

Моделирование стержней с дефектами, имеющих различные виды закрепления

Е.Е. Косенко, В.В. Косенко, А.В. Черпаков

При разработке эффективных методов и алгоритмов диагностики технического состояния конструкций различного назначения, ключевым является поиск подходов, позволяющих определить дефекты или степень их поврежденности. Решению этой задачи предшествует анализ различных признаков идентификации повреждений в элементах конструкций. Для предварительных расчетов учитываются простые элементы стержневых конструкций с наличием дефектов [1, 2, 3]. Краткий анализ известных подходов к решению подобных задач приведен в работах [4, 5, 6, 7]. В некоторых работах решения задач идентификации дефектов, базирующихся на анализе изменений форм различных мод колебаний, используется гарантийный модальный критерий (the modal assurance criterion - MAC) [8, 9]. Исследования показывают, что данный признак может быть достаточно эффективно использован при диагностировании дефектов в стержневых конструкциях [10]. Данная работа направлена на пополнение опыта в развитии этого направления.

Рассмотрена задача идентификации дефектов в стержнях, имеющих различные варианты закрепления. В основе задачи лежит метод многопараметрической идентификации базирующийся на анализе частот и параметров форм собственных колебаний конструкции. Рассматриваются стержневые конструкции с одним и двумя дефектами. Расчет собственных колебаний стержня моделируются в конечно-элементном комплексе *ANSYS*.

Целью исследования являлась идентификация местоположения дефекта в стержне, сопоставление параметров смоделированного материала стержня, имеющего различные варианты закрепления. Способы закрепления выбраны с учетом особенностей графиков форм колебаний.

При сравнении форм колебаний с различными величинами жесткости упругого элемента [10], наблюдается резкое изменение угла между касательными («излом» формы колебаний в точке расположения дефекта). В качестве показательной характеристики наличия дефекта, в консольном стержне может использоваться угол α в точке, образованный касательными к кривой формы колебаний или ее кривизна.

Параметр угла α между касательными в точках формы колебаний может быть рассчитан с использованием дискретного подхода, который связан с измерением амплитуд колебаний в конечной точке. На рис. 1 представлена схема расположения точек на участке кривой формы колебаний:

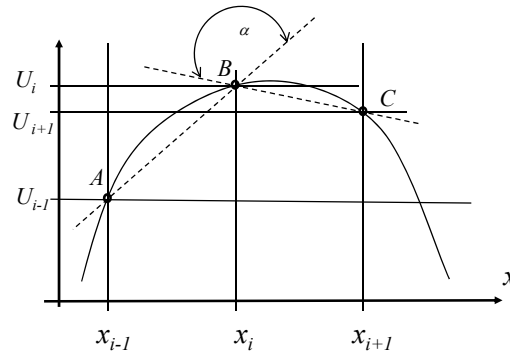


Рис. 1. Схема расположения точек при расчете параметра угла α между касательными

где U_i - смещение собственной формы колебаний в i -й точке стержня;

x_i - координата точки с номером i , $i \in 1..N$, N - общее количество точек.

При наличии дискретной информации о форме колебаний, величина угла в точке i , для соответствующей моды колебаний, может быть вычислена следующим образом (1):

$$\alpha_i = \arccos \left(\frac{(\overline{AB})(\overline{BC})}{\|\overline{AB}\| \|\overline{BC}\|} \right), \quad (1)$$

где \overline{AB} и \overline{BC} - векторное представление двух отрезков, соответственно, между точками нормированной формы колебаний с номерами $[i-1, i]$ и $[i, i+1]$.

Кривизна формы колебаний рассматривается в качестве дополнительного признака, позволяющего уточнить параметры дефекта.

При использовании дискретных измерений с учетом малых колебаний кривизна в i -й точке стержня определяется как конечноразностное соотношение в определенном интервале между точками.

В процессе моделирования в качестве объекта был выбран стержень (длина $L=250$ мм, высота поперечного сечения $h=8$ мм, ширина $a=4$ мм) с дефектом (в виде поперечного надреза шириной 1 мм и абсолютной глубиной h_d), расположенным в точке стержня отстоящей от защемления на расстоянии \bar{L}_d , где $\bar{L}_d = L_d / L$, L_d — местоположение повреждения (рис. 2).

