

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ СБОРНОЙ ДЮРАЛЮМИНИЕВОЙ КОНСТРУКЦИИ С РЕЗЬБОВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

Куц М.С., Андриенко Л.А., Городинов В.Д.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

Ключевые слова: нелинейная динамика, демпфирование, неподвижные соединения, анализ сингулярного спектра, преобразование Гильберта, вибрации.

Аннотация. Резьбовые соединения имеют широкое распространение в машиностроении. Ввиду сложной внутренней механики, соединения существенным образом способны влиять на динамику конструкции. Хотя точная механика явлений в контактном слое соединения окончательно неясна, существует работы, дающие феноменологическое описание динамических свойств соединений деталей, выполненных из сталей. Однако, существует мало работ посвященных исследованию неподвижных соединений, выполненных из легких сплавов. Статья посвящена исследованию нелинейной динамики сборных образцов, выполненных из дюралюминия. В работе исследовались свободные затухающие колебания образцов конструкции с болтовыми соединениями. По полученным сигналам виброускорений были построены зависимости демпфирования и мгновенной частоты от амплитуды колебаний путем применения преобразования Гильберта. Разделение сигнала на отдельные моды осуществлялось при помощи анализа сингулярного спектра. Полученные зависимости по характеру схожи с амплитудными зависимостями для болтовых соединений деталей из конструкционной стали, однако декремент затухания больше более чем в 2,5 раза.

OBSERVATION OF NONLINEAR DYNAMICS OF ASSEMBLED STRUCTURE OF DURALUMIN WITH BOLTED JOINTS

Kuts M.S., Andrienko L.A., Gorodinov V.D.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Keywords: nonlinear dynamics, damping, fixed connections, singular spectrum analysis, Hilbert transform, vibrations.

Abstract. Bolted joints are widely used in mechanical engineering. Due to the complex internal mechanics, joint can significantly affect the dynamics of the structure. Although the exact mechanics of the phenomena in the contact layer of the joint is completely unclear, there are works that give a phenomenological description of the dynamic properties of the joints of parts made of steels. However, there are few works devoted to the study of fixed joints made of light alloys. The article is devoted to the study of the nonlinear dynamics of composite samples made of duralumin. The study was made by investigation of free damped oscillations of the test rig. Dependences of damping and instantaneous frequency on the amplitude of vibrations were constructed based on the received signals of vibration accelerations by applying the Hilbert transform. The separation of the signal into separate modes was carried out using the analysis of the singular spectrum. The obtained dependences are similar in nature to the amplitude dependences for bolted joints of structural steel parts; however, the damping decrement is more than 2.5 times greater.

Введение

Изучение динамики любой конструкций имеет большое значение для оценки ее эксплуатационных характеристик. Реальные конструкции состоят из большого количества деталей, соединенных между собой посредством различных подвижных и неподвижных соединений. Соединения деталей зачастую обладают довольно сложной внутренней механикой, что объясняется нелинейной характеристикой деформирования контактного слоя соединения, наличием микропроскальзываний, и как следствие, существенным нелинейным демпфированием.

В современной технике наблюдается тенденция к уменьшению массы конструкций путем уменьшения металлоемкости и использования более легких материалов, и в то же время все чаще оборудование эксплуатируется на предельных режимах для обеспечения максимальной производительности. Снижение металлоемкости и ужесточение эксплуатационных режимов приводит к увеличению деформаций в процессе работы, что

может привести к отказам. Поэтому критическое значение имеет корректное представление механики процессов, происходящих в контактном слое соединения, особенно на этапе проектирования изделий для моделирования поведения конструкции во время его эксплуатации. В то же время, существующие работы зачастую посвящены исследованию соединений деталей, выполненных из сталей и довольно мало работ посвящены исследованию соединений деталей из легких сплавов.

Целью данной работы является исследование свойств болтового соединения, образованного деталями из Д16Т. Кроме того, в работе представлен подход по анализу нелинейной динамики, основанный на сочетании гильбертова анализа и анализа сингулярного спектра. Особенностью данного подхода является то, что амплитудные зависимости демпфирования и мгновенной частоты могут быть получены из сигнала с одного единственного датчика, что является важным в условиях ограниченных измерений.

