

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ НА ЕЁ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПРИ СЛУЧАЙНОМ НАГРУЖЕНИИ

К.А. Хорошевский¹, А.В. Ерпалов¹, И.В. Гадолина²

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

² Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

E-mail: khoroshevskiika@susu.ru

Аннотация. В ходе эксплуатации изделия машиностроения чаще всего подвержены динамическому воздействию, представляющему собой случайное разночастотное нагружение. Для корректного анализа долговечности конструкций, функционирующих при таком нагружении, необходимо учитывать их динамические характеристики (собственные частоты и формы колебаний, демпфирование и др.).

Выполнено исследование влияния коэффициента демпфирования на долговечность конструктивно подобного образца при расчёте частотными методами, а именно методом для узкополосного процесса и методом Дирлика. Для этого разработана расчётная схема на основе конечно-элементной модели для определения спектральной плотности напряжений, экспериментальным путём определён диапазон изменения коэффициента демпфирования, рассчитана долговечность. Выполнен анализ влияния демпфирования на расчётную долговечность разными методами. Проведена экспериментальная верификация выполненных расчётных исследований.

Ключевые слова: усталостная долговечность; частотные методы; коэффициент демпфирования; спектральная плотность мощности.

*Восьмидесятилетию юбилею
ЮУрГУ посвящается*

Введение

На сегодняшний день исследование явления усталости остаётся актуальной задачей, поскольку выход из строя изделий машиностроения чаще всего происходит из-за усталостного разрушения. При этом эксплуатационное воздействие носит случайный характер, в связи с чем оценка долговечности при таком нагружении представляет наибольший интерес. За последние годы количество публикаций, посвящённых этой проблеме, увеличилось в несколько раз. Существует два подхода к оценке долговечности при случайном нагружении [1]. Первым является оценка во временной области, суть которого заключается в анализе всей истории нагружения, схематизации случайного эксплуатационного воздействия и дальнейшей оценке накопленных повреждений. Наибольшее распространение получил метод «падающего дождя», впервые описанный в [2]. Ко второму подходу относятся различные частотные методы. Общей идеей таких методов является использование спектральных характеристик случайного процесса для оценки усталостной долговечности. Основным применением частотных методов является оценка долговечности на стадии проектирования, когда неизвестна история нагружения.

Исследователи не достигли консенсуса в том, какой из подходов к оценке долговечности является наилучшим. В последнее время появляются работы [1, 3, 4], в которых проводится сравнительный обзор существующих методов временной и частотной областей. При этом авторы работ акцентируют внимание на том, что временные подходы оценивают долговечность по напряжениям, деформациям и энергетическим критериям, в том числе в вероятностной постановке. Частотные подходы оценивают долговечность только по напряжениям, не учитывая вероятность разрушения.

Применение частотных методов ограничивается только стационарными процессами, в то время как в реальной эксплуатации преобладают нестационарные воздействия (статистические характеристики процесса изменяются во времени). В связи с этим исследователи разрабатывают

новые подходы, учитывающие нестационарность процессов. В работе [5] авторы предлагают метод для анализа нестационарного процесса, скомбинированного из нескольких стационарных. В работах [6, 7] описывается применение плотностей распределения напряжений для оценки долговечности. Также предпринимались попытки совместить временные и частотные подходы [8]. Однако существующие работы рассматривают только определённые типы нестационарных процессов.

Оценка усталостной долговечности характеризуется большими разбросами, поэтому важным аспектом является экспериментальная верификация разработанных методов. Этой проблеме уделено большое количество работ [9–17]. Одной из проблем, вызывающей расхождение расчётных и экспериментальных результатов, является некорректный учёт динамических характеристик изделия: частотная стабильность материала [18] и демпфирующие свойства изделия. В работе [19] на примере ветряного генератора авторы показывают, что долговечность может увеличиться до 67 % при увеличении демпфирования системы. Среди приведенных выше работ только в [11, 15–17] учитывалось демпфирование при проведении эксперимента.

