

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ БАЛОЧНЫХ ОБРАЗЦОВ ПО ИЗМЕНЕНИЮ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ И АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ

---

Анатолий Семенович ДЕМИДОВ родился в 1937 г. в городе Москве. Профессор МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области проектирования и прочности двигателей летательных аппаратов. Автор 60 научных работ. E-mail: demidov@mai.ru

Anatoly S. DEMIDOV, D.Sci., was born in 1937, in Moscow. He is a Professor at the MAI. His major research interests are in the fields of rocket engine design and strength. He has published 60 technical papers. E-mail: demidov@mai.ru

---

Владимир Владимирович КАШЕЛКИН родился в 1937 г. в городе Москве. Начальник отдела ФГУП «Красная Звезда». Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области прочности ядерных энергоустановок. Автор 63 научных работ. E-mail: re.entry@g23.relcom.ru

Vladimir V. KASHELKIN, D.Sci., was born in 1937, in Moscow. He is the Head of a Department at the Federal State Unitary Establishment «Krasnaya Zvezda». His major research interests are in nuclear power plant strength. He has published 63 technical papers. E-mail: re.entry@g23.relcom.ru

---

*С учетом концепции определения поврежденности конструкционных материалов, предложенной Ю.Н. Работновым для описания процесса разрушения в условиях ползучести, предлагается конкретный способ ее определения на основе оценки изменения собственной частоты подвергающихся виброиспытаниям балочных образцов. Материалом для балок являлась нержавеющая сталь. Для контроля напряжений в балках могут быть использованы амплитуда колебаний совместно с коэффициентом перегрузки. Приведены численные примеры.*

*A technique is presented to estimate damage level and stresses for structural materials. The technique is based on the conception suggested by Yu.N. Rabotnov to describe a fracture with creep process for cantilever stainless steel samples basing on changes in natural frequency and amplitude of oscillations. The oscillation amplitudes together with overload factor values can be used to evaluate beam stresses. The technique usage is demonstrated by means of some numeral examples.*

**Ключевые слова:** поврежденность, напряжение, колебания, собственная частота, амплитуда, консольные образцы.

**Key words:** damage, stress, oscillations, natural frequency, amplitude, cantilever samples.

Предполагается, что о накопленной поврежденности элемента конструкции можно получить информацию по изменению его модальных характеристик (собственной частоты, логарифмического декремента колебаний, формы колебаний) и, как следствие, оценить остаточный ресурс. Изменение модальных характеристик определялось экспери-

ментально в процессе вибрационных испытаний до разрушения образцов балочного типа из стали марки 12Х18Н10Т [1, 2, 3]. Размер образцов: длина — 240 мм, ширина  $b = 20$  мм, толщина  $h = 2$  мм. При испытаниях образец консольно закреплялся в приспособлении на вибростенде ВЭДС 200, длина консоли  $l = 160$  мм.

Частота возбуждения была на 0,7—1,0 Гц выше первой собственной частоты колебаний и равнялась 59—62,8 Гц, виброускорение задавалось в пределах 10—12g, где  $g$  — ускорение свободного падения,  $g = 981 \text{ см/с}^2$ . В процессе испытаний режимы виброн нагружения оставались постоянными. Все образцы были доведены до разрушения, при этом определялись первая собственная частота колебаний, логарифмический декремент колебаний и размах колебаний консоли. В настоящее время общее количество испытанных образцов составляет 45 штук. Подробно методика испытаний изложена в статье [1].

По результатам испытаний было установлено, что первая собственная частота колебаний образца в зависимости от числа циклов виброн нагружения к моменту разрушения стабильно уменьшается в среднем на 10—15%. Изменение логарифмического декремента колебаний носило более сложный характер, хотя в большинстве случаев к концу испытаний он увеличивается. Наиболее чувствительной характеристикой оказалось изменение размаха консоли образца. Величина размаха к моменту разрушения уменьшалась в среднем в четыре раза по сравнению с величиной начального размаха.

Рассмотрим некоторые результаты испытаний пяти образцов № 41—45. Первые собственные частоты колебаний этих образцов равнялись: 60,8, 61,5, 60,3, 62, 60,9 Гц, среднее значение равно 61,1 Гц. Частота возбуждения равнялась 61,1—62,8 Гц, виброускорение задавалось равным 11g. По результатам испытаний этих пяти образцов получено, что образцы выдержали в среднем  $N = 855204$  цикла нагружения до разрушения. Среднее значение первой собственной частоты колебаний образцов перед разрушением было равно 54,54 Гц. Размах конца консоли в начале испытаний у всех пяти образцов равнялся 23 мм, перед разрушением среднее значение размаха равнялось 5,4 мм.

Снижение частоты собственных колебаний к моменту разрушения образца можно объяснить накоплением поврежденности  $\omega$ . Так как ни масса, ни модуль упругости, ни размеры образца не меняются, примем изменение момента инерции сечения образца в виде  $J = J_0(1 - \alpha)^2$ , где  $J_0$  — начальный момент инерции сечения образца;  $\alpha = \omega^\gamma$ . Полученные при испытаниях изменения собственной частоты можно описать функциональной зависимостью

$$f = F(N), \quad (1)$$

где  $f$  — частота, Гц;  $N$  — число циклов:

$$N = \frac{1}{2\pi} \theta t, \quad (2)$$

где  $\theta$  — круговая частота виброн нагружения, рад/с;  $t$  — время, с.