Описание экспериментальной установки

Исследование влияния соединений на динамику сборной конструкции осуществлялось на экспериментальном образце, представляющем собой две С-образных балки, выполненных из сплава Д16Т, скрученных по краям при помощи двух болтов М8. Момент закручивания болтов контролировался при помощи динамометрического ключа и составлял 20Нм, для обеспечения силы затяжки ~17500Н. Схема установки представлена на рисунке 1. Данные образцы были специально разработаны для исследования влияния болтовых соединений на динамику сборных конструкций [1, 2] и являются одной из рекомендуемых тестовых конструкций для исследования динамики соединений [3]. Особенностью данной конструкции является то, что она имеет две явно выраженные контактные площадки, что позволяет легко определить предварительное условие нагружения в контакте расчетным [4] или экспериментальным путем [2]. Кроме того, собственные частоты данной конструкции, соответствующие её первым изгибным формам (рис. 2), имеют близкие значения (~305 Гц и ~365 Гц), что необходимо для исследования эффектов модального связывания и объединения форм.

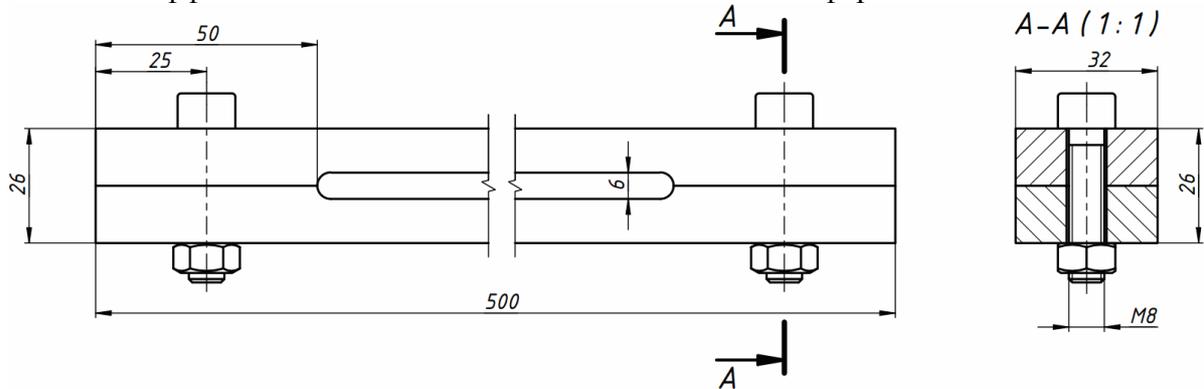


Рис. 1. Схема экспериментального образца используемого в исследовании

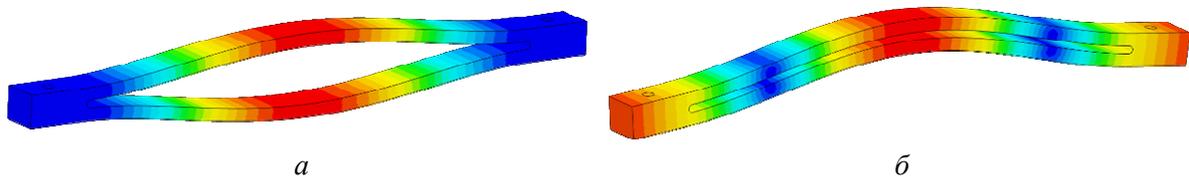


Рис. 2. Первая (а) и вторая (б) изгибные формы экспериментального образца

В данной работе, для обеспечения свободного закрепления, экспериментальный образец подвешивался на двух нитях, таким образом, чтобы плоскость стыка располагалась вертикально (рис. 3). Возбуждение вибраций осуществлялось при помощи динамометрического ударного молотка KISTLER 9724A5000, измерение вибраций – при помощи акселерометров KISTLER 8614A500M1 с чувствительностью 3,83 мВ/г. Для сравнения так же был изготовлен образец без соединений, выполненный из цельной заготовки, который выступал в качестве референсного образца.