Целью данной работы является исследование влияния демпфирования на расчётную оценку долговечности при применении разных частотных методов с последующей верификацией экспериментом. В первом разделе даётся информация об использованных в работе методах оценки долговечности. Второй раздел посвящён описанию конечно-элементной модели и численной оценке долговечности. В третьем разделе выполнена экспериментальная верификация расчётных исследований.

Использованные методы

Оценка долговечности спектральными методами выполняется на основе статистических характеристик процесса, а именно спектральной плотности мощности (СПМ). СПМ показывает, как энергия распределяется между частотами и является наиболее полным способом описания случайного стационарного процесса. В частотной и временной областях случайный процесс представляется по-разному, связь между этими подходами может быть выражена через спектральные моменты. Спектральные моменты n -го порядка определяются по формуле

$$\lambda_n = \int_0^{\infty} \omega^n G(\omega) d\omega, \quad (1)$$

где ω – угловая частота в рад/с, $G(\omega)$ – СПМ сигнала.

Более подробное описание спектральных моментов с точки зрения долговечности приведено в работе [1]. С их помощью можно выразить основные характеристики процесса: частоту пересечения среднего уровня (v_0) и частоту появления пиков (v_p).

$$v_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_0}}, v_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda_4}{\lambda_2}}. \quad (2)$$

Отношение между двумя этими параметрами называется коэффициентом нерегулярности (γ), который характеризует широкополосность процесса

$$\gamma = \frac{v_0}{v_p} = \frac{\lambda_2}{\sqrt{\lambda_0 \lambda_4}}. \quad (3)$$

Для узкополосных процессов коэффициент нерегулярности равен единице, тогда как для широкополосных процессов он стремится к нулю.

В работе долговечность будет оцениваться двумя методами: Narrow band approximation [20], далее в статье называется «метод для узкополосного процесса», и методом Дирлика [21].

Метод для узкополосных процессов базируется на допущении, что в случайных процессах каждый пик соответствует одному циклу. Тогда амплитуды процесса распределены по закону Рэлея и суммарные накопленные повреждения определяются по зависимости [22]:

$$D_{NB} = v_0 C^{-1} \left(\sqrt{2\lambda_0} \right)^k \Gamma \left(1 + \frac{k}{2} \right), \quad (4)$$

где C и k – постоянные величины кривой усталости материала ($N = \sigma^{-k} C$), Γ – гамма функция, λ_0 – спектральный момент нулевого порядка.

Метод Дирлика основан на взвешенной сумме распределений Рэлея, Гаусса и экспоненциального. В настоящее время является наиболее распространённым методом оценки в частотной области. Повреждение за время T действия случайной нагрузки рассчитывается по зависимости:

$$D_{DK} = \frac{\nu_p T}{C} (\sqrt{\lambda_0})^k \left[D_1 Q^k \Gamma(1+k) + (\sqrt{2})^k \Gamma\left(1 + \frac{k}{2}\right) (D_2 |R|^k + D_3) \right], \quad (5)$$

где $Z = s/\sigma_X$ – нормированная амплитуда,

$$x_m = \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_4} \right)^{1/2}, \quad D_1 = \frac{2(x_m - \gamma^2)}{1 + \alpha_2^2}, \quad D_2 = \frac{1 - \gamma - D_1 + D_1^2}{1 - R}, \quad D_3 = 1 - D_1 - D_2,$$

$$Q = \frac{1,25(\gamma - D_3 - D_2 R)}{D_1}, \quad R = \frac{\gamma - x_m - D_1^2}{1 - \gamma - D_1 + D_1^2},$$

$\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – спектральные моменты $n = 0, 1, 2$ и 4 порядков соответственно, α_2 – параметр ширины спектра.

Численная оценка долговечности конструктивно подобного образца из сплава МА-15 при воздействии случайной вибрации

Описание объекта исследования

В качестве объекта исследований выбран конструктивно подобный образец, представляющий собой стандартный плоский образец с галтелью III типа [23], изготовленный из магниевого сплава МА-15, применяемого в авиационной промышленности в конструкциях, требующих повышенного предела текучести при сжатии (модуль упругости $E = 4,2 \times 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,035$, плотность $\rho = 1850$ кг/м³), с грузом массой 47,6 г, установленным на свободной стороне образца для снижения собственной частоты колебаний. Эскиз образца с размерами приведён на рис. 1, а.

