

Об эффективности использования характеристик демпфирования колебаний элементов конструкций для диагностики повреждения

А. П. Бовсуновский

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

На основе полученной автором ранее обобщенной зависимости рассеяния энергии в трещине усталости от размаха коэффициента интенсивности напряжений выполнено аналитическое исследование влияния различных факторов на логарифмический декремент колебаний консольного стержня с краевой и поверхностной полуэллиптической трещиной. В частности, показано, что вызванное возникновением и ростом трещины увеличение характеристики демпфирования колебаний стержня может служить эффективным неразрушающим методом диагностики поврежденных элементов конструкций в случае относительно невысокого уровня их диссипативных свойств в неповрежденном состоянии.

Ключевые слова: колебания, декремент, коэффициент интенсивности напряжений, рассеяние энергии, трещина.

Введение. Многие вибрационные характеристики упругого тела можно исследовать аналитически или численно, используя те или иные модели. Среди таких характеристик следует отметить изменение собственных частот колебаний [1, 2], возникновение суб- и супергармонических резонансных колебаний [2, 3] и др. В то же время аналитическое исследование диссипативных свойств тел с трещиной затруднено из-за сложности моделирования рассеяния энергии в теле вообще и в трещине в частности. Поэтому взаимосвязь демпфирующей способности образцов или элементов конструкций с параметрами трещины применительно к диагностике повреждения изучалась лишь экспериментально [4–7], что ограничивает количество и диапазон варьирования факторов, от которых зависит степень изменения характеристики демпфирования колебаний при возникновении повреждения. К числу таких факторов относятся исходный, т.е. в неповрежденном состоянии, уровень демпфирования колебаний исследуемого объекта и характер амплитудной зависимости логарифмического декремента колебаний (ЛДК), параметры (размеры и местоположение) и тип (открытая или закрывающаяся) трещины, форма колебаний, вид деформирования трещины (нормального отрыва, продольного или поперечного сдвига). Очевидно, что экспериментально выполнить оценку эффективности демпфирования как вибрационной характеристики повреждения при таком количестве факторов, влияющих на демпфирование, весьма сложно.

Ранее [8] на основе экспериментальных исследований демпфирования изгибных колебаний призматических образцов с трещиной усталости была получена обобщенная зависимость рассеяния энергии $\Delta \bar{U}_T$, приходящейся на единицу длины фронта закрывающейся краевой трещины нормального отрыва, от величины размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK_I (КИН):

$$\Delta \bar{U}_T = 8,634675 \cdot 10^{-5} \Delta K_I + 3,87315 \cdot 10^{-4} \Delta K_I^2 - 1,29826 \cdot 10^{-5} \Delta K_I^3, \quad (1)$$

где используется размерность $\Delta \bar{U}_T$ в Дж/м, ΔK_I – в МПа.

Зависимость (1) дает возможность аналитически исследовать влияние перечисленных выше факторов (исключение составляет вид деформирования трещины, поскольку зависимость (1) в этом смысле ограничена) на характеристики демпфирования колебаний стержневых элементов с закрывающейся трещиной. В настоящей работе поставлена задача реализовать эту возможность и на основе многофакторных расчетов определить условия, при которых изменение демпфирования является достаточно эффективным инструментом диагностики повреждения.

Аналитическая оценка изменения логарифмического декремента колебаний стержня с трещиной. При оценке влияния трещины на диссипативные свойства тела необходимо использовать интегральные методы определения характеристик демпфирования колебаний. Одна из таких характеристик – ЛДК, определяемый по темпу затухания свободных колебаний. Взаимосвязь ЛДК с рассеянной за цикл колебаний стержневого элемента без трещины (δ) и с трещиной (δ_T) энергией можно выразить следующим образом:

$$\delta(\sigma_{\max}) \cong \frac{\Delta U(\sigma_{\max})}{2U(\sigma_{\max})}, \quad (2)$$

$$\delta_T(\sigma_{\max}) \cong \frac{\Delta U(\sigma_{\max}) + \Delta U_T(\Delta K_I)}{2U(\sigma_{\max})} = \delta(\sigma_{\max}) + \frac{\Delta U_T(\Delta K_I)}{2U(\sigma_{\max})}, \quad (3)$$

где ΔU и ΔU_T – энергия, рассеянная в образце без трещины и непосредственно в трещине за цикл колебаний соответственно; U – потенциальная энергия деформации колебательной системы; σ_{\max} – амплитуда максимальных напряжений.

Погрешность представления ЛДК в виде (2) и (3) не превышает 10% при условии, что $\delta < 0,4$, и отношение амплитуд свободных затухающих колебаний при определении ЛДК меньше 1,5 [9] (заметим, что в последующих исследованиях уровень ЛДК не превышал $\delta \leq 0,1$). Как и ранее [8], полагаем, что энергия ΔU при возникновении трещины не изменяется (погрешность этого предположения невелика при рассматриваемых относительных размерах трещины $a/h \leq 0,3$, где a – глубина трещины; h – высота сечения). Относительное изменение ЛДК стержня равно

$$\frac{\delta_T(\sigma_{\max})}{\delta(\sigma_{\max})} = 1 + \frac{\Delta U_T(\Delta K_I)}{2\delta(\sigma_{\max})U(\sigma_{\max})}. \quad (4)$$

В случае краевой трещины, когда можно пренебречь изменением КИН по ее фронту, энергия, рассеянная в трещине, определяется выражением

$$\Delta U_T = b \Delta \bar{U}_T (\Delta K_I), \quad (5)$$

где b – ширина стержня (рис 1,а); $\Delta \bar{U}_T$ определяется выражением (1).

