

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 669.017:539.43

Методика комплексного исследования фреттинг-усталостного повреждения металлов

Г. В. Цыбанев, Ю. П. Кураш

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Описана методика комплексного исследования фреттинг-усталостного повреждения металлов и конструкционных сплавов. Особенностью методики является возможность измерения и контроля всех основных механических параметров фреттинг-усталости с использованием персонального компьютера для первичной обработки и накопления результатов испытаний в масштабе реального времени. Разработанная методика позволяет существенно снизить погрешность экспериментов, повысить их информативность и производительность. В качестве параметра для оценки уровня повреждающих процессов немеханического характера используется величина электрических микротоков, протекающих в фреттинг-парах при испытании.

Ключевые слова: фреттинг-усталость, экспериментальная методика, фреттинг-ток.

Явление фреттинг-усталости наблюдается при контакте деталей, подвергающихся циклическому нагружению. Трение в месте контакта деталей становится первопричиной ускоренного развития усталостных трещин, что может привести к значительному снижению усталостной прочности. Фреттинг-усталостное повреждение характерно для большого числа ответственных соединений [1], например заклепочных, болтовых, штифтовых, замковых, прессовых, и представляет угрозу для таких ответственных деталей, как валы, оси, трубки теплообменных аппаратов энергетического оборудования, муфты, канаты, лопатки газотурбинных двигателей [2], протезы суставов [3], места соединения электрических проводов [4] и т.д. Лабораторные испытания самолетных конструкций [5] показали, что 90% всех поломок происходит в местах, где возможно контактное трение циклически нагруженных деталей.

Поскольку прогноз прочности и долговечности материалов и элементов конструкций в условиях фреттинга основывается на экспериментальном изучении влияния различных параметров взаимодействия контактирующих поверхностей на зарождение и рост трещины, существенную роль здесь играют современные методики испытаний. Ввиду многофакторности процесса фреттинг-усталости для накопления и обработки информации в масштабе реального времени в настоящее время применяются средства вычислительной техники [6].

Кроме того, очаг фреттинга в условиях циклического нагружения является не только зоной специфического локального сложного напряженного состояния, но и местом протекания химических реакций окислительного типа, возникновения эффектов электрофизической, электромагнитной, электрохимической и т.п. природы [7, 8]. В этой связи новые методики экспериментальных исследований фреттинг-усталости должны позволять измерять и контролировать как параметры механического нагружения, так и уровень деградации материалов фреттинг-пары за счет протекания процессов немеханической природы [9]. В разработанной методике комплексного исследования фреттинг-усталости материалов и сплавов для оценки интенсивности процессов немеханической природы предлагается использовать величину электрических триботочков, протекающих в фреттинг-парах.

Ввиду локального сложного напряженного состояния материала в зоне контакта и трения для испытаний на фреттинг-усталость была выбрана схема, приведенная на рис. 1. Как следует из схемы, реализован контакт плоскость-плоскость, а циклическое нагружение осуществляется приложением нагрузок растяжение–сжатие. Использование такой схемы позволяет независимо варьировать следующие основные параметры фреттинга: амплитуду осевого циклического нагружения, величину контактной нагрузки, площадь контакта (за счет изменения ширины контртела), амплитуду относительного скольжения (за счет изменения жесткости пружины). Кроме того, по величине деформации пружины можно определять действующие в фреттинг-паре силы трения. Отметим, что в отличие от распространенной схемы эксперимента на фреттинг-усталость, где для изменения амплитуды относительного скольжения используются П-образные контртела с различным расстоянием между опорами, в описанной схеме при изменении амплитуды относительного скольжения распределение контактного давления на площадке контакта не изменяется.