Кривая усталости задана зависимостью $N = s^{6,7} \times 10^{18,95}$, где s – это уровень напряжений.

Динамические испытания проводились при консольном изгибе. Для реализации такого нагружения образец с одной стороны жестко крепился к вибростолу, с другой стороны образец был свободно вывешен вместе с грузом (рис. 1, б).

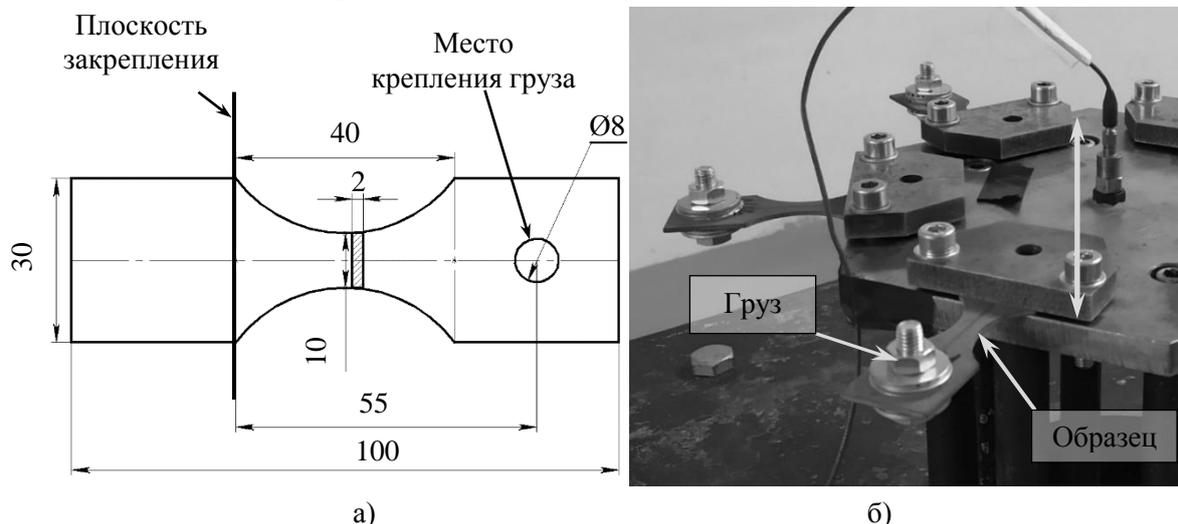


Рис. 1. Эскиз образца с размерами (а) и установленные образцы на испытательном стенде (б)

Расчёт спектральной плотности напряжений

Первый этап исследования – это построение конечно-элементной модели образца с последующим проведением численного модального анализа и определением напряжений, развиваемых на поверхности образца при случайном нагружении. Структурная схема численного расчёта долговечности представлена на рис. 2.

