620.1.08:53.08:629.12

Экспериментальная идентификация напряженного состояния элементов стержневых конструкций

Ю. В. ЕСИПОВ*, С. Н. САЗАНОВ, С. И. КАЛИЕНКО***, А. М. УЗУНЯН*****

** Южный научный центр РАН, e-mail: yu-yesipov5@yandex.ru*
*** Гостехнадзор СКВО, e-mail: 965_OGTN_SKVO@mail.ru*
**** Ростовский технологический институт сервиса и туризма*

На примере двух разновидностей моделей стержневых элементов в виде плоских цельновырезанных и сварных образцов построены фурье-образы серийных деформационных откликов исходной и разгруженной моделей с привлечением разработанных алгоритмов снятия напряжения и серийного тестирования при дискретном изменении возбуждения. На основании анализа нелинейной и линейных областей этих фурье-образов экспериментально обоснован качественный и количественный признаки нахождения конструкции и (или) элемента в напряженном состоянии.

Ключевые слова: *сложная конструкция, стержневой элемент, ударное возбуждение, динамическая деформация, фурье-анализ.*

By example of two kinds of rod element models in forms of integrally cut and welded samples and by verification of developed algorithms the Fourier images of deformation responses of initial and unloaded models are constructed. On the basis of linear and nonlinear Fourier image regions analysis the qualitative and quantitative criteria of stress level of the structure and (or) of the element are experimentally justified.

Key words: *complex structure, rod element, impact excitation, dynamic deformation, Fourier analysis.*

Неразрушающий контроль напряженного состояния как элементов, так и сложной конструкции в целом может служить предпосылкой для ранней диагностики многих механических систем [1—3]. Разработанные до настоящего времени экспериментальные методы и средства, в первую очередь, тензометрии [2, 4], вибродиагностики [1, 3, 5] и акустико-эмиссионного контроля [1, 6], не позволяют, с одной стороны, проводить широкополосную (от 0,1 до 10000 Гц) регистрацию и анализ динамической деформации конструкций, а с другой — оценивать напряженные состояния элементов и конструкций без их искусственного расчленения. Известные теоретико-экспериментальные [5, 7] и теоретические [8, 9] работы, а также расчетные методы [10, 11] и программы [12, 13] сводятся к анализу устойчивости и идентификации конструкций без совокупного учета всех напряжений в элементах и напряженного поведения во времени цельной конструкции. При этом в [13] указывается на необходимость «сшивки» полученных решений о напряженных и (или) поврежденных состояниях как конструкций, так и их элементов.

При решении задачи мониторинга состояния стержневых конструкций с использованием сегнетоэлектрических микродатчиков [14, 15] на основе разработанных способа и устройства для серийного ударного тестирования [16, 17] были экспериментально получены качественные признаки в виде областей фурье-образа деформационных откликов, применяемые для выявления напряженных и (или) поврежденных состояний модели сложной конструкции. В качестве такой модели была выбрана металлическая полностью сварная стержневая периодическая семипролетная конструкция. В этой связи важной оказывается задача верификации (подтверждения достоверности) полученных ранее результатов на более простых моделях с возможностью экспериментального создания их ненапряженного состояния и проведения дополнительного сравнительного анализа по полученным признакам различения.

Цель статьи — методическое и инструментальное (экспериментальное) обоснование состояния напряженных и (или) поврежденных конструкций и, в частности, признаков и фактов идентификации напряженного состояния на плоских рамных стержневых элементах металлических конструкций.

Экспериментальная идентификация напряженного состояния элементов стержневых конструкций связана с обобщением полученных ранее результатов, а также с разработкой и решением следующих задач:

1. Макетирование и изготовление двух разновидностей моделей стержневых элементов в виде плоских цельновырезанных и сварных образцов.

2. Разработка и проверка алгоритма серийного тестирования и дискретного изменения возбуждения на созданных моделях элементов.

3. Термическая разгрузка моделей элементов.

4. Серийное тестирование и дискретное ударное возбуждение термически разгруженных моделей элементов.

5. Различение состояния исходно созданных и разгруженных моделей элементов по виду «напряженное — ненапряженное» на основании выполнения этапов 2, 4 и построения фурье-образов деформации.