Методы обработки динамических сигналов

Гильбертов анализ

Один из наиболее распространенных методов исследования нелинейных свойств системы по свободным затухающим колебаниям является анализ на основе преобразования Гильберта. Первоначально метод преобразования Гильберта был предложен в [5] и позже получил развитие в работах [6, 7]. Согласно данному методу, полный аналитический сигнал $z(t)$ может быть получен в виде суммы исходного измеренного сигнала $x(t)$ и его Гильбертова преобразования $\tilde{x}(t)$, вычисляемого как

$$H(x(t)) = \tilde{x}(t) = \frac{1}{\pi t} * x(t) = p.v. \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau.$$

где *p.v.* означает, что данный интеграл вычисляется в контексте главных значений Коши. Полный аналитический сигнал $z(t)$ тогда будет выглядеть как

$$z(t) = x(t) + i\tilde{x}(t) = a(t)e^{i\psi(t)},$$

где $a(t)$ – мгновенная амплитуда (или огибающая), $\psi(t)$ – мгновенная фаза сигнала. Предполагая, что нелинейность системы невелика, модальное демпфирование ζ и мгновенная частота f могут быть вычислены из следующих выражений:

$$\zeta(t) = -\frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \frac{2\pi}{f(t)}, \quad (1)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \dot{\psi}(t). \quad (2)$$

В данной работе для вычисления преобразования Гильберта был использован пакет Hilbert.jl [8], а производные в (1) и (2) были рассчитаны с использованием конечноразностной схемы 4 порядка точности. Поскольку данный метод пригоден для анализа систем с 1 степенью свободы, необходимо разделить исходный сигнал на отдельные моды. Описание используемого в данной работе метода модальной декомпозиции дано в следующем подразделе.

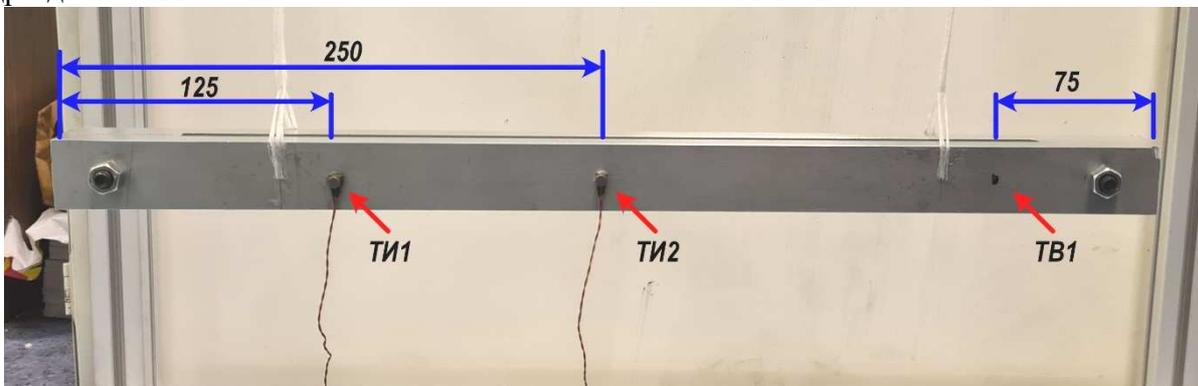


Рис. 3. Фотография закрепленного образца: ТИ – место расположения акселерометра; ТВ – место удара динамометрическим молотком

Разложение сигнала по модам

Для разложения сигнала по модам в данной работе использовался метод «Гусеница» [9] или анализ сингулярного спектра (Singular Spectrum Analysis, SSA) позволяющий получить физические моды сигнала, путем сингулярного разложения автокорреляционной матрицы сигнала, в результате чего, при правильном подборе параметров, возможно получить разложение сигнала на физические моды, при довольно ограниченной информации.

Теория данного метода основана на разложении Карунена-Лоэва и методе главных компонент. Впервые данный метод был предложен в работах [10, 11]. Данная методика состоит из 4 шагов:

- 1) вложение;
- 2) сингулярное разложение (SVD);

- 3) группировка;
- 4) диагональное усреднение.