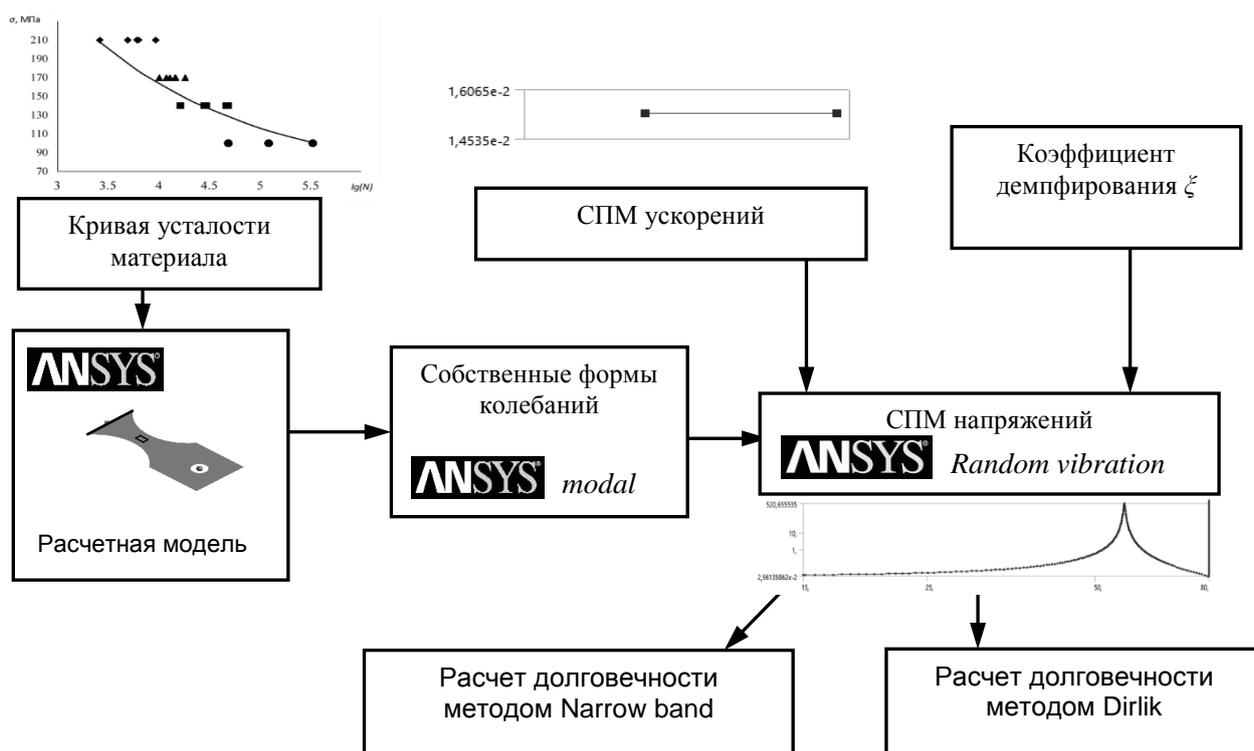


Рис. 2. Структурная схема расчёта долговечности при случайном нагружении

Конечно-элементная сетка и численный модальный анализ реализованы в программном пакете ANSYS. Использовались оболочечные элементы, размер элемента 0,5 мм, в модели 6 270 узлов и 6 051 элемент.

По результатам модального анализа первая изгибная собственная форма колебаний идентифицирована на частоте 57 Гц. С целью проявления этой формы колебания и принимая во внимание ограничения оборудования, выбран частотный диапазон случайной вибрации от 15 до 80 Гц.

Для оценки долговечности спектральными методами необходимо знать спектральную плотность напряжений, развиваемых в наиболее нагруженной точке образца. Она построена с помощью модуля ANSYS Random Vibration. Входным воздействием является случайная вибрация с постоянным уровнем дисперсии виброускорений («белый» шум), направленная вдоль вертикальной оси стенда (см. рис. 1). Случайная вибрация задана спектральной плотностью виброускорений, характерный вид которой показан на рис. 3.

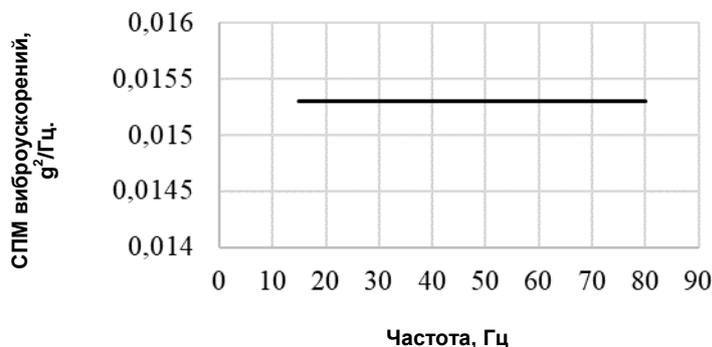


Рис. 3. Спектральная плотность виброускорений для уровня 0,0153 $g^2/Гц$

Исследовались три расчётных случая с дисперсией на уровнях: 0,01245 $g^2/Гц$, 0,0153 $g^2/Гц$ и 0,018 $g^2/Гц$. Картина распределения эквивалентных напряжений для 0,018 $g^2/Гц$ в образце показана на рис. 4, а. Для остальных случаев картина похожа.