Размах КИН ΔK_I для закрывающейся краевой трещины при изгибе, т.е. трещины, которая полагается полцикла открытой и полцикла закрытой, определяется величиной КИН при амплитудном значении номинальных напряжений в сечении с трещиной по формуле [10]

$$\Delta K_I = K_I(\sigma_{\max}^T) = \sigma_{\max}^T \sqrt{\pi a} (1,122 - 1,40\gamma + 7,33\gamma^2 - 13,08\gamma^3 + 14,0\gamma^4), \quad (6)$$

где σ_{\max}^T – номинальные напряжения в сечении с трещиной; $\gamma = a/h$ – относительная глубина трещины.

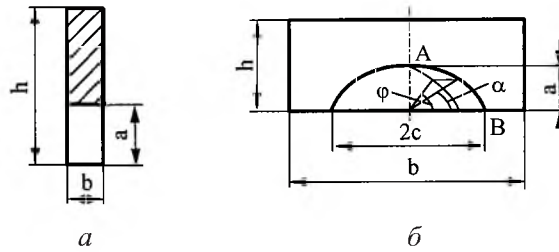


Рис. 1. Поперечные сечения стержня с краевой (а) и поверхностной полуэллиптической (б) трещиной.

В случае полуэллиптической поверхностной трещины при определении ΔU_T необходимо учитывать изменение КИН по фронту трещины:

$$\Delta U_T = 2c \int_0^{\pi/2} \Delta \bar{U}_T(K_I) \sqrt{1 - \left(1 - \frac{a^2}{c^2}\right) \sin^2 \alpha} d\alpha, \quad (7)$$

где c – половина длины трещины (рис. 1,б).

Значения КИН в (7) определяются выражением [11]

$$K_I = H\left(\frac{a}{h}, \frac{a}{c}, \varphi\right) \sigma_{\max}^T \sqrt{\frac{\pi a}{Q(a/c)}} F\left(\frac{a}{h}, \frac{a}{c}, \frac{c}{b}, \varphi\right). \quad (8)$$

Смысл углов α и φ понятен из рис. 1,б. Функции H , Q и F не приведены из-за их громоздкости. Погрешность аппроксимации (8) не превышает 5% при $0 < a/c \leq 1$, $0 \leq a/h < 1$, $c/b < 0,25$ и $0 \leq \varphi \leq \pi$. При вычислении ΔU_T согласно выражению (7) K_I удобно представлять как функцию угла α , воспользовавшись переходом $\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{c}{a} \operatorname{tg} \alpha\right)$.

Для упрощения выкладок оценим ЛДК консольного стержня Бернулли–Эйлера с грузом на конце. Собственные формы изгибных колебаний такого стержня определяются уравнением [12]

$$w_i(x) = U(k_i x) - \frac{V(k_i L) + gU(k_i L)}{S(k_i L) + gV(k_i L)} V(k_i x). \quad (9)$$

Значения $k_i L$ находим в результате решения частотного уравнения

$$[S(k_i L) - qT(k_i L)][S(k_i L) + gV(k_i L)] - [T(k_i L) - qU(k_i L)][V(k_i L) + gU(k_i L)] = 0. \quad (10)$$

В выражениях (9) и (10): S, T, U и V – функции Крылова; i – номер формы колебаний; $g = m_L k_i / \rho F$; $q = I_m k_i^3 / \rho F$, где L – длина стержня; ρ – плотность материала; F – площадь поперечного сечения; m_L – масса груза на конце стержня; I_m – момент инерции груза на конце стержня.

Собственные угловые частоты колебаний стержня вычисляли по формуле

$$\omega_i = \frac{(k_i L)^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho F}}, \quad (11)$$

где I – момент инерции сечения; E – модуль упругости.

С использованием выражения (9) можно получить распределение изгибающего момента по длине стержня:

$$M_i(x, \sigma_{\max}) = W \sigma_{\max} \left[S(k_i x) - \frac{V(k_i L) + gU(k_i L)}{S(k_i L) + gV(k_i L)} T(k_i x) \right], \quad (12)$$

которое позволяет определить номинальное максимальное напряжение в сечении с трещиной ($x = L_T$)

$$\sigma_{\max}^T(L_T, \sigma_{\max}) = \frac{M_i(L_T, \sigma_{\max})}{W} \quad (13)$$

и потенциальную энергию деформации стержня

$$U_i(\sigma_{\max}) = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{M_i^2(x, \sigma_{\max})}{EI} dx. \quad (14)$$

Для стержня без груза на конце в выражениях (9), (10) и (12) принимаем $g = q = 0$.