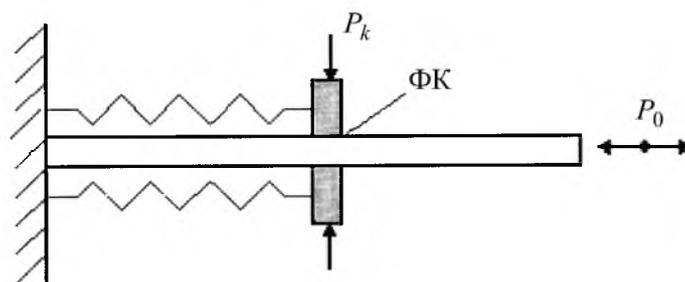


Рис. 1. Схема эксперимента на фреттинг-усталость.

На рис. 2 приведена реальная схема узла создания фреттинга, где роль пружины, удерживающей контртело и измеряющей силу трения, выполняет упругая балка. Подбором толщины балки и расстояния между ее опорами достигается требуемая амплитуда относительного скольжения между образцом и контртелом. На противоположных сторонах балки наклеены тензорезисторы, с которых снимается сигнал, пропорциональный силе трения.

Контактные усилия задаются и контролируются с помощью упругого протарированного кольца. На противоположных сторонах последнего (в зоне максимальной деформации) наклеены две пары тензодатчиков. Амплитуда относительного скольжения может измеряться визуально с помощью микроскопа или специально разработанного электромеханического датчика скольжения (рис. 3). Упругий элемент датчика выполнен в виде разрезанного кольца. Одна сторона кольца посредством специального узла крепления крепится к образцу, другая – к середине накладки. С тензорезисторов, наклеенных в зоне максимальной деформации упругого элемента, снимается сигнал, пропорциональный амплитуде относительного скольжения центра контртела и сечения образца под ним.

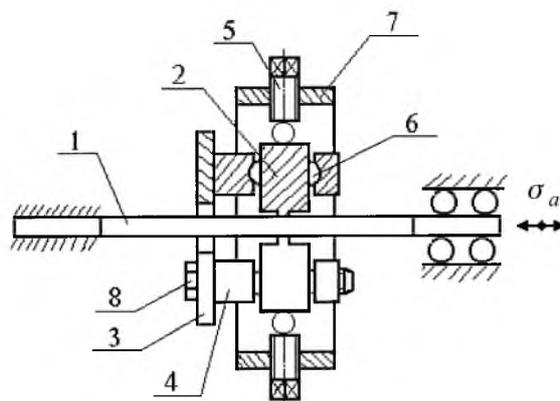


Рис. 2. Схема узла создания фреттинга: 1 – образец; 2 – контртело; 3 – упругая балка; 4 – колодка; 5 – прижимной болт; 6 – сухарик; 7 – динамометрическое кольцо; 8 – болт.

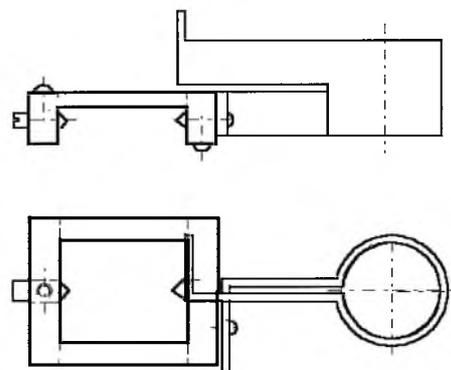


Рис. 3. Датчик амплитуды относительного скольжения.

Вся система для создания фреттинга смонтирована на станине испытательной машины МУН-2 [10]. В испытательной машине механическое нагружение образца осуществляется кривошипным механизмом с регулируемым на ходу эксцентриситетом. На установке МУН-2 можно проводить испытания плоских и круглых металлических образцов на усталость при симметричных и асимметричных циклах приложения динамических нагрузок растяжения–сжатия в условиях стационарного и программного изменения амплитуды напряжения с частотой 36 Гц.

Для замера осевых усилий применяется динамометр [10], представляющий собой упругую скобу, расположенную между пассивным захватом и защемлением. С тензорезисторов, наклеенных на скобу, снимается сигнал, пропорциональный амплитуде осевого циклического нагружения. Осевая деформация образца измеряется электромеханическим датчиком деформации – деформометром [10], установленным на захватах испытательной машины. Кроме того, на станине установки смонтирован микроскоп, предназначенный для определения амплитуд относительного скольжения в разных точках площадки контакта.