Тогда по [4] имеем

$$\frac{1}{2\pi}(1 - \alpha) \frac{\lambda_1^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_o}{m}} = F(N) \quad (3)$$

или

$$(1 - \alpha) P_1^0 = F(N), \quad (4)$$

где  $P_1^0 = 61,1 \text{ Гц}$  — первая собственная частота в начальный момент при  $t = 0$ ;

$E = 2 \cdot 10^6 \text{ кгс/см}^2$  — модуль упругости;

$\lambda_1 = 1,875$  — характеристическое число первой собственной частоты;

$m = 3,1 \cdot 10^{-6} \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{см}^2$  — погонная масса образца;

$l = 16 \text{ см}$  — длина консоли образца.

Изменение амплитуды колебаний конца консоли при испытаниях можно аппроксимировать функцией

$$A = \Phi(N), \quad (5)$$

где  $A$  — амплитуда колебаний конца консоли, равная максимальному прогибу балки с жестко заделанным концом под действием равномерно распределенной нагрузки.

С другой стороны, максимальный прогиб консольной балки равен

$$A = \frac{ql^4}{8EJ}, \quad (6)$$

где  $q$  — интенсивность равномерно распределенной нагрузки, которую можно принять равной  $q = k \cdot \bar{m}$ , где  $k$  — коэффициент перегрузки;  $\bar{m}$  — погонная сила от веса балки.

В результате получаем соотношения, позволяющие определить  $k$ :

$$k = \frac{8}{\bar{m}l^4} \cdot EJ_o(1 - \alpha)^2 \cdot \Phi(N) \quad (7)$$

или

$$k = \frac{8}{g\lambda_1^4} [F(N)]^2 \cdot \Phi(N). \quad (8)$$

В итоге по данным испытаний определяем функции  $f = F(N)$  и  $A = \Phi(N)$ , затем поврежден-

ность  $\omega = \alpha^{\frac{1}{\gamma}}$  и действующую в каждый момент нагрузку на образец  $q = k \cdot \bar{m}$ , которая позволяет определить возникающие максимальные напряжения в образце.

В качестве примера рассмотрим простейший вид аппроксимации — линейный.

Начальный момент инерции сечения образца, определенный для частоты 61,1 Гц, равен  $J_0 = 0,00121 \text{ см}^4$ . При таком моменте инерции толщина образца  $h = 0,1937 \text{ см}$ , что находится в поле допуска образца.

По данным испытаний образцов № 41—45 прием, в первом приближении, следующий вид функции  $F(N)$ :

$$F(N) = -7,67 \cdot 10^{-6} N + 61,1. \quad (9)$$

Это уравнение прямой, проходящей через точки (0; 61,1) и (855204; 54,54). В скобках указаны значения числа циклов и собственных частот до начала испытаний и перед разрушением.

По формулам (4), (9) определим

$$\alpha = 0,1255 \cdot 10^{-6} \cdot N.$$

Приняв  $\gamma = 16$ , получим при среднем значении числа циклов до разрушения  $N = 855204$  параметр поврежденности

$$\omega = 0,878.$$

Для линейной функции зависимости величины прогиба консоли от числа циклов нагружения прием

$$\Phi(N) = -1,03 \cdot 10^{-6} N + 1,15. \quad (10)$$

В уравнение (10) амплитуда была подставлена в сантиметрах. Коэффициент перегрузки по формуле (7)

$$k = 97,14(1 - 0,1255 \cdot 10^{-6} N)^2 \cdot (1,15 - 1,03 \cdot 10^{-6} N).$$

По результатам испытаний пяти образцов получено, что образец выдерживает в среднем  $N = 855204$  цикла до разрушения, при этом величина перегрузки менялась в пределах 111,7—20,8.

## Выводы

Результаты проведенной работы позволяют оценивать остаточный ресурс балочных образцов. Накопленный опыт показывает, что в первом приближении за критерий оценки ресурса можно принять предельное значение  $\omega \sim 0,8 \div 0,85$ . Изменение нагрузки, действующей в процессе испытаний, определяется коэффициентом перегрузки  $k$ .

Возможность определять действующие напряжения в течение всего процесса вибронгружения позволяет при необходимости воспользоваться критерием линейного суммирования поврежденности.

Согласно концепции определения поврежденности конструкционных материалов, предложенной Ю.Н. Работновым [5] для описания процесса разрушения в условиях ползучести, введен параметр поврежденности  $\omega$ . В настоящей статье этот подход расширен и использован для оценки изменения собственной частоты и размаха колебаний балочных образцов, подвергающихся вибрационным испытаниям. Работа должна быть продолжена в отношении уточнения реальных величин  $\omega$  к моменту разрушения образцов. Это позволит более правильно назначать запасы прочности и долговечности для ответственных деталей машин.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 06-08-00483)*

## Библиографический список

1. Волков Ю.А., Демидов А.С., Кашелкин В.В. Определение остаточного ресурса конструкционных материалов на образцах и изделиях // ИВУЗ. Авиационная техника. 1999. №4. С. 9-12.
2. Демидов А.С., Кашелкин В.В. Рассеяние энергии в колеблющейся системе, состоящей из тонкостенного элемента и груза // Вестник МАИ. 2007. Т.14. №1. С.39-42.
3. Демидов А.С., Кашелкин В.В. Тезисы доклада «Определение модальных характеристик отдельных элементов и рамочных конструкций при виброиспытаниях до разрушения» // Тезисы докладов 7-й Международной конференции «Авиация и космонавтика — 2008». — М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008. С.28-29.
4. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. — М.: Физматгиз, 1959.
5. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. — М.: Наука, 1966.

Московский авиационный институт  
ФГУП «Красная Звезда»

Статья поступила в редакцию 29.01.2009