8 – $\sigma_a = 180$ МПа, $Q = 2,28 \cdot 10^{-4}$ Кл; 9 – $\sigma_a = 160$ МПа, $Q = 5,13 \cdot 10^{-4}$ Кл.

Важно отметить, что зарегистрированное в экспериментах направление протекания токов фреттинга соответствует движению положительных зарядов – ионов металла от образца к контртелу. Это означает, что в результате электрохимических процессов, сопровождающих фреттинг в зоне контакта образца и контртела, разрушению подвергается материал образца. Появление на зависимостях $i = i(n)$ выбросов с положительными и отрицательными значениями токов связано с образованием между образцом и контртелом слоя окисла, меняющего полярность протекающего тока.

Если в процессе испытания снизить амплитуду циклической нагрузки до нуля, то и уровень микротоков фреттинга уменьшается до нуля. Последующее нагружение на тот же уровень нагрузки приводит к восстановлению уровня микротока, что свидетельствует о взаимосвязи выделяемых электрических зарядов со скольжением в зоне контакта образца и контртела и

независимости их от возможного наличия каких-либо токов, наведенных в системе измерения.

Значения заряда Q для наработок $0,8N$ и N (N – число циклов до разрушения образца) определяли в соответствии с (3). Результаты экспериментов (рис. 3,а) показывают, что как при полной долговечности N , так и при наработке $n = 0,8N$ величина заряда Q возрастает с увеличением времени нагружения.

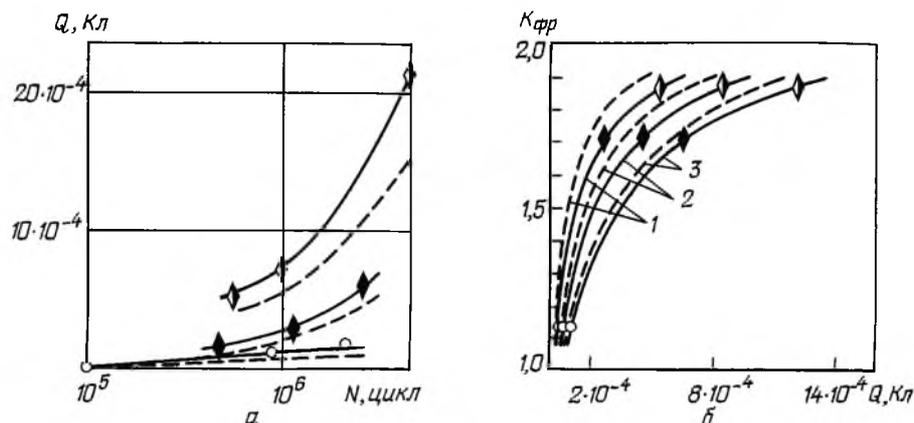


Рис. 3. Взаимосвязь величины накопленного заряда с долговечностью образцов (а) и с эффективным коэффициентом фреттинга (б) для сталей 15 кп (светлые точки), 22Г2ТЮ (темные) и 15Г2АФДпс (полузатемненные): 1, 2, 3 – значения $K_{фр}$, рассчитанные соответственно для долговечностей $0,8 \cdot 10^6$; $1,5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

При этом наблюдается значительное различие в значениях Q для исследуемых сталей. Самое низкое значение величины заряда Q получено при исследовании стали 15кп. Существенно выше значения Q у стали 22Г2ТЮ и еще более высокую активность с точки зрения выделения заряженных частиц в процессе фреттинга проявляет сталь 15Г2АФДпс. Из этих результатов следует, что при фреттинг-усталости сталей в контактирующей паре выделяются заряженные частицы, количество которых у низколегированных сталей на 0,5...1,0 порядок больше, чем у малоуглеродистых.

Поскольку при постановке эксперимента предполагалось установление взаимосвязи между уровнем повреждения сталей в условиях фреттинга и уровнем электрофизических и электрических процессов, оцениваемых в нашем случае величиной Q , ниже предпринята такая попытка. Рис. 3,б иллюстрирует изменение эффективного коэффициента фреттинга $K_{фр}$ в зависимости от величины накопленного электрического заряда. Коэффициент $K_{фр}$ определяли по кривым усталости для трех значений долговечностей как отношение амплитуд напряжений в гладких образцах и образцах с фреттинг-накладками. Видно, что эти величины взаимосвязаны: увеличение Q приводит к росту $K_{фр}$. Такая взаимосвязь сохраняется как для значений Q , определенных при циклической наработке $n = 0,8N$, так и при полной долговечности N . Другими словами, величина накопленного заряда

