

Экспериментальная оценка асимметрии цикла поперечных колебаний образцов с поперечными вырезами

А. Б. Ройтман

Запорожский государственный университет, Запорожье, Украина

Представлены результаты вибрационных испытаний образцов при наличии поперечных вырезов с острой вершиной. Наблюдалась асимметрия цикла изгибных колебаний, вызванная вначале наличием концентратора, а затем развивающейся поперечной трещиной. Фиксировались длительности положительного и отрицательного импульсов.

Приведены характерные результаты экспериментов, иллюстрирующие одновременное изменение во времени собственной частоты колебаний образцов и коэффициента асимметрии цикла, равного отношению длительности положительного и отрицательного импульсов.

Установлено, что коэффициент асимметрии цикла объективно отражает характер и степень разрушения образца при вибрационных испытаниях.

Экспериментальные методы вибродиагностики различных типов повреждений, установление причин возникновения и роста трещин продолжают интересовать исследователей. Прежде всего отметим работы, посвященные вибрационной диагностике повреждений промышленных объектов: диагностика колебаний паровых турбоагрегатов [1], стальных балочных конструкций [2], крупных космических платформ на околоземных орбитах [3], рамных конструкций [4], отдельных секций мостов [5], космических аппаратов [6].

Широкое использование композиционных материалов потребовало применения специальных типов вибрационного нагружения (волны Лэмба) для обнаружения расслоений [7].

Вместе с тем, по-видимому, не завершены и до конца не исследованы принципиальные механизмы обнаружения зарождения микротрещины с последующим развитием макротрещин, пластической деформации и других типов неупругости в окрестности повреждений, а также доминирующие признаки накопления дефектов под действием знакопеременных нагрузок. В качестве объектов исследований служили стержневые элементы конструкций [8–10]. Продолжают уточняться методики экспериментальных исследований на динамических стендах [8, 11].

Исследовано [12] влияние асимметрии цикла колебаний на демпфирование и период собственных колебаний консольных сборных образцов без трещин и с трещиной на одной из накладок. Показано, что для образцов без трещин асимметрия цикла колебаний практически не влияет на демпфирование. Для образцов с трещиной демпфирование и период собственных колебаний зависят от асимметрии цикла колебаний, даже если берега трещины все время сжаты. С увеличением степени сжатия берегов трещины чувствительность указанных динамических характеристик к наличию трещины уменьшается.

Однако в настоящее время отечественные промышленные вибрационные испытания ответственных элементов конструкций остаются на уровне 60–70 годов. Так, основным критерием усталостного разрушения лопаток

авиационных газотурбинных двигателей является изменение частоты собственных колебаний на 1...10% в зависимости от условий испытаний [13].

В данной работе предлагается вибродиагностический критерий, основанный на оценке асимметрии цикла изгибных колебаний образцов при наличии поперечных вырезов и трещин.

Методика проведения экспериментов и их результаты. Для испытаний использовали образцы из стали 20 (рис. 1). С помощью специального винтового зажима образец устанавливали на вибратор вибростенда ВЭДС-1500. На стойке с регулируемой высотой закрепляли индукционный вибропреобразователь. При этом его сердечник располагался над лыской образца на расстоянии 1,0...1,5 мм.

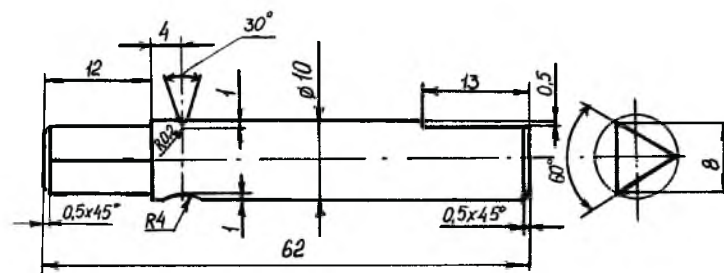


Рис. 1. Схема экспериментального образца.

Блок-схема экспериментальной установки, соответствующая описанной в [12, 13], показана на рис. 2.

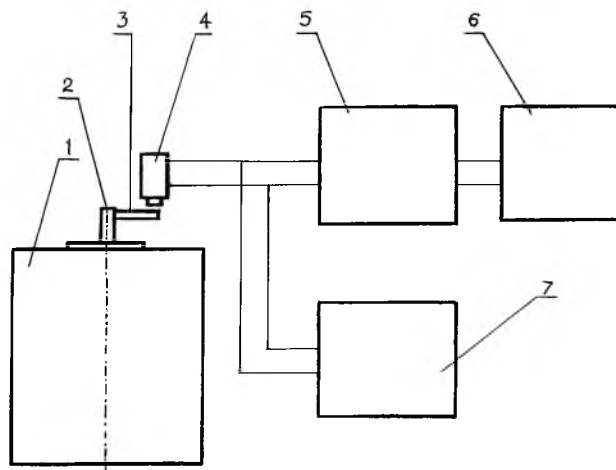


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – вибростенд; 2 – приспособление; 3 – образец; 4 – индукционный датчик; 5 – измеритель шума и вибраций; 6 – частотомер; 7 – осциллограф.