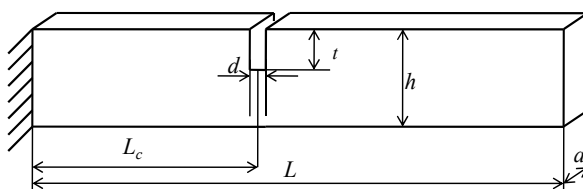


Рис. 2. Схема стержня с дефектом

При исследовании выбирались стержневые конструкции с одним и двумя дефектами. При этом, стержни имели два варианта закреплений – а) закреплялся один конец стержня и б) фиксировались перемещения у двух концов.

Для расчетов введем параметр $\bar{x} = x / L$. Относительная глубина повреждения $\bar{t} = h_d / h$. Рассматриваются поперечные колебания стержня. Виды стержней с дефектами и различными способами закрепления представлены в таблице 1

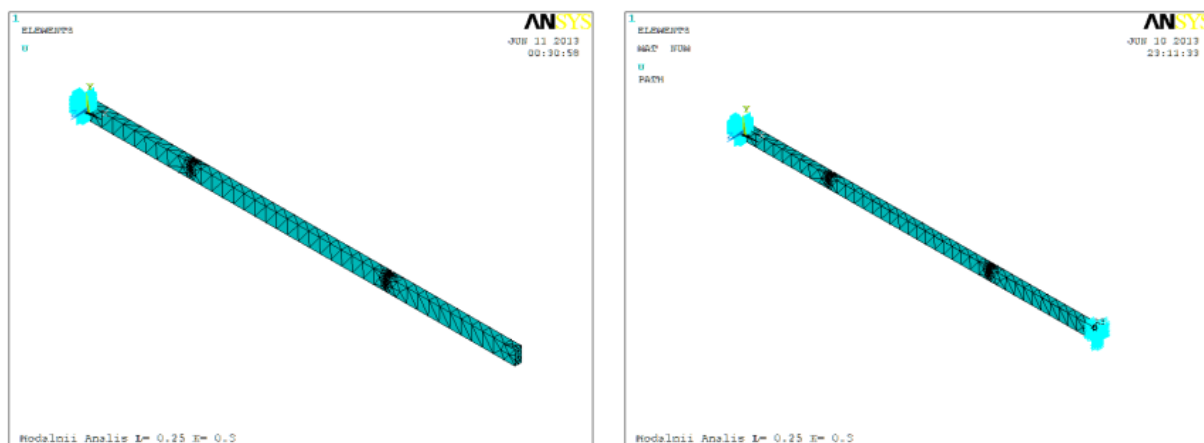
Таблица 1.

Варианты моделирования стержней с различным расположением дефектов

№ варианта	Вариант закрепления	Кол дефектов в стержне	Местоположение первого дефекта L_d	Величина первого дефекта \bar{t}	Местоположение второго дефекта L_d	Величина второго дефекта \bar{t}

1	а)	1	0,25	0,7	-	-
2	а)	2	0,25	0,3	0,7	0,7
3	б)	2	0,25	0,3	0,7	0,7
4	б)	2	0,25	0,7	0,7	0,7

Моделирование колебаний производится в конечно-элементном комплексе *ANSYS*. На рис. 3 представлены исследуемые конечно-элементные модели. Разбиение модели по длине производилось кратно 1/40 от длины стержня. По высоте и ширине стержень разбивался на узлы кратно 1/3 к соответствующей грани. Дефект в виде надреза, отражающего натурную модель, выполнен шириной 1 мм, перпендикулярно сечению. Конечно-элементная сетка имела двукратное сгущение в окрестности дефекта. При этом общее количество конечных элементов превышало 5000.



а)

б)

Рис. 3. Конечно-элементные модели стержня с одним или двумя дефектами: а) консольно-закрепленный стержень; б) стержень, жестко закрепленный на концах.

В результате решения задачи с учетом собственных колебаний стержня получены формы колебаний при различных величинах дефекта.