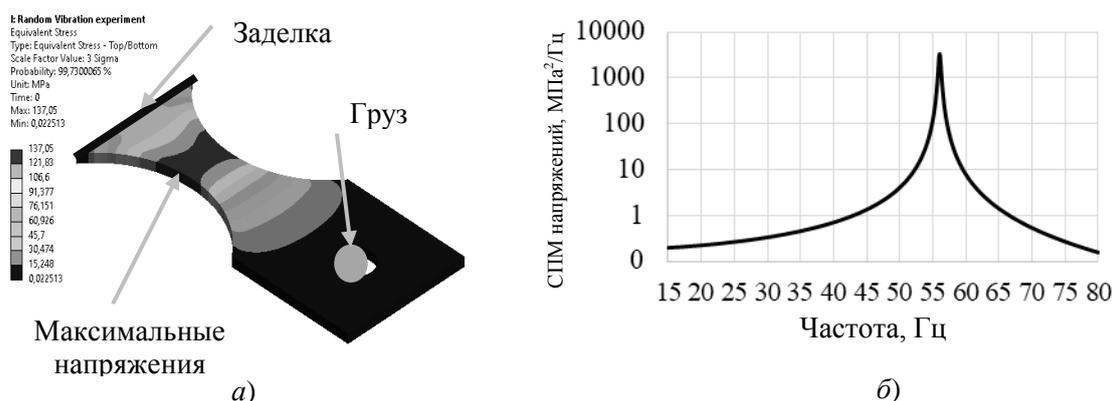


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений с вероятностью 99 % в образце при случайных колебаниях (расчётный случай – 0,018 g²/Гц) (а). Спектральная плотность напряжений в наиболее нагруженной точке (б)

Для наиболее нагруженной точки образца средствами программного комплекса ANSYS рассчитана спектральная плотность напряжений. Характерный вид спектральной плотности напряжений показан на рис. 4, б (ось ординат в логарифмическом масштабе).

Определение коэффициента демпфирования

Одной из основных динамических характеристик конструкции является коэффициент демпфирования, который характеризует способность конструкции поглощать энергию колебаний. При вибрационном воздействии перемещения конструкции зависят от величины коэффициента демпфирования. При его низких значениях перемещения будут большими, что, в свою очередь, вызовет высокие напряжения в конструкции [15]. Особенно важным это свойство является при резонансе, когда амплитуды перемещений увеличиваются в несколько раз. Коэффициент демпфирования определяется только экспериментальным путём. Поэтому для уточнения конечно-элементной модели проведено экспериментальное исследование демпфирующих свойств конструктивно подобного образца. Определение коэффициента демпфирования осуществлялось по затухающим колебаниям согласно методике, описанной в [24]. Образец обладает малой массой, поэтому для исключения искажения динамических характеристик, вызванных установкой дополнительных датчиков, применялся бесконтактный способ регистрации вибрации с помощью лазерного виброметра компании *Polytec*. Виброметр устанавливался таким образом, чтобы лазерный луч располагался перпендикулярно образцу (рис. 6, б). Затухающие колебания возбуждались с помощью модального молотка. Экспериментальная установка и характерная виброграмма затухающих колебаний показана на рис. 6, а.

Для анализа вводится допущение, что рассматриваемая система обладает линейным вязким демпфированием. Тогда через максимумы виброграммы затухающих колебаний можно провести огибающую, которая описывается экспоненциальным законом Ae^{-nt} .

В таком случае логарифмический декремент колебаний рассчитывается по зависимости

$$\delta = n\tau, \quad (6)$$

где n – коэффициент затухания, τ – период колебаний.

