

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 69.04, 534.11, 620.1

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-56-64

*А.А. ГАВРИЛОВ¹, Г.И. ГРЕБЕНЮК², В.И. МАКСАК², Н.А. МОРОЗОВ¹,
¹Оренбургский государственный университет,
²Томский государственный архитектурно-строительный университет*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ С МОДЕЛИРОВАНИЕМ ТРЕЩИНЫ

Исследование посвящено разработке подходов к обнаружению трещин в металлических стержневых конструкциях на основе анализа изменений собственных частот низших форм колебаний. В исследовании проводились натурный и численный эксперименты, сравнивались результаты частот. Натурный эксперимент проводился с использованием виброанализатора, для численного эксперимента применялась система Autodesk Inventor. Учитывалось внутреннее трение, что позволило уточнить места расположения пучностей различных форм колебаний с помощью специально созданной для этих целей программы. В модели учитывались датчики, применяемые в натурном эксперименте, как массы, влияющие на амплитудно-частотные характеристики. Получены зависимости для определения частот собственных колебаний при наличии трещин и для определения места расположения трещины. Установленные варианты полиномиальной зависимости места расположения модели трещины от частот первых низших четырех форм колебаний стержня могут быть использованы для анализа положения трещин в консольных балках.

Ключевые слова: собственные колебания; частота; тонкостенный стержень; трещина; виброанализатор; моды колебаний.

Для цитирования: Гаврилов А.А., Гребенюк Г.И., Максак В.И., Морозов Н.А. Исследование частот собственных колебаний металлического стержня с моделированием трещины // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 56–64.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-56-64

*A.A. GAVRILOV¹, G.I. GREBENYUK², V.I. MAKSAC², N.A. MOROZOV¹,
¹Orenburg State University,
²Tomsk State University of Architecture and Building*

CRACK MODELING OF METAL ROD EIGEN-FREQUENCIES

The paper presents the development of approaches to the crack detection in metal rod structures based on the analysis of the lowest eigen-frequency modes. Full-scale experiments and

numerical calculations are carried out, and the obtained results are compared. A vibration analyzer is used for full-scale experiments, and numerical calculations are performed by using Autodesk Inventor. With regard to the internal friction, the antinodes of various vibration forms were identified using a specially developed program. The model includes sensors for the field experiment as masses affecting the frequency-response characteristics. The dependences are obtained for eigen-frequencies in the presence of cracks and for the crack locations. The polynomial dependences of the crack location on the lowest eigen-frequency modes of the rod can be used to analyze the crack position of in cantilever beams.

Keywords: eigen-frequency; thin-walled bar; crack; vibration analyzer; vibration modes.

For citation: Gavrilov A.A., Grebenyuk G.I., Maksak V.I., Morozov N.A. Issledovanie chastot sobstvennykh kolebaniy metallicheskogo sterzhnya s modelirovaniem treshchiny [Crack modeling of metal rod eigen-frequencies]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 2. Pp. 56–64.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-56-64

Введение

Широкое распространение металлических тонкостенных стержневых конструкций делает необходимым разработку методов и средств диагностики дефектов, возникающих в данных конструкциях в процессе эксплуатации. Одним из наиболее распространенных дефектов являются трещины. Причины возникновения трещин достаточно разнообразны: от несовершенства процессов изготовления конструкций до усталости и коррозии металлов в процессе эксплуатации. В связи с этим разработки, направленные на выявление трещин в металлических тонкостенных стержневых конструкциях, являются весьма актуальными.

В настоящее время исследованию влияния трещин на изменение динамических характеристик балочных конструкций, а также идентификации трещин посвящено много работ. По измерению первой и второй собственных частот колебаний производится идентификация трещины в работе [1], что позволило однозначно определить глубину и положение повреждения малых трещин. В статье [2] описывается метод, позволяющий вычислить местоположение трещины в стержне по собственным частотам продольных колебаний, в [3] процедура обнаружения трещин основана на методе глобального поиска с использованием генетических алгоритмов, поэтому не накладывает никаких ограничений на местоположение, размер и количество трещин, которые могут быть обнаружены. В работе [4] предлагается конечно-элементный анализ конструкции и приводятся тестовые расчеты на примере балки-стенки без трещины и при наличии трещины. Учет внутреннего трения и затухания из-за наличия трещины производится в работе [5]. В этом случае повышенная гибкость, появляющаяся благодаря наличию трещины, была смоделирована невесомой пружиной, а увеличенное демпфирование было смоделировано невесомым демпфером в месте расположения трещины, на основании чего рассчитывался коэффициент затухания.