Методические и экспериментальные средства исследования. Были проанализировали две разновидности моделей элементов стержневой конструкции: цельновырезанные и сварные элементы в форме одинаковых равносторонних треугольников размерами 4×8×245 мм, изготовленных из листовой стали (Ст10) электроискровым способом, по аналогии с составными элементами стержневой конструкции [15—17]. Модель первой разновидности была цельновырезанной. Три вырезанных одинаковых стержня с угловым от-

косом 30° сваривали электросваркой встык с образованием второй треугольной модели в виде сварного элемента конструкции. Известно, что после такого изготовления образцы находятся в напряженном состоянии [2, 4].

На основе обобщения полученных ранее результатов [15, 16] разработан алгоритм анализа и тестирования элементов конструкции, который включал следующие этапы:

реализацию серийного импульсного ударного возбуждения моделей конструкции (элементов) с линейным нарастанием импульса силы удара;

регистрацию и объединение временных зависимостей деформационных откликов с записью в отдельно выделенные серии с нарастанием импульса силы удара;

фурье-анализ каждой серии деформационных откликов в диапазоне частот 0,2—15000 Гц;

нормировку фурье-образа серии и выявление порога нелинейности деформационных откликов по силе ударного импульса;

выявление линейных и нелинейных областей фурье-образа серии деформационных откликов моделей элементов;

многократное (до пяти) повторение серий тестирования каждой модели без изменения условий эксперимента;

реализацию безусловных и (или) условных алгоритмов идентификации состояния модели в зависимости от анализа текущих результатов.

Тестирование и ударное возбуждение образцов выполняли на испытательной установке [15, 16], которая содержала устройство подвески модели элемента, ударное устройство, измерительно-информационный тракт, состоящий из сегнетоэлектрического датчика, зарядового усилителя и цифрового осциллографа типа ОЦЗС-02. Датчик приклеивали клеем К-400 посередине стороны каждой треугольной модели.

Для снятия напряженного состояния с образцов стержневых элементов применяли методику термической разгрузки, содержавшую следующие операции: укладку образцов в муфельную печь на полированное металлическое основание размерами 260×260 мм и толщиной не менее 8 мм, а при наличии двух аналогичных оснований — двухслойную укладку; разогрев печи со скоростью 50 °С/ч от нормальной (25 °С) до температуры T_{max} = 625 °С (длительность режима плавного разогрева 12 ч); выдержку печи при T_{max} = 625 °С в течение 1 ч; остывание печи со скоростью 50 °С/ч до нормальной температуры 25 °С (длительность режима плавного остывания 12 ч). Таким образом, общая длительность температурного испытания занимала 25 ч.

На основании обобщения результатов [15—17] и применения алгоритма серийного тестирования и дискретного изменения возбуждения был реализован следующий диагностический алгоритм различения напряженного и ненапряженного состояний созданных моделей элементов:

1. Выявление в фурье-образе деформационных откликов разгруженных элементов области монотонного возрастания спектра по импульсу удара (существование хотя бы одной линейной области).

2. По фурье-образу деформационных откликов исходных элементов установление наличия нелинейной области и по результатам п. 1 регистрация смещения по частоте максимума линейной области разгруженного элемента.

3. При положительном результате по п. 2 принятие решения о напряженном состоянии исходных элементов конструкции.