Относительный коэффициент демпфирования оценивается по зависимости:

$$\xi = \frac{\delta}{2\pi}. \quad (7)$$

Выполнив серию из десяти экспериментов, выявили диапазон изменения коэффициента демпфирования: от 0,0024 до 0,0035. Для дальнейшей оценки долговечности выбран весь диапазон его изменения.

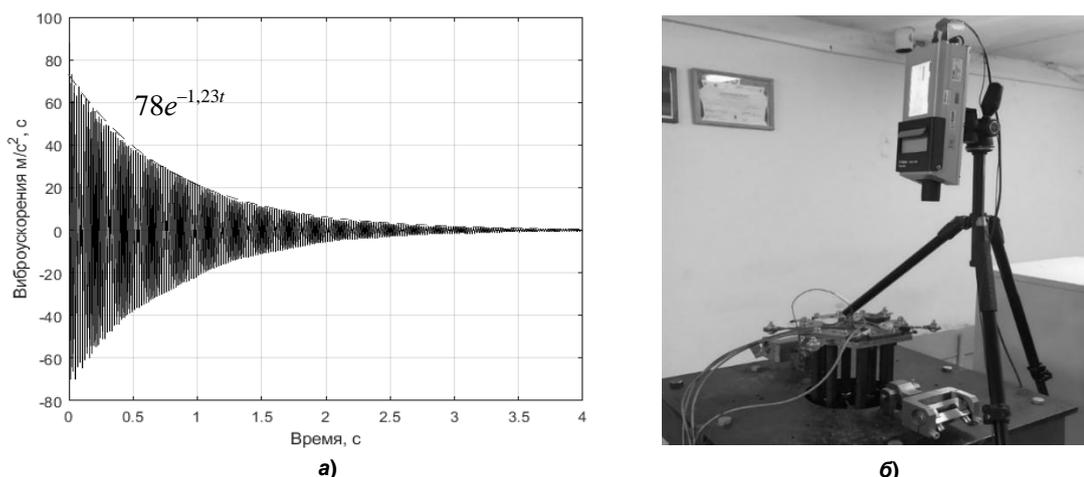


Рис. 6. Характерная виброграмма затухающих колебаний (а) и лазерный виброметр с образцами в оснастке (б)

Оценка долговечности частотными методами

Долговечность частотными методами определяется с помощью спектральной плотности напряжений в наиболее нагруженной точке. Оценка выполнялась двумя методами: методом для узкополосного процесса и методом Дирлика. Результаты расчетов с учетом вариативности демпфирования показаны на рис. 7.