В настоящей работе исследуются изгибные колебания стержня, а оптимизация процедуры поиска расположения трещин основана на анализе изменения

собственных частот колебаний. Целью данного исследования является получение зависимостей координат мест расположения трещин от частот низших форм колебаний стержней на основе экспериментальных исследований.

Методы исследования

Натурный эксперимент проводился с использованием виброанализатора «Вибран-3.2» по методу 100.3 из ГОСТ 30630.1.1–99 «Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Определение динамических характеристик конструкции». Используемые датчики – 352С04.

Образцы для экспериментов изготавливались согласно ГОСТ 8645–68 из стержней прокатного профиля. Материал образцов – сталь Ст3пс.

Стержни жестко заземлялись одним концом. В одной из точек закреплялась нить с грузом массой 4 кг. В дальнейшем нить разрезалась и фиксировались частоты собственных колебаний. Трещина моделировалась как разрез шириной 1 мм.

На верхней стороне испытуемого стержня устанавливались магнитные датчики, а кабели от них закреплялись на подвесе. Подвес необходим для исключения влияния массы провода на колебательную систему. Датчики подключались к портам виброанализатора «Вибран-3.2» в порядке нумерации.

С помощью виброанализатора производилась запись колебаний по четырем каналам в задаваемом временном интервале с ручным запуском. Данные с виброанализатора переносились на ПК. С помощью специального программного обеспечения строились графики колебаний и спектральные графики.

Так как виброанализатор имеет определенную чувствительность, исследовались первые четыре формы колебаний и определялись места нахождения зон максимальных отклонений точек оси балки от положения статического равновесия (рис. 1). Для определения этих точек для каждой формы были исследованы дифференциальные уравнения колебаний тонкостенной балки. В отличие от существующих методик исследований колебаний балок в данном случае учитывалось внутреннее трение [6], что позволило уточнить места расположения точек с помощью специально созданной для этих целей программы.

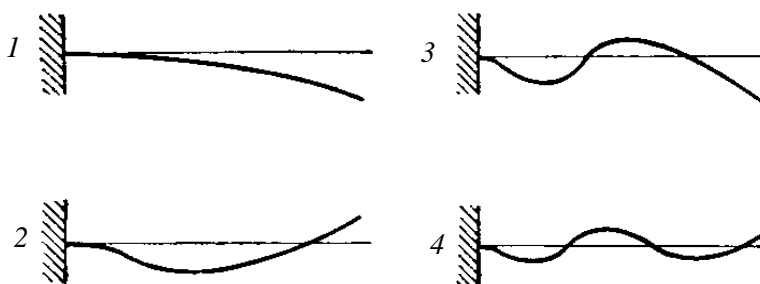


Рис. 1. Формы колебаний консольной балки (номер соответствует номеру формы изгибных колебаний)

Для каждого образца было проведено по 30 измерений. Сначала проводился замер колебаний балки без трещины, по 3 измерения в 2 диапазонах

частот. Далее на указанном расстоянии для конкретной балки делался пропил глубиной $h = 25$ мм, для которого также проводилось по 3 замера в 2 диапазонах частот. Затем пропил углублялся с шагом 25 мм до достижения глубины 100 мм. Данные операции производились для каждого стержня.

Рез, моделирующий трещину, представлен на рис. 2.



Рис. 2. Моделирование трещины в натурном эксперименте

Для численного эксперимента применялась система AutodeskInventor. Создавалась твердотельная модель стержня (рис. 3). Один конец стержня фиксировался от перемещений и поворотов. Размеры трещин и стержня принимались как в натурном эксперименте. В модели учитывались датчики, применяемые в натурном эксперименте, как массы, влияющие на амплитудно-частотные характеристики.