Q не связана непосредственно с циклической долговечностью и стадиями усталости материала в условиях фреттинга, а является параметром, изменяющимся пропорционально интенсивности повреждения материалов в очаге фреттинга и позволяющим выполнить сравнительную оценку контактирующих материалов на предмет их лучшей или худшей способности противостоять фреттинг-процессам. При этом измерения могут быть выполнены не на всей базе испытаний до разрушения, а лишь на соизмеримых участках циклической наработки. Подчеркнем также, что точки на зависимостях $K_{фр} - Q$ получены на разных сталях и отражают тенденцию к стабилизации эффективного коэффициента влияния фреттинга при увеличении значений Q , в то время как на начальном участке зависимости имеет место достаточно быстрое повышение $K_{фр}$ при малых изменениях Q .

Отметим, что наблюдаемые в эксперименте более высокие значения накопленного заряда у низколегированных сталей по сравнению с малоуглеродистыми не являются следствием более высоких коэффициентов трения во фреттинг-паре при циклическом нагружении, что могло быть обусловлено процессами адгезии и схватывания металла в зоне контакта и, следовательно, более высокими касательными напряжениями в этой зоне.

Для сравнения материалов по интенсивности фреттинг-процессов, оцениваемых уровнем выделяемого в контакте электрического заряда, введем значение удельного заряда q , выделяющегося в очаге фреттинга за один цикл нагружения:

$$q = \frac{Q}{N} = \frac{1}{N} \int_0^{t_n} i(t) dt. \quad (4)$$

Как было показано ранее, для выделения электрических зарядов в зоне фреттинг-контакта необходимо наличие в первую очередь взаимного скольжения контактирующих поверхностей. При используемой схеме испытаний амплитуда скольжения может быть записана через амплитуду деформации в соответствии с (1). Теперь представим зависимости введенной величины q от первопричины выделения зарядов – амплитуды скольжения. Как видно из рис. 4, у низколегированных сталей интенсивность выделения заряженных частиц с увеличением амплитуды деформации возрастает (кривые 1, 2), что может быть обусловлено усилением процесса разрушения материала при повышении амплитуды скольжения. В то же время у малоуглеродистой стали 15кп такого увеличения не наблюдается. Это может быть связано с выходом на уровень насыщения зависимости $q - \varepsilon_a$ в исследуемом диапазоне деформаций, что исключает дополнительное повреждение материала. Отметим также, что соотношение уровней удельного заряда q у исследуемых сталей сохраняется таким же, как и соотношение уровней полного заряда Q . Таким образом, малоуглеродистая сталь 15кп отличается от низколегированных не только более низкой величиной выделяемого во фреттинг-паре удельного электрического заряда, но и его постоянным значением при увеличении амплитуды скольжения, в то время как для низколегированных сталей его величина возрастает.

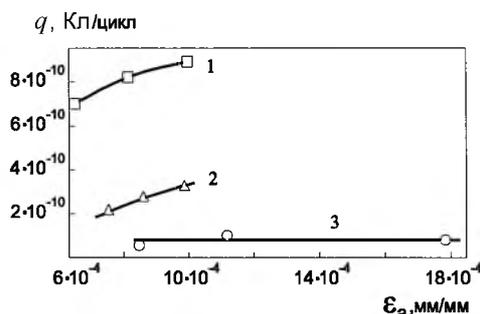


Рис. 4. Зависимость удельного электрического заряда от амплитуды деформации для исследуемых сталей 15Г2АФДпс (1), 22Г2ТЮ (2) и 15 кп (3).

Заметим также, что, возможно, закономерности были бы другими, если образцы и контртела выполнить из одного и того же материала. Однако такие данные в настоящее время отсутствуют.

Выводы

1. Установлены закономерности изменения токов фреттинга в процессе фреттинг-усталости: увеличивается усредненное за некоторое число циклов нагружения значение тока при увеличении наработки с выходом его на стабилизацию. В процессе испытаний наблюдаются колебания текущих значений тока с изменением знака, что отражает сложные процессы в зоне фреттинг-контакта с образованием частиц, влияющих на полярность тока.

2. Величина накопленного электрического заряда при фреттинг-усталости низколегированных сталей на 0,5–1,0 порядок выше, чем у малоуглеродистых, за счет большей активности химических составляющих сталей и продуктов их окисления в зоне контакта и трения. Следовательно, усталостные характеристики низколегированных сталей по сравнению с малоуглеродистыми снижаются значительно больше.