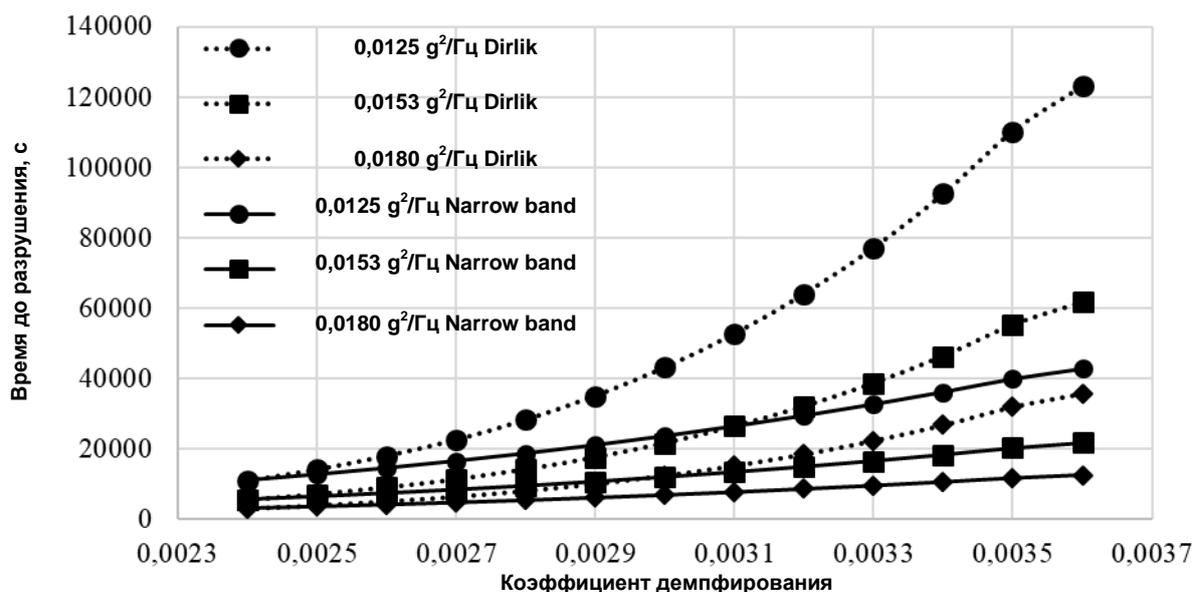


Рис. 7. Долговечности образцов в зависимости от коэффициента демпфирования

Сравнивая полученные значения, видим, что метод Дирлика даёт больший допустимый диапазон долговечностей, чем метод для узкополосного процесса. При малых значениях коэффициента демпфирования долговечности, определенные методами Дирлика и для узкополосного случайного процесса, показывают близкие значения, разница не превышает 2 %. С увеличением демпфирования разница увеличивается до 64 %.

Экспериментальная верификация

Заключительным этапом исследования является экспериментальная верификация проведенных расчетов. Испытания проведены при консольном изгибе образцов с заданием случайного воздействия. Образцы испытывались до разрушения, общий вид испытательной установки с образцами показан на рис. 8, а. Реализовано три случая нагружения: 0,018, 0,153 и 0,0125 g²/Гц. На уровне 0,018 g²/Гц испытывалось шесть образцов, на уровне 0,0153 g²/Гц – две группы по шесть образцов, на уровне 0,0125 g²/Гц – четыре образца.

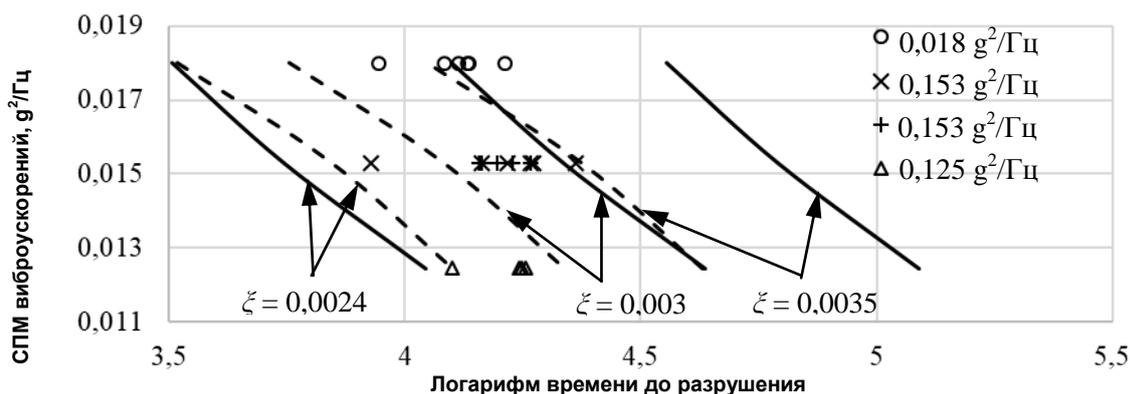


Рис. 8. Расчётные и экспериментальные результаты:
пунктирная линия – долговечность по методу для узкополосного процесса,
сплошная линия – долговечность по методу Дирлика,
маркеры – экспериментальные данные

Сравнение экспериментальных результатов с расчётными зависимостями представлено на рис. 8, б. Видно, что экспериментальные данные находятся практически полностью в пределах диапазона, ограниченного кривыми, полученными методом для узкополосного процесса, и полностью входят в диапазон, ограниченный кривыми, полученными методом Дирлика. Анализируя полученные результаты, важно отметить сильное влияние коэффициента демпфирования на расчётную долговечность объектов исследования. В таблице приведена погрешность экспериментальных данных в сравнении с кривыми, полученными численными методами, для значений коэффициента демпфирования $\zeta = 0,003$. В данном случае коэффициент демпфирования выбирался как среднее значение исследуемого диапазона его изменения.