Фиксировались следующие параметры: f – собственная частота первой формы изгибных колебаний образца, Гц; τ_1 – длительность положительного импульса \square , $\mu\text{с}$; τ_2 – длительность отрицательного импульса \sqcap , $\mu\text{с}$; T – период колебаний, $\mu\text{с}$; t – время испытаний, мин.

По усредненным параметрам вычисляли коэффициент асимметрии цикла $R = \tau_{1cp} / \tau_{2cp}$. Показания приборов снимались через каждые 5 мин испытаний. Проведенные испытания образцов при различном уровне виброускорения на столе вибростенда, изменяющемся в диапазоне 160...600 м/с², показали, что оптимальной нагрузкой является ускорение 200...300 м/с², которое может обеспечить постепенное развитие усталостной трещины при сравнительно небольшой длительности испытаний.

Для оценки факторов, оказывающих влияние на коэффициент асимметрии цикла и не связанных с разрушением образцов, был поставлен эксперимент по изучению зависимости длительности положительных и отрицательных импульсов синусоидального тока от амплитуды (напряжения). Синусоидальный сигнал от звукового генератора ГЗ-18 подавался на частотомер ЧЗ-32, с помощью которого измерялась длительность импульсов. При этом амплитуда подаваемого сигнала изменялась в диапазоне 0,1...10,0 В.

Оказалось, что фиксируемое значение длительности положительных и отрицательных импульсов синусоидальных колебаний по-разному реагирует на изменение амплитуды сигнала. В диапазоне 0,1...0,7 В длительности импульсов мало отличаются, но наблюдается разброс показаний частотомера, который объясняется тем, что амплитуда подаваемого сигнала близка или ниже допустимого предела (0,5 В) для прибора. При амплитудах выше 2,5 В показания прибора становятся стабильными.

В диапазоне амплитуд 1,8...3,5 В длительность положительного импульса почти не изменяется, в то время как длительность отрицательного импульса линейно возрастает. Точка пересечения двух кривых на графике определяет амплитуду 2,82 В, при которой длительности положительного и отрицательного импульсов одинаковы. Поэтому испытания образцов проводились при поддержании постоянства амплитуды сигнала индукционного преобразователя. Последняя измерялась с помощью милливольтметра ВЗ-48А и поддерживалась на уровне $2,82 \pm 0,10$ В за счет изменений нагрузки на вибраторе вибростенда и расстояния между образцом и датчиком. Резонансная частота вначале испытаний составляла ~1400 Гц.

После испытаний в течение 200 мин появлялась усталостная трещина, которая продолжала развиваться вплоть до окончания испытаний при $t = 400$ мин, что соответствует числу циклов нагружения $N = 6,6 \cdot 10^7$, превышающему базовое число $N = 2 \cdot 10^7$ для незакаленных сталей.

Изменение коэффициента асимметрии цикла и собственной частоты колебаний по этапам разрушения

Этап	Наименование	\bar{t} , %	$\Delta \bar{R}$, %	$\Delta \bar{f}$, %
I	Приработка	15,2	0,93	0,19
II	Инкубационный	32,2	0,46	0,30
III	Зарождение макротрещин	10,8	2,30	0,48
IV	Медленное развитие макротрещин	25,6	-2,07	4,86
V	Интенсивное разрушение	15,7	7,59	12,62

Примечание: \bar{t} – средняя длительность этапа, отнесенная ко всему времени испытания образца; $\Delta \bar{R}$ – средний относительный прирост величины коэффициента асимметрии цикла за этап; $\Delta \bar{f}$ – средняя величина относительного снижения величины собственной частоты за этап.

Усредненные результаты экспериментов для пяти характерных этапов разрушения образцов, выявленных в процессе испытаний, представлены в таблице.

Зависимость средних относительных значений коэффициента асимметрии цикла \tilde{R} от собственной частоты колебаний образцов \tilde{f} , отнесенных к их значениям в начальный момент испытаний, иллюстрирует рис. 3.