Теперь, если задаться амплитудной зависимостью ЛДК стержня, например, в виде

$$\delta(\sigma_{\max}) = a_0 + a_1 \sigma_{\max} + a_2 \sigma_{\max}^2, \quad (15)$$

то можно определить ЛДК стержня с трещиной по формуле (3) или его изменение по формуле (4) при разных видах и параметрах трещины, формах колебаний и исходных уровнях демпфирования колебаний, используя для этого выражения (5)–(15).

Экспериментальная оценка аналитического подхода. Ранее [8] отмечалось, что зависимость (1) получена для значений $\Delta K_I \leq 1,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, относительной глубины трещины $a/h \leq 0,3$ и амплитуд номинальных максимальных напряжений $\sigma_{\text{max}}^H \leq 20 \text{ МПа}$. Это определило диапазоны варьирования указанных величин при дальнейших расчетах.

На рис. 2 приведены экспериментальные и расчетные амплитудные зависимости ЛДК образцов из титанового сплава ВТ-18У и стали 15Х2НМФА при консольном изгибе по первой форме. Как видно, расчет удовлетворительно отражает не только увеличение ЛДК образцов при росте глубины трещины, но и в определенной мере изменение характера амплитудной зависимости ЛДК (имеется в виду увеличение ЛДК при уменьшении амплитуды напряжений), что является основанием для использования расчетной методики при проведении полнофакторного исследования закономерностей изменения характеристики демпфирования колебаний тела с трещиной усталости. Геометрические и механические характеристики образцов приведены в табл. 1, где L_T – расстояние от заделки до трещины; f – собственная частота колебаний образца по первой форме. Методика испытаний подробно описана в [8].

Т а б л и ц а 1

Размеры рабочей части образцов и модельных стержней и механические свойства материалов

Материал	L , мм	L_T , мм	h , мм	b , мм	m_L , кг	E , ГПа	ρ , кг/м ³	f , Гц
Сталь 15Х2НМФА	220	8	13,8	4	0,154	200	7800	81,3
Сплав ВТ-18У	230	31	20,0	4	0,154	129	4480	125,9
Сталь 45 стержень I	230	0	20,0	4	0	200	7800	309,3
стержень II	230	0	4,0	20	0	200	7800	61,9

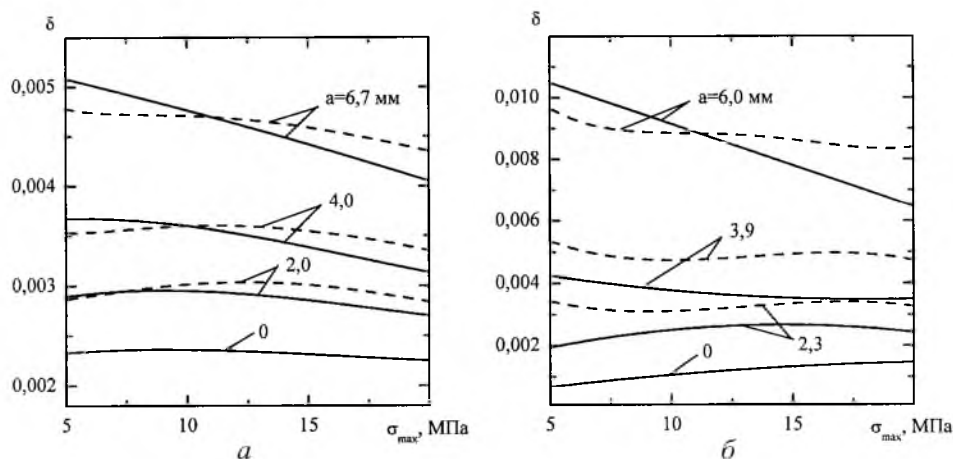


Рис. 2. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые линии) амплитудные зависимости ЛДК образцов из титанового сплава ВТ-18У (а) и стали 15Х2НМФА (б) при различной глубине трещины.

Результаты расчета для стержней с краевой трещиной. Для выяснения природы изменения характера амплитудных зависимостей ЛДК образцов были исследованы зависимости рассеянной в трещине энергии при разных размерах трещины и потенциальной энергии деформации стержня от амплитуды колебаний. Зависимость потенциальной энергии деформации консольного стержня Бернулли–Эйлера с геометрическими и механическими характеристиками, соответствующими образцу из сплава ВТ-18У, но без груза на конце при изгибных колебаниях по любой форме, от амплитуды максимальных напряжений аппроксимируется следующей функцией:

$$U = 2,2028 \cdot 10^{-8} \sigma_{\max} + 7,63549 \cdot 10^{-6} \sigma_{\max}^2. \quad (16)$$

Здесь и далее используется размерность энергии в Дж, а напряжения – в МПа. Зависимости рассеянной в трещине энергии от амплитуды максимальных напряжений (трещина расположена на расстоянии $L_T = 31$ мм от заделки) имеют вид

$$\Delta U_T = 2,91807 \cdot 10^{-8} \sigma_{\max} + 7,25233 \cdot 10^{-9} \sigma_{\max}^2 \quad \text{при } a/h = 0,1; \quad (17)$$

$$\Delta U_T = 7,30583 \cdot 10^{-8} \sigma_{\max} + 2,35198 \cdot 10^{-8} \sigma_{\max}^2 \quad \text{при } a/h = 0,3. \quad (18)$$