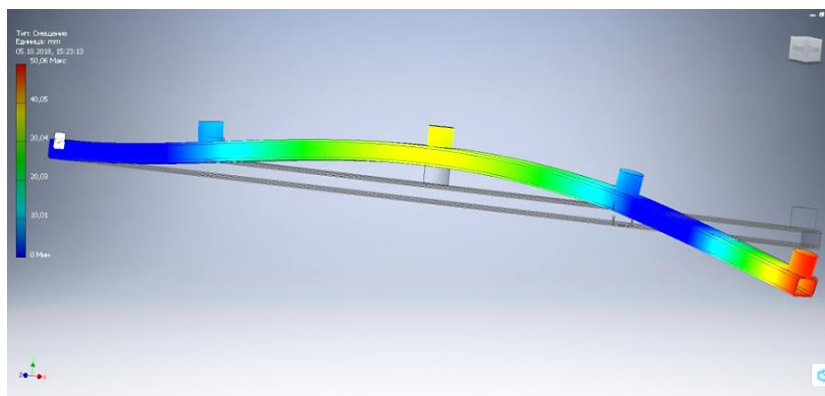


Рис. 3. Модель стержня с датчиками в AutodeskInventor

Результаты эксперимента

Обработанные экспериментальные результаты представлены в виде графиков (рис. 4–7) отклонения частот колебаний ω в зависимости от относительного расположения трещины a (отношения расстояния от трещины до заделки к длине стержня) и ее глубины h .