3. Введена величина удельного электрического заряда при фреттинге, который для малоуглеродистой стали не изменяется с повышением амплитуды скольжения, а для низколегированных — увеличивается. Как величина полного заряда, так и его удельное значение могут быть использованы для оценки работоспособности различных пар металла в условиях фреттинга.

4. Установленная зависимость электрических параметров, измеряемых при скольжении в фреттинг-паре, от уровня повреждения сталей в зоне фреттинга не дала ответа на вопрос, являются ли протекающие в цепи образец-накладка электрические токи повреждающими или же они только отражают интенсивность сложных процессов взаимодействия материалов и продуктов фреттинга в зоне контакта и трения. Этот вопрос требует дальнейших исследований.

Резюме

Запропоновано методику для вимірювання рівня електричних мікрострумів у зоні контакту та ковзання при фреттинг-утомі. Наведено експериментальні

закономірності зміни струмів у процесі випробувань. Встановлено суттєво більш високі рівні струмів при фретинг-утомі низьколегованих сталей у порівнянні з маловуглецевими, що відповідає і більш значному зменшенню утомних характеристик перших. Запропоновано використовувати отримані електричні параметри для порівняльної оцінки сумісності матеріалів в умовах фретингу.

1. Nix K. J. and Lindley T. C. The influence of relative slip range and contact material on the fretting fatigue properties of 35NiCrMoV rotor steel // *Wear*. – 1988. – **25**. – P. 147 – 162.
2. Sato K. Determination and control of contact pressure distribution in fretting fatigue, standartization of fretting fatigue methods and equipments // *ASTM STP*. – 1992. – **1159**. – P. 85 – 100.
3. Dominguez J. Cyclic variation in friction forces and contact stress during fretting fatigue // *Wear*. – 1998. – **218**. – P. 45 – 53.
4. Giannakopoulos A. E. and Suresh S. A three-dimensional analysis of fretting fatigue // *Acta mater.* – 1998. – **46**, N 1. – P. 177 – 192.
5. Petiot C., Vencent L., Dang Van K., et al. An analysis of fretting-fatigue failure combined with numerical calculations to predict crack nucleation // *Wear*. – 1995. – **181**. – P. 101 – 111.
6. Rooke D. P. and Jones D. A. Stress intensity factors in fretting fatigue // *J. Strain Anal.* – 1972. – **14**, N 1. – P. 1 – 6.
7. Tanaka K., Muton Y., Sakoda S., et al. Fretting fatigue in 0.55C spring steel and 0.45C carbon steel // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 1985. – **8**, N 2. – P. 129 – 142.
8. Голего Н. Л., Алябьев А. Я., Шевеля В. В. Фреттинг-коррозия металлов. – Киев: Техніка, 1974. – 272 с.
9. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
10. Bethume B. and Waterhouse R. B. Electrochemical studies of fretting corrosion // *Wear*. – 1968. – N 12. – P. 27 – 34.
11. Иванова В. С. Усталость и хрупкость металлических материалов. – М.: Наука, 1968. – 216 с.
12. Уотерхауз Р. Б. Фреттинг-коррозия. – Л.: Машиностроение, 1976. – 272 с.
13. Uhlig H. H. Mechanism of fretting corrosion // *Trans. ASME, J. Appl. Mech.* – 1954. – **76**, Dec. – P. A401 – A407.
14. Цыбанев Г. В., Пономарев С. Л. Усталость малоуглеродистых и низколегированных сталей для автомобильной промышленности. Сообщ. 1. Влияние концентрации напряжений и фреттинга на долговечность натурных автомобильных колес и образцов // *Пробл. прочности*. – 2001. – № 1. – С. 15 – 25.

15. *Иванова В. С., Одинг И. А.* Усталость металлов при контактном трении // Изв. АН СССР. – 1957. – Вып. 1. – С. 95 – 102.
16. *Цыбанев Г. В., Пономарев С. Л.* Анализ взаимосвязи параметров, характеризующих сопротивление усталости сталей при наличии фреттинг-коррозии и концентрации напряжений // Повышение надежности и долговечности машин и сооружений: Тезисы науч.-техн. конф., Ч. 2. – Киев: ИПП АН УССР, 1991. – С. 112 – 113.

Поступила 15. 12. 99