Поскольку ЛДК является относительной характеристикой демпфирующей способности тела, характер его амплитудной зависимости определяется относительной скоростью изменения функций (17) или (18) и (16). Из рис. 3,а, на котором показаны амплитудные зависимости функций $\partial U / \partial \sigma_{\max}$ и $\partial(\Delta U_T) / \partial \sigma_{\max}$, следует, что уменьшение рассеяния энергии в трещине со снижением амплитуды напряжений происходит гораздо менее интенсивно, чем потенциальной энергии деформации. Это обстоятельство служит причиной роста функции $\Delta U_T / 2U$ при уменьшении амплитуды напряжений (рис. 3,б) и объясняет аналогичный характер амплитудных зависимостей ЛДК образцов (рис. 2).

Влияние различных факторов на ЛДК стержня с краевой и поверхностной трещиной отличается лишь количественно, поэтому основной объем исследований выполнен только для модельного стержня с краевой трещиной, который далее условно будем называть стержень I (его характеристики приведены в табл. 1).

Предварительно было оценено влияние гибкости стержня, модуля упругости, плотности материала и массы груза на конце на чувствительность характеристики демпфирования колебаний к наличию трещины. Как показали расчеты, увеличение коэффициента гибкости L/h стержня с трещиной или уменьшение модуля упругости его материала приводит при прочих равных условиях к снижению степени изменения ЛДК стержня с ростом трещины. Из анализа выражений (3) и (14) следует, что это связано с увеличением потенциальной энергии деформации стержня. Например, чем ниже модуль упругости материала стержня, тем выше энергия его деформа-

ции и тем меньше обусловленное трещиной относительное изменение ЛДК (рис. 4,а). Влияние массы груза на конце стержня на изменение ЛДК незначительное и проявляется постольку, поскольку изменяется распределение изгибающего момента по его длине и соответственно энергия деформации, оказывая влияние на ЛДК стержня с трещиной. Из рис. 4,б видно, что если сосредоточенная масса превышает десять масс стержня ($m_{с\tau}$), то дальнейшее ее увеличение практически не влияет на изменение ЛДК. Амплитудные зависимости ЛДК стержня с трещиной у основания без сосредоточенной массы на конце при колебаниях по разным формам совпадают при прочих равных условиях. Это обусловлено тем, что при фиксированной амплитуде максимальных напряжений в сечении $L_T = 0$ потенциальная энергия деформации такого стержня при колебаниях по разным формам будет иметь одно и то же значение [13]. Наличие груза на конце стержня приводит к снижению зависимости ЛДК стержня от размеров трещины при колебаниях по более высоким формам. Изменение плотности материала стержня ρ в пределах $4000 \dots 8000 \text{ кг/м}^3$ не влияет на амплитудные зависимости ЛДК стержня с трещиной.

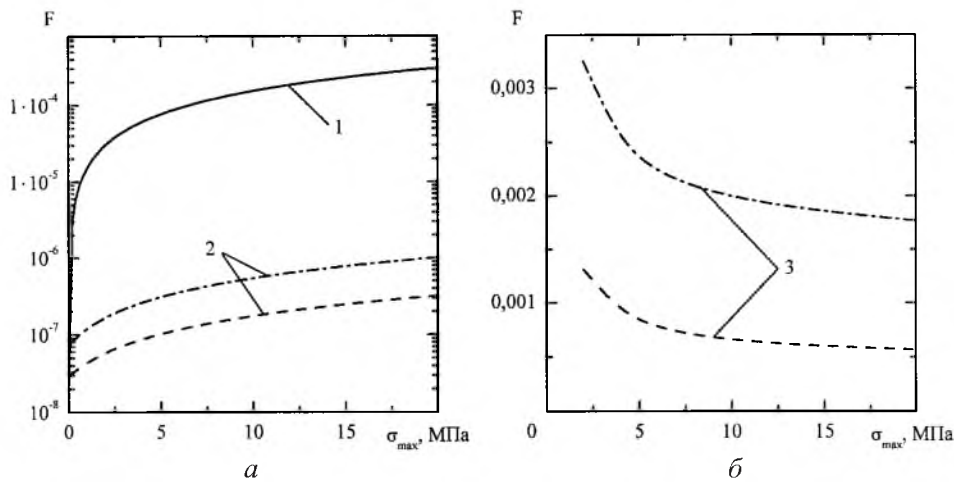


Рис. 3. Амплитудные зависимости функций $F = \partial U / \partial \sigma_{\max}$ (1), $F = \partial(\Delta U_T) / \partial \sigma_{\max}$ (2) – а и $F = \Delta U_T / 2U$ (3) – б для образца из титанового сплава ВТ-18У. (Штриховые линии – $a/h = 0,1$; штрихпунктирные – $a/h = 0,3$.)