При рассмотрении первой формы колебаний, анализ графиков показал, что в месте дефекта имеется характерно выраженный «излом», в разной степени зависящий от размера дефекта. Излом на кривой формы колебаний слабо проявлен, что видно на графиках. В качестве показательной характеристики наличия дефекта в консольном стержне, используются угол α , образованный касательными к кривой формы колебаний, и кривизна

образующей формы колебаний.

Величина дискретного отрезка Δx при расчете параметров формы колебаний принималась равной $1/100$ от длины стержня. На рис. 4 представлены нормированные собственные формы колебаний стержня при различных величинах дефекта.

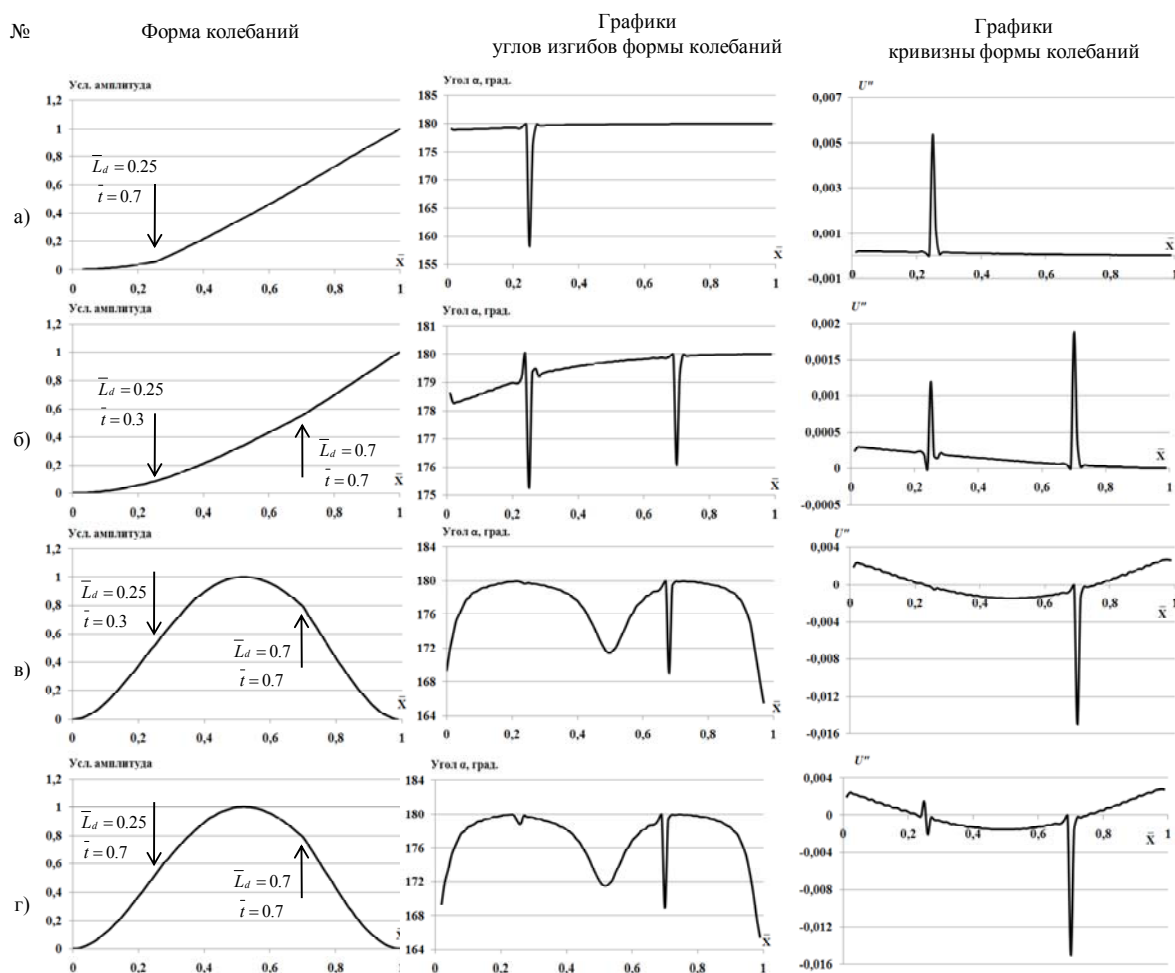


Рис. 4. Нормированные значения поперечных смещений \bar{U} стержня с дефектами \bar{i} и различными вариантами его закрепления для первой моды поперечной формы колебаний. Графики углов изгибов и кривизна первой формы колебаний.