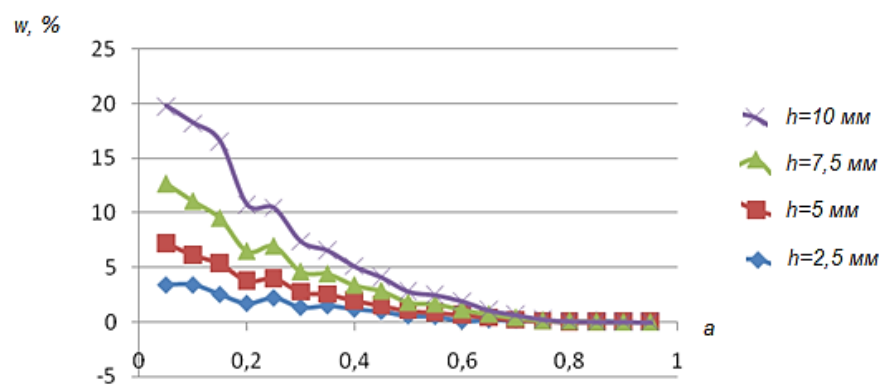


Рис. 4. Значения отклонения частоты первой формы колебаний

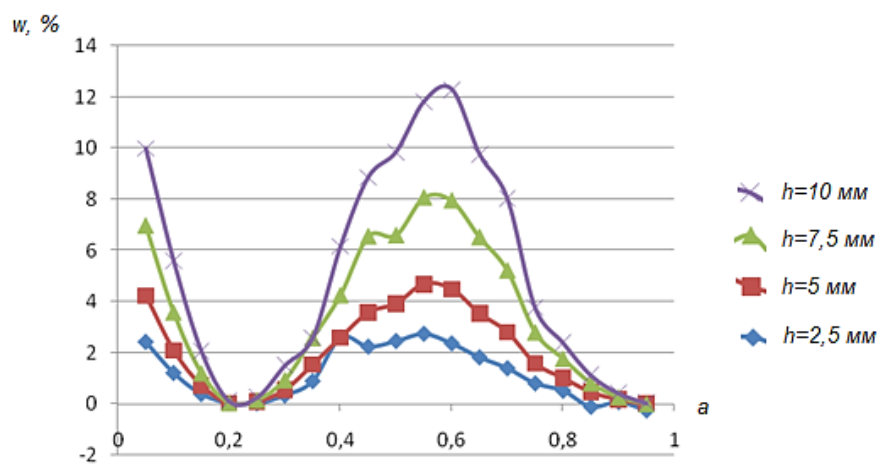


Рис. 5. Значения отклонения частоты второй формы колебаний

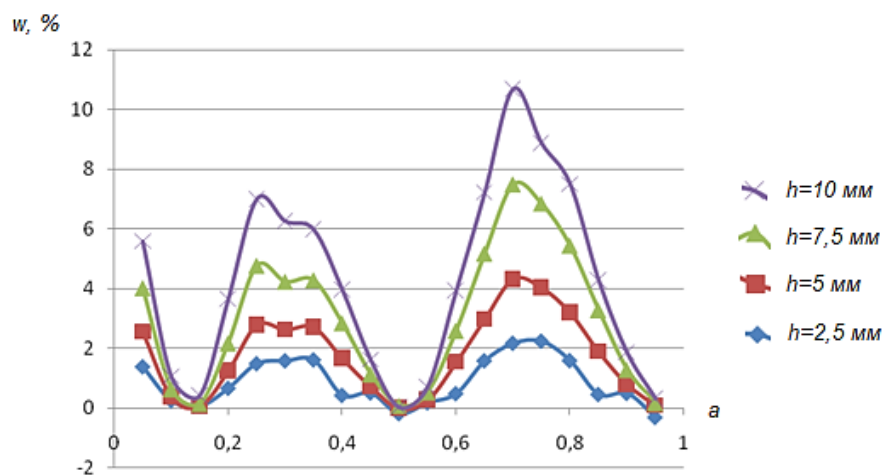


Рис. 6. Значения отклонения частоты третьей формы колебаний

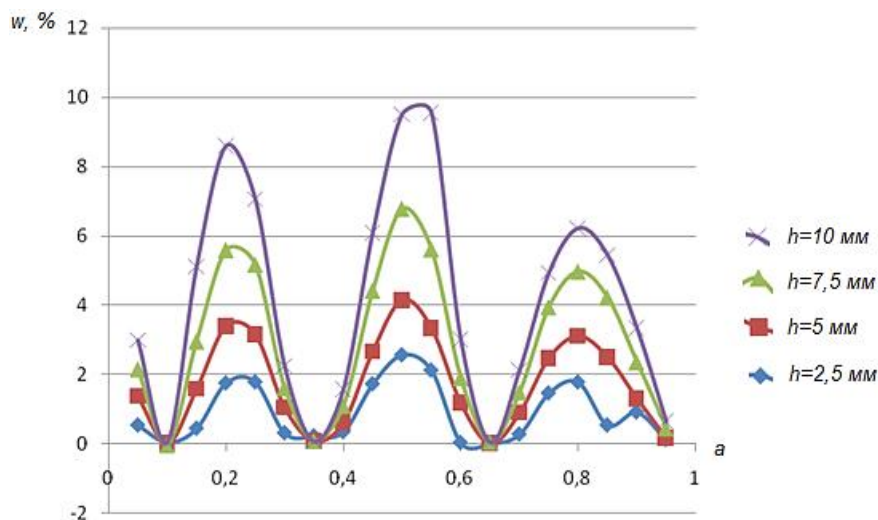


Рис. 7. Значения отклонения частот четвертой формы колебаний

Как видно из графиков, при расположении трещины в зоне «перегиба» формы получены нулевые значения отклонений, т. е. наличие трещины не влияет на форму колебаний.

Анализ показал, что расхождение между результатами численного и натурного экспериментов для решаемой задачи не превышает 12 %. При этом максимальная разница соответствует 4-й форме колебаний при разрезе на расстоянии 0,1 длины от свободного конца стержня. Остальные значения лежат в диапазоне до 8 %.

Для прогнозирования значения собственной частоты колебаний (ν) в зависимости от места появления и глубины трещины уравнение представлялось в виде

$$\nu = A_1 + (A_2 + A_3x + A_4y)\sin(A_5x + A_6), \quad (1)$$

где x – место расположения трещины как относительная величина, $x = (0 \dots 1)$; y – глубина трещины, выраженная как относительная величина, $y = (0 \dots 0,5)$; A_i – коэффициенты.

В результате для каждой из четырех форм были получены значения коэффициентов и сведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов для определения форм колебаний

Номер коэффициента	Значения коэффициентов для форм колебаний			
	1-я форма	2-я форма	3-я форма	4-я форма
1	19,19	116,0	327,5	603,9
2	1,259	1,199	-13,67	1,896
3	-18,22	-0,4168	21,43	-1,624
4	22,49	5,074	13,56	21,41
5	0,1991	9,890	11,79	21,30
6	175,8	137,3	102,8	188,6

Для определения местоположения трещины проводился регрессионный анализ. При этом устанавливалась зависимость места расположения трещины от отклонений частот первых низших четырех форм колебаний в виде полинома:

$$x = B_{ij} w_i w_j. \quad (2)$$

Здесь $i, j = (0, 1, 2, 3, 4)$ – порядковые номера частоты, для значения «0» принимается $w_0 = 1$.

В табл. 2 приведены коэффициенты B_{ij} для полинома и для сравнения – коэффициенты линейной регрессии.