В результате применения данного метода исходный сигнал разбивается на сингулярные моды, отсортированные в порядке убывания ковариации с исходным сигналом. Подробности данного метода хорошо изложены в работах Голяндиной Н.Э. [9, 12].

Результаты экспериментального исследования

Полученные кривые для 1-й моды представлены на рисунке 4. Испытания проводились при различной величине удара – 65 Н и 160Н.

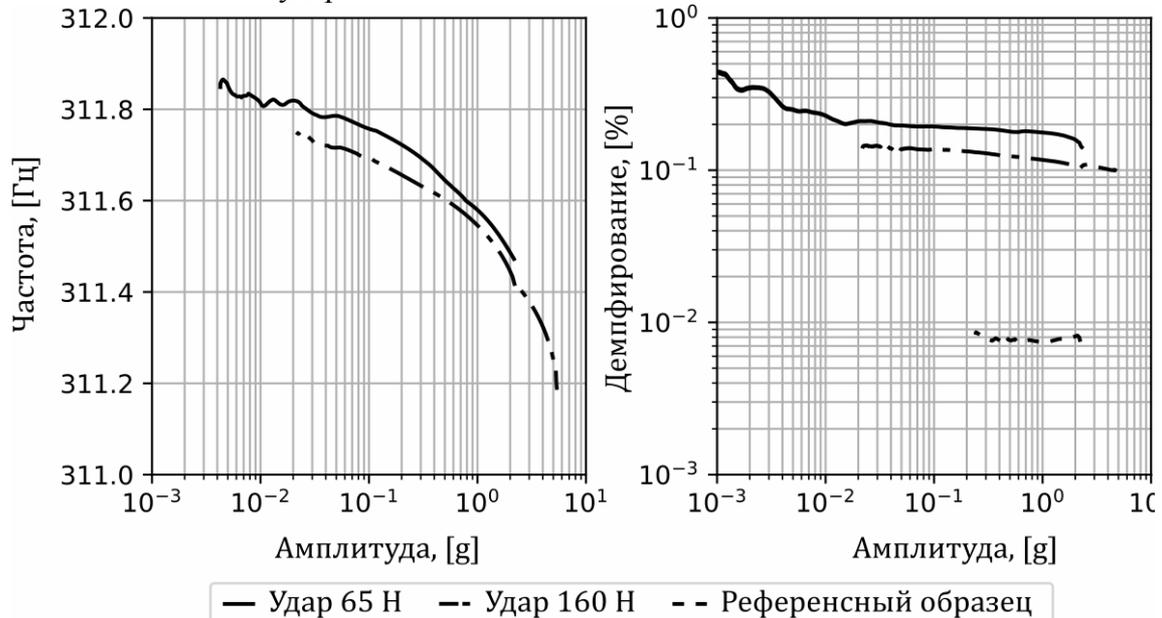


Рис. 4. Зависимость демпфирования и мгновенной частоты от амплитуды колебаний для 1-й моды колебаний

Так же на графике демпфирования отмечена кривая, соответствующая демпфированию референсного образца. Как видно, демпфирование составной балки выше примерно в 20 раз (~0,2% и 0,008% соответственно). Частота колебаний с ростом амплитуда уменьшается, что характерно для мягких систем. При этом, согласно [2], для образцов, выполненных из стали, на первой частоте наблюдается рост частоты колебаний при увеличении амплитуды. Демпфирование при росте амплитуды колебаний несколько уменьшается, при этом значение демпфирования примерно соответствует значениям, полученных в [2] для стальных образцов. Частота колебаний референсного образца составила 306 Гц во всем диапазоне колебаний.