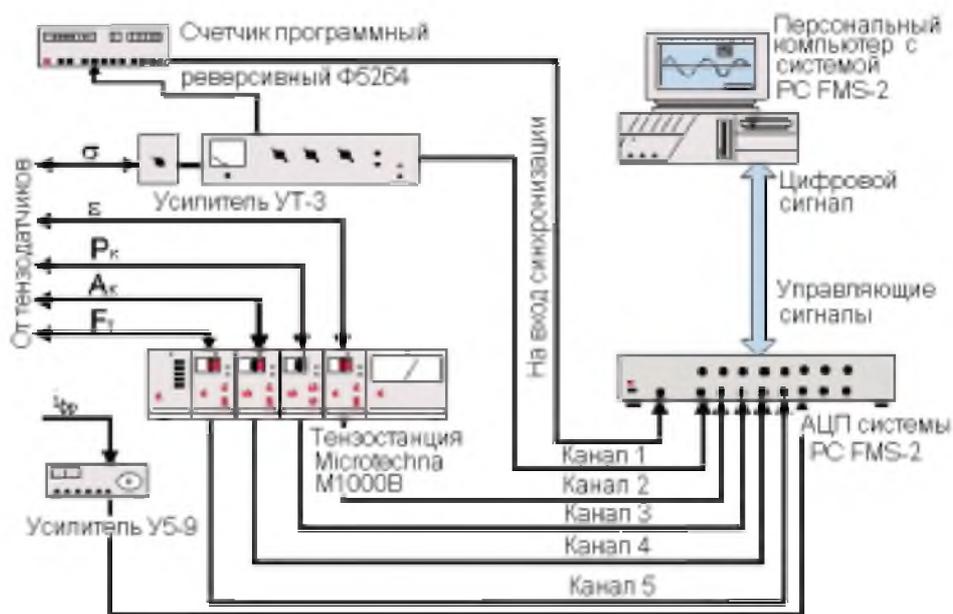


Рис. 4. Схема измерительной системы.

Из рис. 4 следует, что сигналы с тензорезисторов поступают на входы усилителя УТ-3 и тензостанции Microtechna M1000B. На вход электрометрического усилителя напряжений постоянного тока У5-9 поступает триботок с электродов, расположенных на образце и контртеле в непосредственной близости к месту контакта. Усиленные сигналы с выходов усилителей и тензостанции по коаксиальным линиям связи подаются на соответствующие входы аналого-цифрового преобразователя (АЦП) системы PC FMS-2. Кроме того, с выхода усилителя УТ-3 сигнал также поступает на вход программного реверсивного счетчика Ф5264, который используется в качестве делителя частоты. Коэффициент деления частоты устанавливается в пределах 2...999999. С выхода делителя частоты снимается запускающий импульс TTL уровня, поступающий на вход синхронизации АЦП. При поступлении запускающего импульса на вход синхронизации происходит запуск аналого-цифрового преобразователя. После запуска он осуществляет выборку аналоговых сигналов параллельно по всем каналам, преобразование их в цифровой код и ввод в компьютер. Запись величины аналогового

сигнала в цифровой форме производится через равные промежутки времени Δt , постоянные в течение каждого периода выборки. Количество каналов, частота дискретизации и размер одного блока данных устанавливаются программно.

В персональном компьютере инсталлирован пакет программ автоматизированной системы анализа сигналов РС FMS-2 [11], разработанный в научно-техническом центре электронно-вычислительных и измерительных систем "ЭЛВИС" (Киев) в 1991 г. Указанная система представляет собой пакет программных средств для корреляционного и статистического анализа сигналов на компьютерах, совместимых с IBM PC. Измерение, накопление и первичная обработка сигналов на персональном компьютере производится в соответствии с блок-схемой, приведенной на рис. 5.



