

А. В. Черпаков, Р. А. Каюмов, Е. Е. Косенко,
И. З. Мухамедова

МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛКИ С ДЕФЕКТАМИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫМ МЕТОДОМ

Ключевые слова: модель, конечный элемент, кантилевер, стержень, надрез, колебание.

Исследования посвящены определению величин параметров колебаний в зависимости от вида дефекта по величине сечения. Проведен модальный расчет колебаний стержня. Рассмотрены формы колебаний и собственные частоты конечно-элементных моделей кантилевера с дефектами. Анализ полученных параметров резонансов показывает, что наибольшее отклонение имеют как собственные частоты, так и амплитуды колебаний для дефекта, имеющего одностороннее исполнение. Проведен расчет напряженного состояния стержня, нагруженного на свободном конце статической силой, в пакете Ansys.

Keywords: model, finite element, cantilever, rod, incision, fluctuation.

Investigations related to the determination of the oscillation parameters, depending on the type of defect largest section. Held Modal vibrations of a rod. Consider the form of vibrations and natural frequencies of finite element models of the cantilever with defects. Analysis of the resonance parameters shows that the largest deviation are as natural frequencies and vibration amplitude for a defect having unilateral execution. The calculation of the stress state bar loaded at the free end of the static force in the package Ansys.

Введение

Одним из направлений диагностики технического состояния конструкций различного назначения, в т.ч. стержневых, ключевым звеном является поиск подходов, позволяющих определить параметры дефектного состояния. При рассмотрении простых конструкций, состоящих из стержневых элементов, применяются различные методы моделирования технического состояния. Решению этой задачи сопутствует анализ и выявление различных признаков идентификации повреждений. Краткий анализ известных подходов к решению некоторых из таких задач приведен в ряде обзоров и статей [1-5].

При моделировании стержневой конструкции с помощью упрощенных моделей возникает вопрос о степени зависимости различных параметров колебаний от формы дефекта. При этом рассматриваются дефекты, имеющие раскрытие с одной и с двух сторон стержня, располагающиеся в одном месте по длине стержня.

Построение модели

Задачей является определение величин параметров колебаний в зависимости от вида дефекта по величине сечения.

Рассмотрен кантилевер с дефектами в виде надрезов, согласно схеме, представленной на рис. 1. Стержень имел габариты:

$$L \cdot h \cdot a = 0.250 \cdot 0.008 \cdot 0.004 \text{ (м}^3\text{)}.$$

Надрезы располагались в сечении, которое имело наибольшую жесткость. Ширина надрезов принималась равной $b=1\text{ мм}$. Надрезы с различными вариантами размеров с одной или с двух сторон (h_1, h_2), располагались в одной точке с координатой по горизонтальной оси $L_d=0.0625\text{ м}$ (относительная величина расположения надрезов к длине стержня $\bar{L}_d = L_d / L = 0.25$).

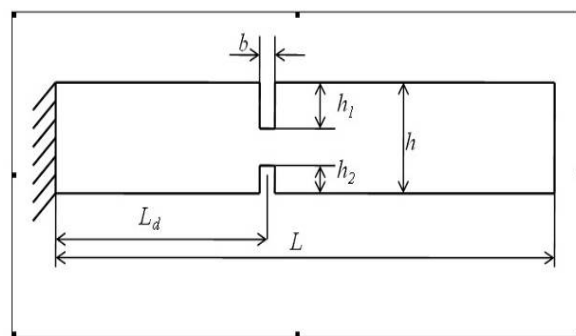


Рис. 1 - Схема кантилевера с расположением надрезов

Рассматривалась относительная характеристика размера надреза – величины надрезов относились к полной высоте стержня:

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1}{h}; \bar{h}_2 = \frac{h_2}{h}; \bar{h} = \bar{h}_1 + \bar{h}_2.$$

Варианты надрезов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Различные варианты относительных величин надрезов стержня