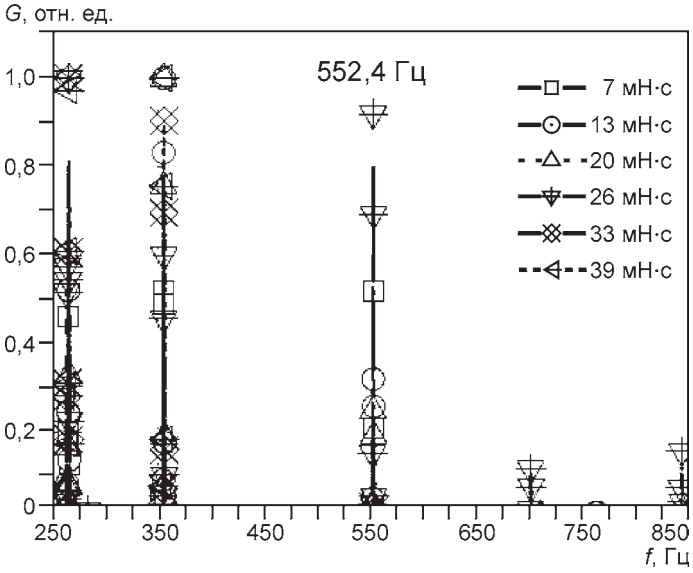

Рис. 1. Фурье-образ серии деформационных откликов исходной цельновырезанной треугольной модели

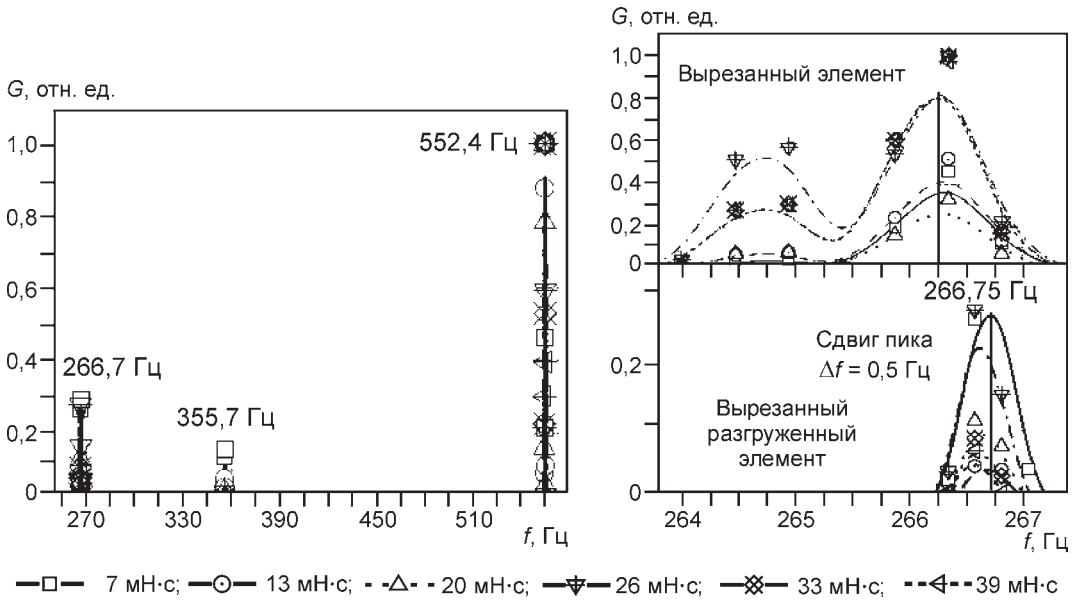

Рис. 2. Фурье-образ серии деформационных откликов цельновырезанной разгруженной треугольной модели