Рис. 5. Блок-схема программы эксперимента.

Для облегчения и ускорения обработки данные переводятся из временной области в частотную с помощью встроенной функции быстрого Фурье-преобразования по формуле [2]

$$f_j = N^{-1} \left[\sum_{m=0}^{N/2-1} y_{2m} (\omega^2)^{j_2 m} + \omega^j \sum_{m=0}^{N/2-1} y_{2m+1} (\omega^2)^{j_2 m} \right], \quad (1)$$

$$j_2 = 0, 1, \dots, 2^{k-1};$$

$$\omega = \exp\left(-\frac{2\pi i}{N}\right), \quad (2)$$

где f_j – j -я гармоническая компонента; $N = 2^k$ – количество отсчетов (временных выборок) в блоке данных, которое может принимать одно из следующих значений: 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192; k – целое число, принимающее соответственно значения: 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13; $i^2 = -1$; y_m – величина t -го отсчета.

Для адекватного описания аналоговых сигналов в цифровой форме частотное разрешение ΔF (промежуток между двумя соседними составляющими в частотной области), в соответствии с критерием Рэля [13], определяется зависимостью [13]

$$\Delta F = \frac{1}{T} = \frac{1}{\Delta t N}, \quad (3)$$

где T – длительность сигнала; Δt – период дискретизации АЦП.

Согласно теории Шеннона о выборке [3], максимальная частота F_{\max} , представленная в блоке данных в частотной области, связана с частотой выборки $F_{\text{выб}}$ соотношением

$$F_{\max} = \frac{1}{2} F_{\text{выб}} = \frac{1}{\Delta t}. \quad (4)$$

В настоящей методике приняты следующие значения параметров выборки:

размер блока данных N , отсчетов	1024
частота выборки $F_{\text{выб}}$, Гц	2304
максимальная частота F_{\max} , Гц	1152
частотное разрешение ΔF , Гц	2,25

Выбор этих значений позволяет накапливать в одном блоке данных значения измеряемой величины в течение 16 циклов нагружения с частотой дискретизации 64 точки за цикл нагружения. Такая частота дискретизации достаточна для адекватного описания протекающих процессов и позволяет рационально использовать системные ресурсы.

Для повышения достоверности результатов и исключения влияния случайных помех, а также электрических шумов, наводимых в линиях связи и усилителях, предусмотрено фильтрование входного сигнала и усреднение его по 16 циклам нагружения. Фильтрование входного сигнала осуществляется постановкой цифрового фильтра: из блока данных, содержащего спектр входного сигнала, вычитается блок данных, содержащий спектр сигнала электрических шумов, который определяется на стадии тарировки для каждого измерительного канала. Эффективность такого метода иллюстрирует рис. 6 на примере сигнала канала измерения контактного усилия.

Расчет измеряемых величин в рабочих единицах осуществляется по формуле

$$Y_i = k_i U_i, \quad (5)$$

где Y_i – значение измеряемого i -м каналом АЦП параметра фреттинга в рабочих единицах; k_i – коэффициент преобразования для i -го измерительного канала, величина которого определяется экспериментально путем тарировки; U_i – значение напряжения, измеренного АЦП.