Таблица 2

Значения коэффициентов в полиноме с учетом двух множителей

Индекс коэффициента	Значения для полинома	Значения для случая линейной регрессии
0	1	0,7793
1	-0,0993	-0,0389
2	-0,0069	-0,0059
3	-0,0386	-0,0028
4	-0,0126	-0,0059
11	0,0040	–
22	-0,0019	–
33	-0,0023	–
44	-0,0002	–
12	-0,0036	–
13	0,0033	–
14	-0,0016	–
23	0,0058	–
24	0,0030	–
34	0,0041	–

Максимальная среднеквадратичная ошибка определения положения трещины при использовании линейной регрессии составила 2,3 %. Использование полинома (1) позволило снизить ошибку определения положения трещины до 0,2 % по длине балки.

Заключение

Таким образом, необходимо отметить, что разница между результатами численного и натурального экспериментов при определении частот собственных колебаний тонкостенного стержня, имеющего смоделированную трещину, не превышает 12 %, что свидетельствует о том, что данное моделирование трещин при численном эксперименте является допустимым.

При наличии трещины в зоне «перегиба» определенной формы колебаний влияние трещины на изменение частоты колебаний для данной формы является незначительным.

Установленные варианты полиномиальной зависимости места расположения модели трещины от частот первых низших четырех форм колебаний стержня с моделью трещины могут быть использованы для анализа положения трещин в консольных балках. Дальнейшее развитие рассматриваемого подхода видится в установлении подобных зависимостей для балок при различном закреплении с введением поправочных коэффициентов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fernández-Sáez J., Morassi A., Pressacco M., Rubio L. Unique determination of a single crack in a uniform simply supported beam in bending vibration // *Journal of Sound and Vibration*. 2017. V. 371. P. 94–109.
2. Ахтямов А.М., Каримов А.Р. Диагностирование местоположения трещины по собственным частотам продольных колебаний // *Техническая акустика*. 2010. Т. 10. С. 3.
3. Chuanchuan Hou, Yong Lu. Identification of cracks in thick beams with a cracked beam element model // *Journal of Sound and Vibration*. 2016. V. 385. P. 104–124.
4. Дербасов А.Н. Конечно-элементная вибродиагностика конструкций с трещиной // *Транспортные системы*. 2017. № 1 (4). С. 49–55.
5. Khassestarash A., Hassannejad R. Energy dissipation caused by fatigue crack in beam-like cracked structures // *Journal of Sound and Vibration*. 2016. V. 363. P. 247–257.
6. Gavrilov A., Grebenyuk G., Morozov N., Grehov A. Free Vibrations of Thin-Walled Box-Section Bars Allowing for Shear Strains // *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. V. 7. I. 2. № 13. P. 7–12.

REFERENCES

1. Fernández-Sáez J., Morassi A., Pressacco M., Rubio L. Unique determination of a single crack in a uniform simply supported beam in bending vibration. *Journal of Sound and Vibration*. 2017. V. 371. Pp. 94–109.
2. Akhtyamov A.M., Karimov A.R. Diagnostirovanie mestopolozheniya treshchiny po sobstvennym chastotam prodol'nykh kolebaniy [Crack location diagnosis by natural frequencies of longitudinal oscillations]. *Tekhnicheskaya akustika*. 2010. V. 10. P. 3. (rus)
3. Chuanchuan Hou, Yong Lu. Identification of cracks in thick beams with a cracked beam element model. *Journal of Sound and Vibration*. 2016. V. 385. Pp. 104–124.
4. Derbasov A.N. Konechno-elementnaya vibrodiagnostika konstruksii s treshchinoi [Finite element vibration analysis of cracked structure]. *Transportnye sistemy*. 2017. No. 1 (4). Pp. 49–55. (rus)
5. Khassestarash A., Hassannejad R. Energy dissipation caused by fatigue crack in beam-like cracked structures. *Journal of Sound and Vibration*. 2016. V. 363. Pp. 247–257.
6. Gavrilov A., Grebenyuk G., Morozov N., Grehov A. Free Vibrations of thin-walled box-section bars allowing for shear strains. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. V. 7. No. 2.13. Pp. 7–12.

Сведения об авторах

Гаврилов Александр Александрович, канд. техн. наук, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, pialex@bk.ru

Гребенюк Григорий Иванович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, greb@sibstrin.ru

Максак Владислав Иванович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Морозов Николай Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13.

Authors Details

Aleksandr A. Gavrilov, PhD, Orenburg State University, 13, Pobedy Ave., 460000, Orenburg, Russia, pialex@bk.ru

Grigorii I. Grebenyuk, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, greb@sibstrin.ru

Vladislav I. Maksak, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

Nikolai A. Morozov, PhD, A/Professor, Orenburg State University, 13, Pobedy Ave., 460000, Orenburg, Russia.