Анализ графиков форм колебаний (ФК), образованных касательными и кривизны показывает возможность использования критерия идентификации местоположения дефектов, при анализе данных параметров. Для консольного стержня два параметра хорошо определяют местоположение дефекта. Вследствие того, что параметр угла в точках, образованных касательными,

более чувствителен к изгибам формы колебаний, то для стержня имеющего закрепление с двух концов он слабо идентифицирует местоположения дефектов. Для данного варианта закрепления и анализа формы колебаний он достаточно хорошо идентифицирует дефект при его величине $\bar{i} > 0.5$. Для варианта модели стержня №3 дефект с местоположением $L_d = 0,25$ плохо идентифицируется вследствие того, что он расположен в месте перегиба кривой формы колебаний. Кривизна формы колебаний для случая модели стержня №4 хорошо идентифицирует местоположения дефекта.

Исследования показывают, что применение изложенной методики многопараметрической идентификации дефектов в стержневой конструкции позволяет рассчитать параметры дефекта в стержне, при задании граничных условий, в т. ч. глубины и местоположения дефекта. Снижение погрешности в определяемых параметрах идентификации стержня достигается благодаря использованию более широкого набора исходных данных в алгоритме, а так же в силу применения многопараметрического диагностического признака идентификации. Рассмотренный метод может быть положен в основу разработки методики диагностики технического состояния строительных конструкций.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14–08–00683-а).

Литература:

1. Косенко, Е.Е., Бурцева, О.А., Нефедов, В.В., Косенко, В.В., Черпаков, А.В. Моделирование напряженного состояния арматурных стержней, применяемых при производстве преднапряженных железобетонных конструкций [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2011, №4. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2009/250> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

2. Косенко, Е.Е., Мещеряков, В.М., Косенко, В.В., Черпаков, А.В. Моделирование напряженного состояния арматуры железобетонных конструкций, с учетом влияния концентраторов напряжения в виде периодического профиля [Электронный ресурс] // «Науковедение», 2012, № 3.
3. Косенко, Е.Е., Косенко, В.В. Черпаков, А.В. К вопросу о влиянии геометрических размеров на прочностные характеристики арматурных сталей [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2010, №4. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2009/250> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
4. Giraldo, D.F., A Structural Health Monitoring Framework for Civil Structures, Wash. Univer. Dissert. Depart. of Civil Engineering, Saint Jouris, Missouri: 2006.
5. Del. Grosso, A. and Lanato, F., A Critical Review of Recent Advances in Monitoring Data Analysis and Interpretation for Civil Structures, Proc. Four European Conf. of Struct. Control., St. Petersburg, 2008, v. 1, p. 320–330.
6. V.Akopyan, A.Soloviev and A.Cherpakov. Parameter Estimation of Destruction State of the Steel Frame Constructions Using Finite Element and Vibrodiagnostic Methods/ In coll. Mechanical Vibrations: Types, Testing and Analysis . Ch.7. Ed.A.Galloway. N.-Y. NovaSciencePublishers. 2011, p.147-161.
7. Черпаков А.В., Акопьян В.А., Соловьев А.Н., Шевцов С.Н.. Идентификация параметров повреждений в упругом стержне с использованием конечно-элементного и экспериментального анализа мод изгибных колебаний//Вестник ДГТУ, 2011, т.11, №3 (54), с. 312-318.
8. Интегральный диагностический признак идентификации повреждений в элементах стержневых конструкций [Текст]/ В. А. Акопьян, А. В. Черпаков, А. Н. Соловьев и др. // Контроль. Диагностика. - 2012. - №7. - С. 50-56.

9. Bamnios Y., Douka E. and Trochidis. Crack identification in beam structures using mechanical impedance// J. of Sound and Vibration. 2002. v. 256(2), pp. 287-297.
10. Акопян В.А., Соловьев А.Н., Черпаков А.В., Шевцов С.Н. О деформационном признаке идентификации повреждений, основанном на анализе форм собственных колебаний кантилевера с надрезом // Дефектоскопия. -2013.-№10. - С. 36-39.