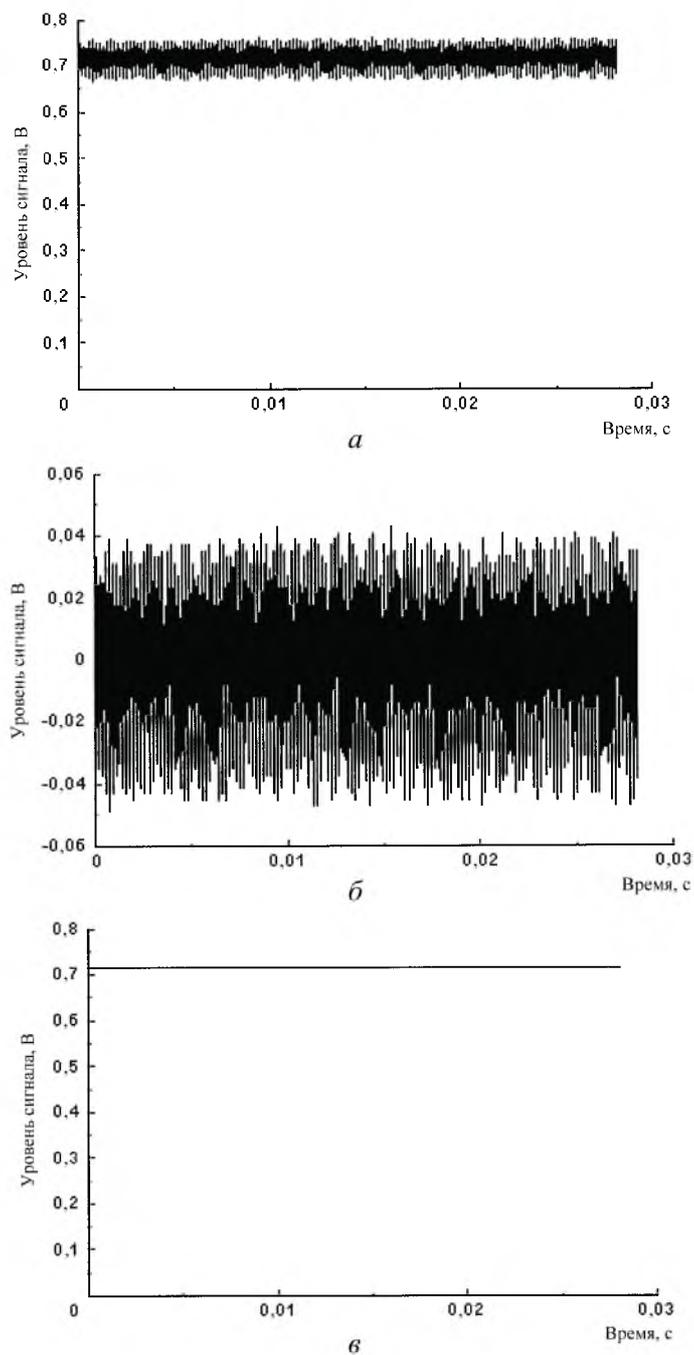


Рис. 6. Пример обработки сигнала с использованием компьютера: *а, в* – входной сигнал соответственно до и после обработки; *б* – предварительно полученный сигнал электрических шумов в канале.

С целью изучения накопления усталостного повреждения в металлах при циклическом нагружении исследуется кинетика неупругого деформирования металла. Возможность такого исследования базируется, как показывают литературные данные [14, 15], на общности физических процессов неупругого деформирования металлов и процессов, приводящих к возникновению усталостной трещины. В основу принципа определения неупругой деформации $\varepsilon_{a.п}$ положен метод динамической петли гистерезиса [4]. В соответствии с этим методом амплитуду полной деформации ε_a можно представить в виде суммы пластической ($\varepsilon_{a.п}$) и упругой ($\varepsilon_{a.у}$) составляющих. Согласно закону Гука, упругая составляющая деформации пропорциональна амплитуде циклического нагружения σ_a . С учетом этого можно записать [4]

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{a.у} + \varepsilon_{a.п}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_{a.у} = \frac{\sigma_a}{E}$.

Таким образом, определив амплитуду полной деформации ε_a и амплитуду циклического напряжения σ_a , можно вычислить амплитуду пластической деформации

$$\varepsilon_{a.п} = \varepsilon_a - \frac{\sigma_a}{E}. \quad (7)$$

Применение персонального компьютера и аналого-цифрового преобразователя позволяет определять неупругую деформацию и рассеяние энергии в материале непосредственно в процессе эксперимента.