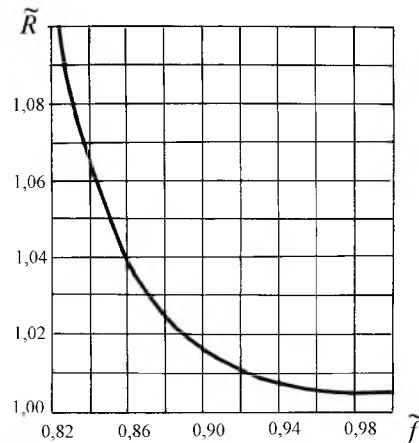


Рис. 3. Зависимость средних относительных значений коэффициента асимметрии цикла \tilde{R} от собственной частоты колебаний образцов \tilde{f} .

Таким образом, коэффициент асимметрии цикла, определяемый как отношение длительностей отрицательных и положительных импульсов, объективно отражает процессы, происходящие в разрушающемся образце при изгибном вибрационном нагружении. При проведении соответствующих исследований этот коэффициент может использоваться в качестве диагностического критерия трещинообразования в образцах и ответственных деталях машин.

Резюме

Представлено результати вібраційних досліджень зразків за наявності поперечних вирізів із гострою вершиною. Спостерігалась асиметрія циклу згинальних коливань, зумовлена спочатку наявністю концентратора, а далі поперечною тріщиною, що розвивається. Зафіксовано тривалість позитивного і негативного імпульсів. Наведено характерні результати експериментів, що ілюструють одночасну зміну в часі власної частоти коливань зразків і коефіцієнта асиметрії циклу, що дорівнює відношенню тривалості позитивного та негативного імпульсів. Встановлено, що коефіцієнт асиметрії циклу об'єктивно відображає характер і ступінь руйнування зразка при вібраційних випробуваннях.

1. *Harrer A.* Schwingungsdiagnostik an Industrie-Dampfturbosätzen – ein ernüchternden Ist. – Zustandsbericht aus einem Marktsegment // Allianz Rept. Risiko und Sicherheit. – 1993. – 66, N 5. – P. 181 – 191.

2. *Robin P. Y., Jansen B. H., Man Xin Ting C. et al.* Vibration monitoring of steel beams by evaluation of resonance frequency decay rates // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 1994. – **96**, N 2. – Pt 1. – P. 867 – 873.
3. *Kim Hyoung, Bartkowicz T. J., Smith S. W., Zimmerman D. C.* Health monitoring of large structures // *Sound and Vibr.* – 1995. – **29**, N 4. – P. 18 – 21.
4. *Akgun M. A., Ju F. D.* Damage diagnosis in frame structures with a dynamic response method // *Mech. Struct. and Mach.* – 1990. – **18**, N 2. – P. 175 – 196.
5. *Samman M. M., Biswas M., Pandey A. K.* Employing pattern recognition for defecting cracks in a bridge model // *Int. J. Anal. and Exp. Modal Anal.* – 1991. – **6**, N 1. – P. 35 – 44.
6. *Сенькин А. В.* Вопросы вибродиагностики упругого космического аппарата. Проблемы теории и практики в инженерных исследованиях: Тр. 33 науч. конф. Ростов. ун-та Дружбы народов (М., 21–25 апр., 1997). – М., 1997. – С. 223 – 225.
7. *Simon C.* Propagation des ondes de Lamb dans un materian composite stratifie // *Note techn. ONERA.* – 1998. – N 5. – P. 3 – 168.
8. *Ding J. L., Pazhouh J., Lin S. B., Burton T. D.* Damage characterization by vibration test // *Scr. met. et mater.* – 1994. – **30**, N 7. – P. 839 – 844.
9. *Цифанский С. Л., Магоне М. А., Ожиганов В. М.* Об использовании нелинейных эффектов для обнаружения трещин в стержневых элементах конструкций // *Дефектоскопия.* – 1985. – No 3. – С. 77 – 82.
10. *Матвеев В. В.* К обоснованию использования деформационных критериев многоциклового усталостного разрушения металлов. Сообщ. 2. Новый подход // *Пробл. прочности.* – 1995. – No 3. – С. 3 – 12.
11. *Буцорога В. П.* Аппаратура для измерения экспериментального развития усталостной трещины // *Там же.* – 1996. – No 2. – С. 110 – 119.
12. *Абдулла Аль-Хрейши, Королев В. В.* Экспериментальные методы исследования стадий развития трещин: Тез. Междунар. науч.-техн. конф. – Змиев, 1994. – С. 94 – 95.
13. *Ройтман А. Б., Абдулла Аль-Хрейши, Рягин С. Л.* Диагностирование усталостного разрушения путем спектрального анализа асимметричных колебаний // *Proc. of the Second Intern. Sym. "Transport Noise and Vibration"*. – Petersburg, 1994. – Pt. 2 – P. 12 – 15.

Поступила 18. 02. 99