Степень изменения характера амплитудной зависимости ЛДК стержня при возникновении трещины определяется, как это очевидно из выражения (3), исходной амплитудной зависимостью $\delta(\sigma_{\max})$ и зависимостью относительного рассеяния энергии в трещине от амплитуды напряжений. В то же время степень относительного изменения ЛДК стержня при росте трещины, определяемая выражением (4), зависит от уровня ЛДК неповрежденного стержня при данной амплитуде максимальных напряжений и не зависит от характера исходной амплитудной зависимости $\delta(\sigma_{\max})$. Поэтому дальнейшие исследования влияния других факторов на ЛДК стержня с трещиной выполнены при постоянных не зависящих от амплитуды напряжений значениях $\delta(\sigma_{\max}) = \delta$.

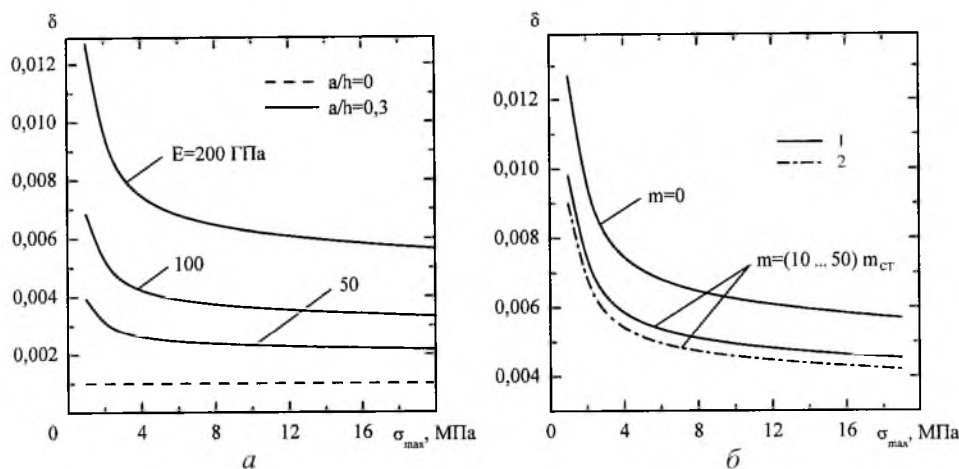


Рис. 4. Амплитудные зависимости ЛДК стержня I ($\delta = 0,001$) при разных модулях упругости (а) и массах груза на конце (б): 1, 2 – соответственно первая и вторая формы колебаний.

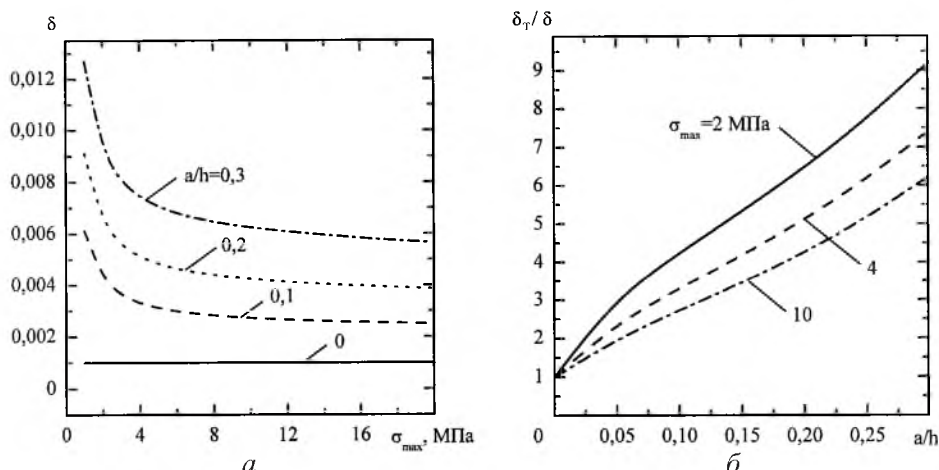


Рис. 5. Амплитудные зависимости ЛДК (а) и относительного изменения ЛДК (б) стержня I при различных относительной глубине трещины и амплитуде максимальных напряжений.

На рис. 5,а приведены амплитудные зависимости ЛДК стержня I при $\delta = 0,001$ и различной относительной глубине трещины. При таком низком исходном уровне демпфирования колебаний стержня влияние трещины на ЛДК и на характер амплитудной зависимости ЛДК весьма заметное. Из рис. 5,б следует, что, во-первых, ЛДК стержня при возникновении в нем трещины может увеличиться на порядок и, во-вторых, чем ниже амплитуда напряжений, при которой определяется ЛДК стержня, тем чувствительнее данная вибрационная характеристика к повреждению. Это обусловлено тем, что рассеяние энергии в трещине не зависит от демпфирующих свойств материала и полностью определяется размахом КИН [8], т.е. уровнем номинальных напряжений в сечении с трещиной и размерами последней. Таким образом, эффект резкого увеличения ЛДК в области малых напряжений может быть использован для надежной диагностики наличия усталостного

повреждения в элементах конструкций, изготовленных из материалов, обладающих низкой демпфирующей способностью. К таким материалам относятся практически все конструкционные металлы и сплавы. Количественная оценка параметров трещины может основываться на анализе степени увеличения ЛДК элементов конструкций при возникновении трещины.