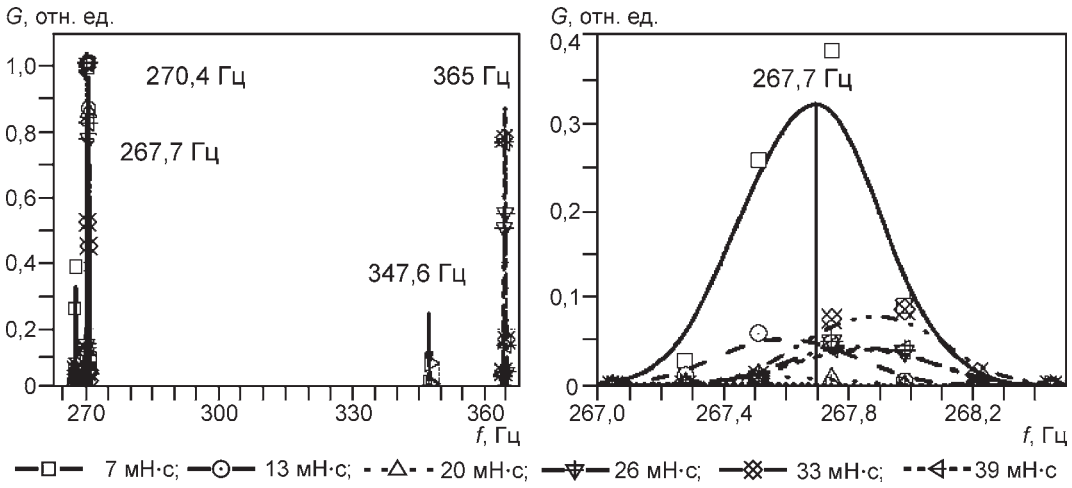

Рис. 3. Линейная область (слева) и нелинейная область (справа) фурье-образа серии деформационных откликов. Собственная частота сварной треугольной модели 347,6 Гц

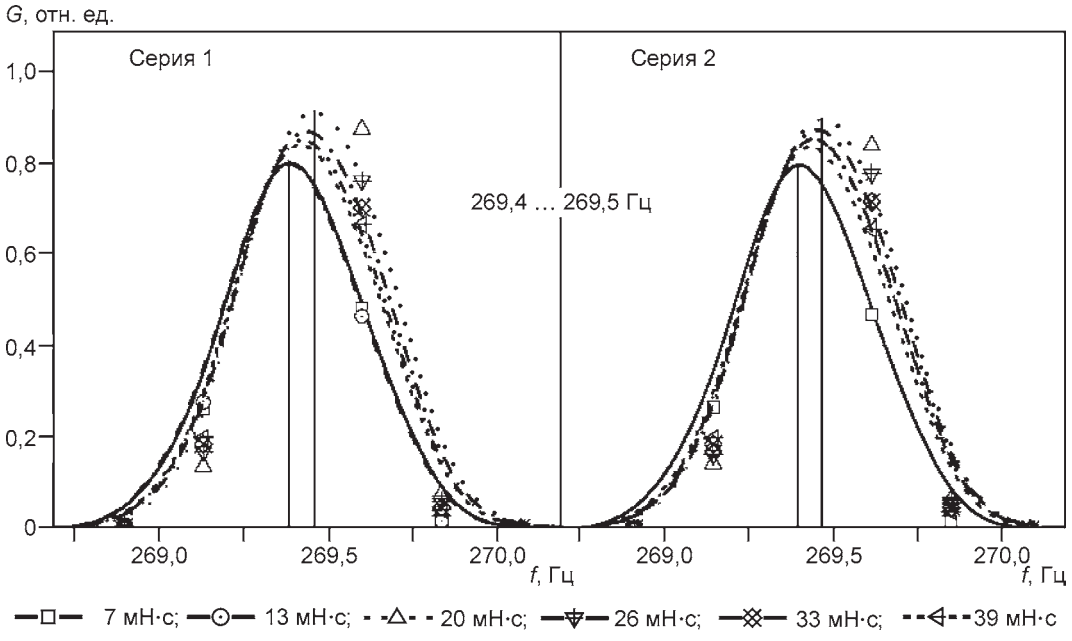

Рис. 4. «Вырождение» нелинейной и линейной фурье-областей серий деформационных откликов в одну линейную область при термической разгрузке сварной треугольной модели с «положительным» сдвигом пика линейной области относительно нелинейной (см. рис. 3) на 1,75 Гц (повторяемость эффекта демонстрируется на примере двух серий ударов)

Порядок проведения эксперимента и анализ его результатов. Треугольные модели двух точечно-сварных (вблизи двух верхних углов) конструкций вертикально подвешивали на кевларовых нитях. Серийные тестовые возбуждения проводили при помощи ударного устройства путем однократного удара стального шарика по нижнему углу треугольника с отклонением от вертикальной оси в интервале 5—30° с дискретностью 5°. При этом импульс силы, сообщаемый треугольной модели в каждой серии ударов, дискретно изменялся на 7; 13; 20; 26; 33; 39 мН · с («штатная» серия ударов). Временные зависимости деформационного возбуждения каждого треугольного элемента регистрировали с использованием измерительно-информационного тракта аналогично [15, 17]. Также применяли внешний режим синхронизации. Синхронно измеренная длительность удара на всем диапазоне воздействия находилась в пределах 0,2—0,4 мс. Вследствие неизбежного варьирования координат точки и длительности удара в системе «шар — модель» относительная погрешность импульса силы составила 10 %, что учитывалось в ходе последующей фурье-обработки и сравнительного анализа линейной и нелинейной областей деформационного отклика элементов.