Общая степень надреза	Варианты надрезов			
$\bar{h} = 0.50$	$\bar{h}_1 = 0.25;$ $\bar{h}_2 = 0.25$	$\bar{h}_1 = 0.00;$ $\bar{h}_2 = 0.50$	$\bar{h}_1 = 0.10;$ $\bar{h}_2 = 0.40$	$\bar{h}_1 = 0.20;$ $\bar{h}_2 = 0.30$
$\bar{h} = 0.70$	$\bar{h}_1 = 0.35;$ $\bar{h}_2 = 0.35$	$\bar{h}_1 = 0.00;$ $\bar{h}_2 = 0.70$	$\bar{h}_1 = 0.10;$ $\bar{h}_2 = 0.60$	$\bar{h}_1 = 0.20;$ $\bar{h}_2 = 0.50$

Моделирование проводилось в конечно-элементном комплексе Ansys. Рассматривалась полнотелая модель (3-х мерная) на основе применения трехмерного элемента Solid92. Предварительно был проведен анализ изменения собственных частот при различной степени размеров конечных элементов как по всему стержню, так и в окрестности надреза.

реза.

При данном разбиении (на основе уменьшения размеров конечных элементов) погрешность определения собственных частот была минимальна. Разбивка модели на узлы по длине производилась кратной 1/30 от длины стержня. По высоте и ширине стержня производилась разбивка на узлы кратной 1/3, соответствующей грани.

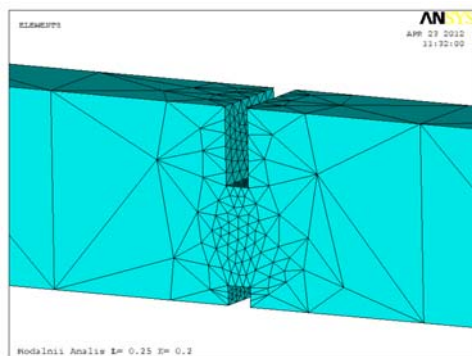


Рис. 2 - Пример конечно-элементной модели стержня моделирования надрезов для величины $\bar{h}_1=0.4$, $\bar{h}_2=0.1$

В месте моделирования надрезов конечно-элементная сетка сгущалась (рис. 2). Модель обладает механическими свойствами, эквивалентными натурной модели: модуль Юнга $E=2.1$ МПа; плотность $\rho = 7700$ кг/м³.

Результаты конечно-элементного расчета

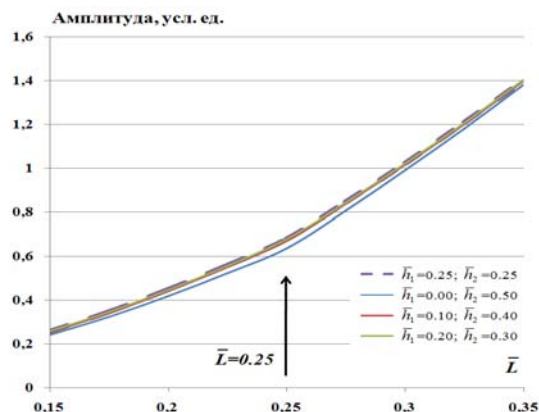
Проведен модальный расчет колебаний стержня. Рассмотрены формы колебаний и собственные частоты КЭ моделей кантилевера с дефектами, с местоположением в точке $\bar{L}_d=0.25$. Принимались следующие размеры полного надреза: а) $\bar{h}=0.5$; б) $\bar{h}=0.7$. На рис. 3 представлены кривые форм поперечных колебаний первой моды в плоскости наибольшей жесткости (вертикальная плоскость) КЭ модели в окрестности дефекта [8].

Анализ полученных параметров резонансов показывает, что наибольшее отклонение имеет как собственные частоты, так и амплитуды колебаний для дефекта, имеющего одностороннее исполнение - при величине надреза $\bar{h}=0.5$: $\bar{h}_1=0$, $\bar{h}_2=0.5$ и при величине надреза $\bar{h}=0.7$: $\bar{h}_1=0$, $\bar{h}_2=0.7$. Соответственно, относительные отклонения амплитуды формы колебаний в точке расположения, на рис. 3а) и 3б) характеризуются соответствующим изломом форм колебаний и составляет -3.27% для величины надреза $\bar{h}=0.5$, а также равно -7.44% для величины надреза $\bar{h}=0.7$. Относительное отклонения собственных частот первой моды колебаний стержня, составляет -6.5% для величины надреза $\bar{h}=0.5$, и также равно -14.3% для величины надреза $\bar{h}=0.7$.