Как видно из рис. 6,а, исходный уровень ЛДК стержня определяет степень изменения его демпфирующей способности при росте трещины: чем выше при прочих равных условиях исходный уровень ЛДК, тем менее значительные его изменения вызывает трещина. Для сравнения там же штриховой линией показана зависимость относительного изменения собственной частоты колебаний стержня I по первой форме, которое при $a/h = 0,3$ достигает 7,3%. В то же время увеличение ЛДК стержня с такой же трещиной составляет 6,2 раза при $\delta = 0,001$, 52,4% – при $\delta = 0,01$ и 5,2% – при $\delta = 0,1$. Следовательно, по чувствительности к трещине собственная частота находится на одном уровне с изменением ЛДК стержней, обладающих относительно высоким исходным уровнем демпфирования.

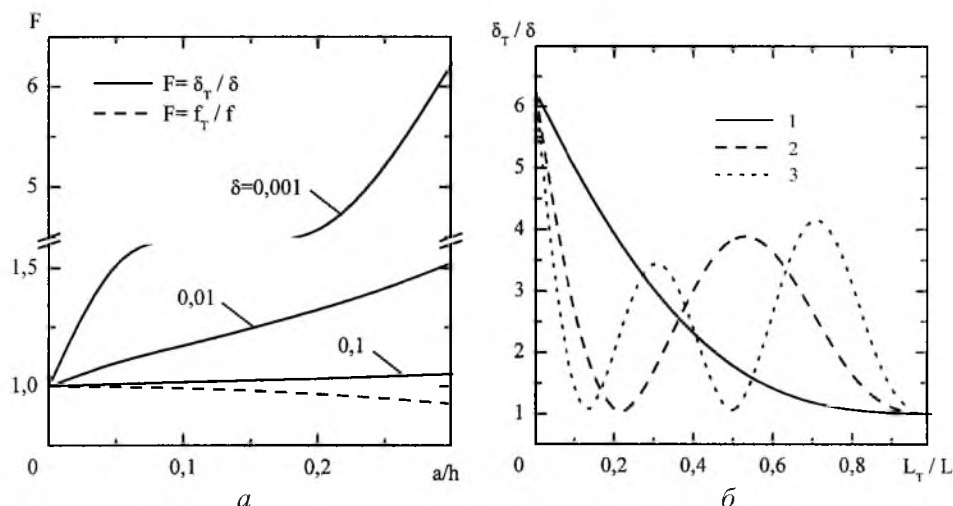


Рис. 6. Зависимости относительного изменения ЛДК и собственной частоты колебаний стержня I по первой форме от относительной глубины трещины при разных исходных уровнях ЛДК (а) и относительного местоположения трещины при колебаниях по первой (1), второй (2) и третьей (3) формам (б) ($a/h = 0,3$, $\sigma_{\max} = 10$ МПа, $\delta = 0,001$).

Логарифмический декремент колебаний стержня существенно зависит также от местоположения трещины (рис. 6,б). Определяющую роль здесь играет уровень номинальных напряжений в сечении с трещиной. Чем он выше, тем значительно возрастает ЛДК стержня с трещиной. Если трещина попадает в узел напряжений (сечение, в котором изгибающий момент равен нулю), то ЛДК практически не изменяется. Поэтому при колебаниях по второй форме соответствующая зависимость (кривая 2) имеет один минимум, а по третьей (кривая 3) – два, по числу узлов напряжений. Качественно аналогичные результаты получены при экспериментальном определении демпфирующей способности образцов с краевой [4] и поверхностной [6] трещиной при колебаниях по первым трем формам, что подтверждает спра-

ведливость представленного в работе подхода. Различная степень изменения ЛДК стержня по разным формам свидетельствует о возможности определения на этом основании местоположения трещины аналогично тому, как это делается по изменению нескольких собственных частот колебаний стержня [14–16].

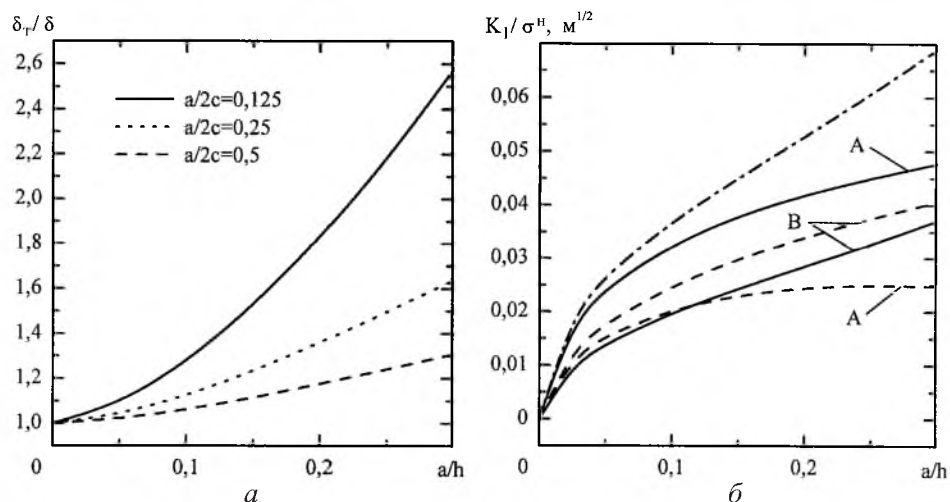


Рис. 7. Зависимости относительного изменения ЛДК (а) и приведенного значения КИН в точках А и В (б) от относительной глубины трещины при различной степени ее эллиптичности ($\delta = 0,001$, $\sigma_{\max} = 10$ МПа). (Штрихпунктирная линия – краевая трещина.)