Однако для полного описания фреттинг-усталости использование одних механических параметров недостаточно. Необходимо учитывать также физические параметры, характеризующие интенсивность фреттинга в сталях. В данной работе в качестве такого параметра предлагается суммарный заряд выделившихся заряженных частиц Q . Величина этого заряда может быть определена, если в процессе испытания образца фиксировать значения микротока фреттинга $i(t)$, протекающего в цепи образец-контртело, а затем проинтегрировать полученную зависимость по времени

$$Q = \int_0^{t_n} i(t) dt. \quad (8)$$

Численное интегрирование зависимости (8) осуществляется по формуле

$$Q = \frac{1}{f} \sum_{j=1}^m \frac{i_j + i_{j+1}}{2} (n_{j+1} - n_j), \quad (9)$$

где f – частота нагружения, Гц; m – количество измерений значений i ; i_j , n_j – результаты измерений триботока и наработки соответственно.

Проведенные ранее исследования [9] показали колебание величины микротока фреттинга $i(t)$ в процессе испытаний. Кроме того, осредненное по времени между двумя измерениями значение микротоков фреттинга, достигнув определенного уровня, снижает скорость роста и остается постоянным или медленно возрастающим вплоть до момента разрушения образца. Колебания значений микротока фреттинга авторы [9] связывают с изменением состояния трущихся поверхностей, в результате чего может изменяться амплитуда относительного скольжения вплоть до кратковременного схватывания поверхностей, а также с влиянием продуктов фреттинга и окислов и их движением на контактирующих поверхностях. Кроме того, установлено, что если в процессе испытаний остановить нагружение образца, то и уровень микротока фреттинга снизится до нуля. При возобновлении нагружения значения микротока фреттинга в течение короткого промежутка времени снова выходят на уровень, который имел место до этого. Направление протекания микротока фреттинга соответствует движению положительных зарядов – ионов металла от образца к контртелу, что означает разрушение поверхности образца. Таким образом, кинетика микротоков фреттинга $i(t)$ отражает текущее состояние контактирующих поверхностей. Величина же заряда Q , выделившегося на контактирующих поверхностях при испытании, является характеристикой, отражающей интенсивность процесса разрушения.

В таблице в качестве примера приведены результаты испытания образца из алюминиевого сплава АМг6Н с контртелом из того же материала при ступенчатом увеличении контактного давления, полученные по описанной выше методике. В процессе эксперимента амплитуда циклической нагрузки и площадь контакта оставались постоянными.

Результаты исследования фреттинг-пары АМг6Н–АМг6Н

Число циклов нагружения $N \cdot 10^{-3}$, цикл	Амплитуда осевого циклического нагружения σ_a , МПа	Контактное давление P , МПа	Сила трения $F_{тр}$, Н	Амплитуда относительного скольжения, мкм
20	92,0	0,8	38,5	86,51
40	92,0	1,6	55,0	70,78
60	92,0	2,4	128,0	55,05
80	92,0	3,2	162,0	39,32
100	92,0	4,0	245,0	23,59
120	92,0	4,8	292,0	7,86
140	92,0	5,6	300,0	0

Методика комплексного исследования фреттинг-усталости с измерительно-вычислительным комплексом на базе персонального компьютера имеет существенные преимущества по сравнению с другими методиками, поскольку ее использование, как показывает опыт, приводит к принципиально новым возможностям в таких направлениях.

1. Измерение основных механических параметров фреттинг-усталости и величины триботоков, протекающих в фреттинг-паре. По величине суммарного заряда выделившихся частиц можно оценить уровень повреждающих процессов немеханического характера.

2. Повышение точности замера исследуемых величин. Такая возможность реализована в связи с проведением следующих мероприятий:

а) осуществление с помощью персонального компьютера операций усреднения исследуемых величин и фильтрации входного сигнала от электрических шумов;

б) исключение влияния на точность замера исследуемых величин субъективного фактора, связанного с участием экспериментатора.