Рассчитаны резонансы первых 10-ти мод колебаний кантилевера при разных вариантах над-

резов, и, соответственно, их относительные отклонения от варианта с расположением надрезов симметрично относительно горизонтальной оси стержня ($\bar{h}_1=0.25$, $\bar{h}_2=0.25$ и $\bar{h}_1=0.35$, $\bar{h}_2=0.35$). Анализ показывает, что наибольшее отклонение частот имеет вариант с расположением надрезов с $\bar{h}_1=0.0$, $\bar{h}_2=0.5$ и $\bar{h}_1=0.0$, $\bar{h}_2=0.7$ - соответственно, имитирующего односторонний надрез. Для варианта величины надреза $\bar{h}=0.5$ наибольшее отклонение частот составило -3.27% и для величины надреза $\bar{h}=0.7$ составило -7.44%.

а



б

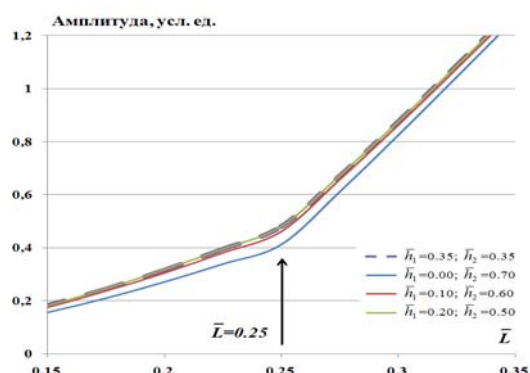


Рис. 3 - Кривые форм первой моды поперечных колебаний в плоскости наибольшей жесткости модели в окрестности дефекта и его соответствующих размерах: а) $\bar{h}=0.5$; б) $\bar{h}=0.7$

Проведен расчет напряженного состояния стержня, нагруженного на свободном конце статической силой, направленной в направлении ОУ, в пакете Ansys. Анализ напряженного состояния трехмерной балки с односторонним и двусторонними надрезами показывают, что в окрестности расположения дефекта в пределах двух размеров высоты балки напряженное состояние отличается от напряженного состояния области основной балки. Поврежденная область мала по сравнению ко всей длине балки. Вследствие этого предполагается, что гипотезы балочной теории Эйлера-Бернулли могут не выполняться в области локации дефекта, и необходимо учитывать данную область путем моделирования дефекта в виде отдельного эквивалентного элемента. Примером такого элемента может служить

упругая пружина, обладающая изгибной жесткостью.

Заключение

Таким образом, при сравнении собственных частот и форм колебаний моделей стержня с надрезами различной степени, расположенных в месте $\bar{L}_d=0.25$, были получены максимальные отклонения при анализе 10-ти собственных частот при величине надреза $\bar{h}=0.5$ – -3,27% и при $\bar{h}=0.7$ – -7,44%. Сравнительный анализ форм первой моды колебаний показал, что наибольшее отклонение амплитуды колебаний данного варианта расположения в точке надреза имеется при величинах надреза $\bar{h}=0.5$ – $\Delta A=6.5\%$ и при $\bar{h}=0.7$ – $\Delta A=14.3\%$, а угла излома формы колебаний при $\bar{h}=0.5$: $\Delta\alpha=-0.6\%$ и при $\bar{h}=0.7$: $\Delta\alpha=-1.64\%$.