Результаты расчетов для стержня с поверхностной полуэллиптической трещиной. Для исследования рассеяния энергии в полуэллиптической трещине использовался модельный стержень II (табл. 1), который отличался от стержня I ориентацией поперечного сечения (рис. 1,б). На рис. 7,а показаны расчетные зависимости относительного изменения ЛДК стержня II от относительной глубины трещины при разной степени ее эллиптичности. Как видно, степень увеличения ЛДК стержня с полуэллиптической трещиной растет по мере уменьшения отношения $a/2c$, т.е. когда ее фронт вытягивается, но все же остается ниже, чем в случае краевой трещины (на рис. 6,а кривая при $\delta = 0,001$). Рис. 7,б иллюстрирует причину большего рассеяния энергии в трещине при уменьшении отношения $a/2c$: чем ниже это отношение, тем выше значение КИН. Отметим, что соотношение КИН в точках А и В также изменяется с изменением отношения $a/2c$. При малых значениях отношения $a/2c$ КИН в точке А всегда выше, чем в точке В. По мере уменьшения эллиптичности трещины КИН в точке А становятся ниже, чем КИН в точке В. Значения КИН для краевой трещины выше значений КИН для любой точки полуэллиптической трещины при сопоставимой глубине трещины. Это обстоятельство отчасти объясняет тот факт, что рассеяние энергии в краевой трещине выше, чем в эллиптической, при одинаковой глубине трещины. При этом площадь полуэллиптической трещины была значительно меньше площади краевой. Расчеты рассеяния энергии в указанных трещинах при сопоставимых площадях также пока-

зали, что в полуэллиптических трещинах оно ниже, чем в краевых трещинах в стержнях I и II (табл. 2). Отметим, что рассеяние энергии в краевой трещине стержня II выше, чем в краевой трещине стержня I с такой же площадью, несмотря на то что значения КИН во втором случае выше, чем в первом. Это означает, что ширина стержня играет более существенную роль, чем величина КИН.

Т а б л и ц а 2

Рассеяние энергии в трещинах разного типа ($\sigma_{\max} = 10$ МПа)

$S_{\text{тр}},$ мм ²	Полуэллиптическая трещина в стержне II				Краевая трещина в обоих стержнях		
	$a/2c$	a/h	$K_I/\sigma^{\text{II}},$ М ^{1/2}	$\Delta U_{\text{T}},$ Дж	a/h	$K_I/\sigma^{\text{II}},$ М ^{1/2}	$\Delta U_{\text{T}},$ Дж
1,01	0,125	0,1	0,033* 0,020**	$2,08 \cdot 10^{-7}$	0,012	$\frac{0,031}{0,014}$	$\frac{2,54 \cdot 10^{-7}}{3,87 \cdot 10^{-7}}$
4,02	–	0,2	0,042* 0,029**	$6,34 \cdot 10^{-7}$	0,050	$\frac{0,060}{0,027}$	$\frac{7,55 \cdot 10^{-7}}{1,02 \cdot 10^{-6}}$
9,05	–	0,3	0,048* 0,037**	$1,21 \cdot 10^{-6}$	0,113	$\frac{0,088}{0,039}$	$\frac{1,46 \cdot 10^{-6}}{1,85 \cdot 10^{-6}}$
0,25	0,500	0,4	0,020* 0,025**	$4,65 \cdot 10^{-8}$	0,003	$\frac{0,016}{0,007}$	$\frac{9,24 \cdot 10^{-8}}{1,55 \cdot 10^{-7}}$
1,01	–	0,5	0,025* 0,034**	$1,35 \cdot 10^{-7}$	0,012	$\frac{0,031}{0,014}$	$\frac{2,54 \cdot 10^{-7}}{3,87 \cdot 10^{-7}}$
2,26	–	0,6	0,025* 0,041**	$2,37 \cdot 10^{-7}$	0,028	$\frac{0,046}{0,020}$	$\frac{4,76 \cdot 10^{-7}}{6,65 \cdot 10^{-7}}$

Примечания: 1. Данные с одной и двумя звездочками соответствуют значениям для точек A и B соответственно. 2. Над чертой приведены данные для стержня I, под чертой – для стержня II.