Заключение

В данной работе исследованы свойства болтового соединения, образованного деталями из Д16Т. Определение амплитудных зависимостей демпфирования и мгновенной частоты осуществлено при помощи преобразования Гильберта с предварительным разделением сигнала на отдельные моды при помощи метода SSA. Характер зависимости демпфирования от амплитуды колебаний схож с характером аналогичных для соединения стальных деталей и находится в одном диапазоне значений. Зависимость частоты от амплитуды напротив уменьшается при увеличении амплитуды колебаний, в отличие от образцов из стали. По сравнению с референсным сплошным образцом, величина демпфирования оказалась более чем в 20 раз больше, что обусловлено в основном микропроскальзываниями в контактном слое. Частота свободных колебаний оказалась больше на ~2%, однако это так же может быть обусловлено наличием дополнительной массы в виде болтов. Метод SSA-НТ показал свою эффективность для анализа нелинейной динамики в случае ограниченной информативности измерений.

Список литературы / References

1. Singh A., Scapolan M., Saito Y., Allen M.S., Roettgen D., Pacini B., Kuether R.J. Experimental characterization of a new benchmark structure for prediction of damping nonlinearity // Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. – Springer Science and Business Media, LLC, 2019. – Vol. 1. – P. 57-78.
2. Wall M., Allen M.S., Kuether R.J. Observations of modal coupling due to bolted joints in an experimental benchmark structure // Mech Syst Signal Process. Elsevier Ltd. 2022, vol. 162, no. December 2020, p. 107968.
3. Brake M.R.W. The Mechanics of Jointed Structures: Recent Research and Open Challenges for Developing Predictive Models for Structural Dynamics // The Mechanics of Jointed Structures: Recent Research and Open Challenges for Developing Predictive Models for Structural Dynamics. 2017. 702 p.
4. Куц М.С. Распределение давления в окрестности затянутого одноболтового соединения // Известия вузов. Машиностроение. – 2019. – №1. – С. 3-11. – DOI: 10.18698/0536-1044-2019-1-3-11.
 9. Kuts M.S. Pressure Distribution in the Area Around a Tightened Single Bolt Joint // News of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering. 2019, no. 1, pp. 3-11. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-1-3-11.
5. Feldman M. Non-linear system vibration analysis using Hilbert transform--I. Free vibration analysis method "Freevib" // Mechanical Systems and Signal Processing. 1994, vol. 8, no 2, pp. 119-127.
6. Sumali H., Kellogg R. A. Calculating Damping From Ring-Down Using Hilbert Transform and Curve Fitting // 4th International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC). – Istanbul, 2011. – P. 325-332.
7. Deaner B.J., Allen M.S., Starr M.J, Segalman D.J., Sumali H. Application of viscous and Iwan modal damping models to experimental measurements from bolted structures // Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME. 2015, vol. 137, no. 2, pp. 1-12.
8. GitHub - fpreiswerk/Hilbert.jl: Julia implementation of the discrete analytic signal, computed using the Hilbert transform. [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/fpreiswerk/Hilbert.jl>.
9. Голяндина Н.Э. Метод Гусеница-SSA: анализ временных рядов: Учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ, 2004. – 76 с.
 9. Golyandina N.E. Caterpillar-SSA method: time series analysis: Textbook. – SPb.: Saint-Petersburg State University, 2004. – 76 p.
10. Fraedrich K. Estimating the Dimensions of Weather and Climate Attractors // J Atmos Sci. 1986, vol. 43, no. 5, p. 419-432.
11. Broomhead D.S., King G.P. Extracting qualitative dynamics from experimental data // Physica D. North-Holland. 1986, vol. 20, no. 2-3, pp. 217-236.
12. Golyandina N., Zhigljavsky A. Singular spectrum analysis for time series // Geophysical Research Letters. 2nd ed. Springer, 2020. Vol. 28, no. 16. 156 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Куц Михаил Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин	Kuts Mikhail Sergeevich – candidate of engineering science, associate professor of Department of fundamentals of machine design
Андрienко Людмила Анатольевна – доктор технических наук, профессор кафедры основ конструирования машин	Andrienko Ludmila Anatol'evna – doctor of engineering science, professor of Department of fundamentals of machine design
Городинов Владимир Дмитриевич – студент	Gorodinov Valdimir Dmitrievich – student
kuts@bmstu.ru	

Получена 30.11.2022