Результаты серийного тестирования моделей элементов как в исходном, так и в разгруженном состоянии, а также полученные фурье-образы их деформационных откликов представлены на рис. 1—4 и в таблице. Фурье-образ серии деформационных откликов цельновырезанной треугольной модели (см. рис. 1 и таблицу) в диапазоне частот 250—600 Гц характеризовался тремя линейными областями с частотами пиков 266,3; 355,5 и 552,4 Гц и одной нелинейной областью в диапазоне частот 264—267,2 Гц. При термической разгрузке вырезанной модели (см. рис. 2, слева) наблюдались неравномерный сдвиг частот пиков линейных областей соответственно на 1,4; 0,3 и 1,8 Гц, что также отражено во второй строке таблицы, и «вырождение» нелинейной области (см. рис. 2, справа внизу). Следует также отметить полученное совпадение с относительной погрешностью менее 1 % зарегистрированной и расчетной частот пика первой линейной области и очевидное отсутствие расчетных данных по нелинейной области.

Анализ фурье-образов серии деформационных откликов сварной треугольной модели в диапазоне частот 250—600 Гц позволил выявить одну нелинейную (в диапазоне 267—268,5 Гц) и две линейные области с частотами пиков 270,4 и 365 Гц (см. рис. 3). Как для первого вида модели, наблюдался сдвиг пиков линейной области на 1 и 0,5 Гц. По аналогии с [16, 17] путем регистрации и фурье-обработки естественных колебаний модели (без импульса возбуждения) в этом диапазоне частот также получена одна из собственных частот модели 347,6 Гц (см. рис. 3, слева). Кроме того, было установлено, что частоты пиков линейных и нелинейной областей вырезанного и сварного элементов в исходном состоянии

Выявленные при ударном тестировании треугольных моделей их области фурье-образов деформационных откликов, а также частоты пиков и их сдвиги в линейных областях

Модель	Частота пика (ее сдвиг), Гц			
	нелинейная область	линейные области		
Вырезанный треугольник	264,7	266,3	355,5	552,4
Вырезанный разгруженный треугольник	—	267,7 (1,4)	355,8 (0,3)	554,2 (1,8)
Вырезанный треугольник	—	268,29*	368,14*	—
Сварной треугольник	267,7	270,4	365	—
Сварной разгруженный треугольник	—	269,4 (1,0)	364,5 (0,5)	—

* Расчет выполнен А. В. Черпаковым.

различаются соответственно на 3,9; 9,5 и 3 Гц (см. колонки 3 и 4 таблицы). В отличие от нелинейной области, фурье-образы серий деформационных откликов в линейной области совпадали с относительной погрешностью не более 0,3 % (см. рис. 4).

Таким образом, как и при серийном ударном тестировании сварной семипролетной стержневой модели конструкции, при тестировании треугольных моделей получены линейные и нелинейная области фурье-образов деформационных откликов. После снятия напряженного состояния с треугольных моделей способом термической разгрузки в фурье-образах их деформационных откликов наблюдались только линейные области со сдвигом частоты пика до 1,8 Гц. Следовательно, установлено, что наличие нелинейной области в фурье-образе серийных деформационных откликов является одним из признаков нахождения конструкции и (или) элемента в напряженном состоянии. Кроме того, экспериментально подтверждено предположение [16, 17], что одной из причин происхождения области нелинейности в сложной конструкции является ее напряженное состояние, сформированное в процессе изготовления.

Выводы. На примере двух разновидностей моделей стержневых элементов в виде плоских цельновырезанных и сварных образцов с привлечением разработанных алгоритмов построены фурье-образы серийных деформационных откликов исходной и разгруженной моделей. На основании нелинейной и линейных областей этих фурье-образов экспериментально обоснован качественный и количественный признаки нахождения конструкции и (или) элемента в напряженном состоянии по присутствию в фурье-образе серийных деформационных откликов хотя бы одной нелинейной области и сдвигу пика линейных областей фурье-образа. Полученные результаты могут применяться для диагностики напряженных или поврежденных элементов стержневых конструкций.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 09-08-00437а), а также в рамках ФЦП (проект 2010-1.3.1-222-007).