При рассмотрении различных вариантов надреза, расположенных в месте $\bar{L}_d=0.25$, анализ показывает, что характер напряженного состояния и параметры форм колебаний отличаются лишь в окрестности местоположения дефекта. При этом резонансные частоты отличаются в малых отклонениях от среднего расположения дефекта, что может говорить о применении упрощенной балочной модели при расчете параметров колебаний. В связи с тем, что наиболее часто встречаются дефекты в виде трещин, сколов, выходящих на поверхность одной из граней конструкции, то далее будем исследовать балку с односторонним дефектом.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (соглашение 14.B37.21.2018).

Литература

1. Del. Grosso A Critical Review of Recent Advances in Monitoring Data Analysis and Interpretation for Civil Structures / Del. Grosso, A. Lanato // Proc. Four European Conf.

- of Struct. Control., St. Petersburg, 2008, vol. 1, pp. 320–330.
2. V.Akopyan Parameter Estimation of Destruction State of the Steel Frame Constructions Using Finite Element and Vibrodiagnostic Methods/ Akopyan V., Soloviev A., Cherpakov A. // In coll. Mechanical Vibrations: Types, Testing and Analysis . Ch.7. Ed.A.Galloway. N.-Y. NovaSciencePublishers. 2011. – pp.147-161.
3. Акопян В.А. Аналитический и конечно-элементный анализ параметров колебаний в стержне с повреждением / В.А. Акопян, А.В.Черпаков, А.Н.Соловьев, А.Н.Кабельков, С.Н. Шевцов // Изв. Вузов “Северо-Кавказский регион техн. науки”. 2010, №5. – с. 21-28
4. Черпаков А.В. Идентификация параметров поврежденности в упругом стержне с использованием конечно-элементного и экспериментального анализа мод изгибных колебаний / А.В.Черпаков, В.А.Акопян, А.Н.Соловьев, Е.В.Рожков, С.Н. Шевцов // Вестник Донского государственного технического университета. 2011. – т.11. – №3(54). – С. 312-318.
5. Krasnoshchekov A.A. Identification of Crack Like Defects in Elastic Structural Elements on the Basis of Evolution Algorithms. / A.A.Krasnoshchekov, B.V.Sobol, A.N.Solov'ev, A.V.Cherpakov // ISSN 1061_8309, Russian Journal of Nondestructive Testing, 2011, Vol. 47. – No. 6. – pp. 412–419.
6. Каюмов Р.А. Моделирование поведения пленочно-тканевого материала при воздействии эксплуатационных факторов/ Р.А. Каюмов, А.М.Сулейманов, И.З.Мухамедова // Механика композиционных материалов и конструкций. 2005. – т.11. – №4. – С.519-530.
7. Каюмов, Р.А. Физически нелинейная модель тканевых материалов, обработанных в потоке высокочастотной плазма/ Р.А.Каюмов, И.Ш.Абдуллин, М.Н.Серазутдинов, В.В.Хамматова, И.З.Мухамедова, Е.В.Кумпан, А.М.Шакирова // Вестник Казанского технологического университета. № 6; Федеральное агентство по образованию, Казан. гос. технол. ун-т. – Казань: КГТУ, 2010. – С. 42 – 53.
8. Каюмов, Р.А. Математическое моделирование деформирования текстильных материалов с содержанием полимерных волокон /Р.А.Каюмов, В.В.Хамматова// Вестник Казанского технологического университета. № 14; Федеральное агентство по образованию, Казан. гос. технол. ун-т. – Казань: КГТУ, 2012. – С. 154 – 156.

© **А. В. Черпаков** – мл. науч. сотр. научно-исслед. института механики и прикладной математики им. И.И. Воровича Южно федер. университета, alex837@yandex.ru; **Р. А. Каюмов** – проф., д.ф.-м.н., зав. каф. сопротивления материалов и основ теории упругости КГАСУ, проф. каф. дизайна КНИТУ, kayumov@rambler.ru; **Е. Е. Косенко** – к.т.н., доцент, Ростовский госуд. строительный университет, eekosenko@yandex.ru; **И. З. Мухамедова** – к.ф.-м.н., доц. каф. сопротивления материалов и основ теории упругости КГАСУ, muhamedova-inzilija@mail.ru.