3. Возможность накопления большого количества данных в формате, допускающем их дальнейшую обработку с использованием компьютерных программ типа Microcal Origin (MicroCal Software Inc.), Microsoft Excel (Microsoft Corp.) и др.

4. Автоматизация первичной обработки данных обеспечивает их получение в масштабе реального времени и визуализацию результатов эксперимента непосредственно в процессе его проведения.

Резюме

Описано методику комплексного дослідження фреттинг-утомного пошкодження металів і конструкційних сплавів. Особливістю методики є можливість вимірювання і контролю усіх основних механічних параметрів фреттинг-утоми з використанням персонального комп'ютера для первинної обробки та накопичення результатів випробувань у масштабі реального часу. Розроблена методика дозволяє суттєво зменшити похибку експерименту, збільшити його інформативність та продуктивність. Як параметр для оцінки рівня пошкоджувальних процесів немеханічного характеру використовується величина електричних мікрострумів, що протікають у фреттинг-парах під час випробування.

1. Шевеля В. В., Калда Г. С. Фреттинг-усталость металлов. – Хмельницкий: Поділля, 1998. – 299 с.
2. Цыбанев Г. В., Налимов Ю. С., Герасимчук О. Н. Методика и результаты исследования фреттинг-усталости натуральных замковых соединений лопаток компрессоров ГТД // Пробл. прочности. – 1997. – № 4. – С. 137 – 144.
3. Hoepfner D. W. and Chandrasekaran V. Characterizing the fretting fatigue behavior of Ti-6Al-4V in modular joints // ASTM Spec. Techn. Public. – 1996. – No. 1272. – P. 252 – 265.
4. Zhou Z. R., Cardou A., Goudreau S., and Fiset M. Fretting patterns in conductor-clamp contact zone // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1994. – 17, No. 6. – P. 661 – 669.
5. Hoepfner D., Adibnazari S., and Moesser M. W. Literature Review and Preliminary Studies of Fretting and Fretting Including Special Applications to Aircraft Joints // DOT/FAA/CT 93/2, 1994. – 70 p.

6. *Szolwinski M. P., Harish G., and Farris T. N.* Experimental observation of the effect of contact parameters on fretting fatigue crack nucleation // Proc. of 1995 USAF Structural Integrity Programm Conf. – San Antonio, 1995. – P. 237 – 265.
7. *Голего Н. Л., Алябьев А. Я., Шевеля В. В.* Фреттинг-коррозия металлов. – Киев: Техніка, 1974. – 272 с.
8. *Waterhouse R. B.* Fretting Fatigue. – Oxford: Pergamon Press, 1972. – 272 p.
9. *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: IV Республ. науч.-практ. конф. (Одесса, 24 – 26 сент. 1991 г.). – Киев: ИПП АН УССР, 1991. – Ч. 2 – С. 112 – 113.
10. *Троценко В. Т., Коваль Ю. И., Баглаев Н. И. и др.* Автоматизированная система для исследования усталости и неупругости металлов при многоцикловом нагружении. – Киев, 1980. – 38 с. (Препр. / АН УССР, Ин-т пробл. прочности).
11. *Автоматизированная система анализа сигналов РС FMS-2.* Версия 2.13. Техническое описание новых возможностей. – Киев: Науч.-техн. центр электронно-вычислительных и измерительных систем “ЭЛВИС”, 1992. – 28 с.
12. *Maindonald J. H.* Statistical Computation. – New York: Jonh Wiley & Sons, 1984. – 350 p.
13. *Handbook on Experimental Mechanics / Ed. A. S. Kobayashi.* – New Jarsey: Prentice-Hall, 1987. – 552 p.
14. *Троценко В. Т., Хамаза Л. А., Покровский В. В. и др.* Циклическое деформирование и усталость металлов: В 2 т. Т. 1. Малоцикловая и многоцикловая усталость металлов. – Киев: Наук. думка, 1985. – 216 с.
15. *Иванова В. С., Терентьев В. Ф.* Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 455 с.

Поступила 05. 09. 2000