Литература

1. **Неразрушающий** контроль и диагностика: в 7 т / Под общей ред. В. В. Клюева. Т. 1, 2. Балицкий Ф. Я. и др. Вибродиагностика. М.: Машиностроение, 2005.

2. **Махутов Н. А.** Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: в 2 ч. Новосибирск: Наука, 2005.

3. **Farrar Ch. R. e. a.** Nonlinear System Identification for Damage Detection // Los Alamos National Lab. Report LA-14353. Approved for public release, distribution is unlimited. Under Contract DE-AC52-06NA25396. Nov. 2007.

4. **Проблемы** прикладной механики, динамики и прочности машин: Сб. статей / Под ред. В. А. Светлицкого, О. С. Нарайкина. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005.

5. **Adams D., Nataraju M.** A nonlinear dynamical systems framework for structural diagnosis and prognosis // Intern. J. Eng. Sci. 2002. V. 40. P. 1919—1941.

6. **Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Муравьев В. В.** Акустико-эмиссионная диагностика конструкций. М.: Радио и связь, 2000.

7. **Adams D. E., Farrar Ch. R.** Classifying Linear and Nonlinear Structural Damage Using Frequency Domain ARX Models // Structural Health Monitoring. 2002. V. 1. N 2. P. 185—201.

8. **Воронков В. Н.** Метод решения задач на собственные значения для сложных линейных систем // Механика твердого тела. 2005. № 4. С. 178—187.

9. **Ватульян А. О., Соловьев А. Н.** Об идентификации предварительного напряженного состояния // Динамика технологических систем: Труды VIII Междунар. конф. Ростов-на-Дону, 2007. С. 19—25.

10. **Грудев И. Д.** Устойчивость стержневых элементов в составе стальных конструкций. Монография. М.: Изд-во «МИК», 2005.

11. **Голованов А. И.** Конечно-элементное моделирование больших упругопластических деформаций в терминах главных удлинений // Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела: Труды Второй междунар. конф. Казань, 2009. С. 125—127.

12. **Лебедев В. Л., Семенов В. А., Солдатов А. Ю.** Анализ устойчивости стержневых конструкций с учетом физической нелинейности // Там же. С. 247—248.

13. **Sedmak S. e. a.** An Experimental Verification Of Numerical Models For The Fracture And Fatigue Of Welded Structures // Materials and Technology. 2007. V. 41. N 4. P. 173—178.

14. **Есипов Ю. В., Мухортов В. М., Калинчук В. В.** Мониторинг напряженного состояния стержневых конструкций с использованием сегнетоэлектрических наноразмерных датчиков // Труды Ин-та механики сплошных сред УрО РАН. Пермь, 2008. Т. 34. С. 31.

15. **Есипов Ю. В., Мухортов В. М.** Интегральные датчики динамической деформации на основе тонких сегнетоэлектрических пленок для мониторинга сложных механических систем // ЖТФ. 2009. Т. 51. № 1. С. 78—81.

16. **Есипов Ю. В., Мухортов В. М., Калинчук В. В.** Испытательная установка для анализа деформации моделей трехмерных конструкций // Измерительная техника. 2008. № 10. С. 15—24; **Esipov Yu. V., Mukhortov V. M., Kalinchuk V. V.** Test equipment for analyzing the deformation of models of three-dimensional structures // Measurement Techniques. 2008. N 10. V. 51. P. 1104—1109.

17. **Есипов Ю. В.** Испытательная установка для исследования деформационных колебаний моделей конструкций способом бесконтактного возбуждения // Измерительная техника. 2009. № 12. С. 44—48; **Esipov Yu. V.** Test plant for the analysis of deformation vibrations of models of structures by means of a method of contactless excitation // Measurement Techniques. 2009. N 12. V. 52. P. 1313—1318.

Дата принятия 27.07.2010 г.