Закключение. Установлено, что оценка изменения ЛДК элементов конструкций при определенных условиях может быть весьма чувствительным методом вибрационной диагностики повреждения типа трещины усталости. Главные из этих условий: относительно низкий исходный уровень демпфирующей способности элемента конструкции и достаточно высокий уровень напряжений в сечении с трещиной. При соблюдении указанных условий диагностика, основанная на оценке изменения характеристики демпфирования колебаний элементов конструкций, является значительно более чувствительной, чем диагностика, использующая в качестве признака повреждения изменение собственных частот или форм колебаний.

Вместе с тем при оценке эффективности той или иной вибрационной характеристики повреждения необходимо учитывать не только чувствительность, но и сложность и стоимость ее практического использования, а также зависимость от других, кроме повреждения, факторов. Применительно к демпфированию к числу таких факторов можно отнести амплитуду колеба-

ний, деформационное старение, температуру и др. Поэтому корректное использование характеристик демпфирования колебаний элементов конструкций для диагностики их повреждения предполагает проведение предварительной оценки зависимости характеристик демпфирования от эксплуатационных факторов, которым подвержены исследуемые элементы конструкций.

Резюме

На основі отриманої автором раніше узагальненої залежності розсіяння енергії у тріщині утоми від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень виконано аналітичне дослідження впливу різних факторів на логарифмічний декремент коливань консольного стержня з крайовою і поверхневою напівеліптичною тріщиною. Зокрема, показано, що зумовлене виникненням і ростом тріщини зростання характеристики демпфірування коливань стержня може служити ефективним неруйнівним методом діагностики пошкоджень елементів конструкцій у випадку відносно невисокого рівня їх дисипативних властивостей у непошкоджену стані.

1. *Dimarogonas A. D.* Vibration of cracked structures: a state of the art review // *Eng. Fract. Mech.* – 1996. – **55**, No. 5. – P. 831 – 857.
2. *Krawczuk M. and Ostachowicz W.* Damage indicators for diagnostic of fatigue cracks in structures by vibration measurements – a survey // *Mechanica Teoretyczna i Stosowana.* – 1996. – **34**, No. 2. – P. 307 – 326.
3. *Цыфанский С. Л., Бересневич В. И., Магоне М. А.* Вибродиагностика усталостных трещин в несущих поверхностях летательных аппаратов на основе использования нелинейных эффектов // *Дефектоскопия.* – 1993. – **2**. – С. 87 – 94.
4. *Сидоров О. Т.* Использование динамических характеристик изделия для оценки его технического состояния // *Пробл. прочности.* – 1983. – № 6. – С. 112 – 114.
5. *Rytter A., Brincker R., and Pilegaard L.* Vibrational based inspection of civil engineering structures // *Bygningsstatistiske Meddelelser.* – 1991. – **62**, No. 4. – P. 79 – 110.
6. *Rytter A., Brincker R., and Kirkegaard P. H.* An experimental study of the modal parameters of a cantilever // *Fracture & Dynamics, University of Aalborg, Denmark.* – 1992. – No. 37. – 76 p.
7. *Бовсуновский А. П., Матвеев В. В.* Сравнительная экспериментальная оценка чувствительности некоторых вибрационных индикаторов усталостного повреждения стержневых элементов // *Вибрации в технике и технологиях.* – 1999. – № 1 (10). – С. 15 – 21.
8. *Бовсуновский А. П.* К вопросу о механизме рассеяния энергии в трещине усталости // *Пробл. прочности.* – 2002. – № 5. – С. 80 – 99.
9. *Матвеев В. В.* Демпфирование колебаний деформируемых тел. – Киев: Наук. думка, 1985. – 264 с.

10. *Stress Intensity Factors Handbook*. In 3 vol. Vol. I / Ed. Y. Murakami. – Japan: Pergamon Press, 1987. – 573 p.
11. *Newman J. C. Jr., and Raju I. S.* An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack // *Eng. Fract. Mech.* – 1981. – **15**, No. 1. – P. 185 – 192.
12. *Матвеев В. В., Бовсуновский А. П.* К определению вибрационных характеристик стержня с закрывающейся трещиной при изгибных колебаниях // *Пробл. прочности.* – 2000. – № 3. – С. 5 – 23.
13. *Яковлев А. П.* О рассеянии энергии в стержнях при различных формах изгибных колебаний // *Тр. науч.-техн. сов. по демпфированию колебаний.* – Киев: Изд-во АН УССР, 1960. – С. 118 – 122.
14. *Матвеев В. В., Бовсуновский А. П.* К анализу эффективности метода спектральной вибродиагностики усталостного повреждения элементов конструкций. Сообщ. 3. Аналитическое и численное определение собственных частот продольных и изгибных колебаний стержней с поперечными трещинами // *Пробл. прочности.* – 1999. – № 4. – С. 19 – 31.
15. *Adams R. D., Cawley P., Pye C. J., and Stone B. J.* A vibration technique for non-destructively assessing the integrity of structures // *J. Mech. Eng. Sci.* – 1978. – **20**, No. 2. – P. 93 – 100.
16. *Narkis Y.* Identification of crack location in vibrating simply supported beams // *J. Sound and Vibration.* – 1994. – **172**, No. 4. – P. 549 – 558.

Поступила 05. 11. 2001