Разница между экспериментальными и численными результатами ($\zeta = 0,003$)

Номер образца	Погрешность, %					
	Метод для узкополосного процесса			Метод Дирлика		
	0,0125 $g^2/Gц$	0,0153 $g^2/Gц$	0,0180 $g^2/Gц$	0,0125 $g^2/Gц$	0,0153 $g^2/Gц$	0,0180 $g^2/Gц$
1	-35	-13	20	-145	-103	-43
2	-88	17	46	-243	-49	3
3	-32	22	42	-140	-40	-4
4	-32	32	48	-140	-23	7
5	-	35	49	-	-17	8
6	-	36	57	-	-16	23
Среднее	-47	21	44	-167	-41	-1

Из таблицы видно, что на низком уровне ($0,0125 g^2/Gц$) СПМ-виброускорений численные методы дают завышенную оценку долговечности: метод для узкополосного процесса завышает оценку в среднем на 47 %, метод Дирлика – в среднем на 167 %. При увеличении СПМ-виброускорений метод для узкополосного процесса занижает оценку долговечности (21 % для СПМ $0,0153 g^2/Gц$ и 44 % для СПМ $0,0180 g^2/Gц$). Метод Дирлика даёт завышенную оценку (41 % для СПМ $0,0153 g^2/Gц$ и 1% для СПМ $0,0180 g^2/Gц$).

Выводы

Исследовано влияние демпфирования на долговечность при расчёте частотными методами. Разработана конечно-элементная модель исследуемого объекта для получения спектральной плотности напряжений в наиболее нагруженной точке. Экспериментально выявлен диапазон изменения коэффициента демпфирования объекта исследования. Выполнены численные расчёты на долговечность с учётом коэффициента демпфирования методами для узкополосного процесса и методом Дирлика.

Установлено, что метод Дирлика более чувствителен к изменению демпфирования конструкции. При этом для низкого уровня нагружения разница рассчитанной долговечности в сравнении с полученной экспериментально достигает 167 %, с увеличением уровня нагрузок разница снижается до 1 %. Для узкополосного процесса разница рассчитанной долговечности в сравнении с полученной экспериментально для всех уровней нагружения в среднем варьируется в пределах 50 %. Таким образом, величина коэффициента демпфирования может существенно влиять на расчётную долговечность, изменяя её в разы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10097, <https://rscf.ru/project/23-29-10097/>.

Литература

1. A Comparative Review of Time- and Frequency-Domain Methods for Fatigue Damage Assessment / M. Muñiz-Calvente, A. Álvarez-Vázquez, F. Pelayo *et al.* // *Int. J. Fatigue*. – 2022. – Vol. 163. – P. 107069.
2. Rain Flow Method / T. Endo, M. Matsuishi, K. Mitsunaga *et al.* // *Kyushu Institute of Technology Academic Repository*. – 1974. – Vol. 28. – P. 33–62.
3. Gadolina, I.V. Varied Approaches to Loading Assessment in Fatigue Studies / I.V. Gadolina, N.A. Makhutov, A.V. Erpalov // *Int. J. Fatigue*. – 2021. – Vol. 144. – P. 106035.
4. Zorman, A. Vibration Fatigue by Spectral Methods – A Review with Open-Source Support / A. Zorman, J. Slavič, M. Boltežar // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2023. – Vol. 190. – P. 110149.
5. Benasciutti, D. Frequency-Based Fatigue Analysis of Non-Stationary Switching Random Loads / D. Benasciutti, R. Tovo // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 2007. – Vol. 30, no. 11. – P. 1016–1029.
6. Braccesi, C. Random Fatigue. A New Frequency Domain Criterion for the Damage Evaluation of Mechanical Components / C. Braccesi, F. Cianetti, L. Tomassini // *Int. J. Fatigue*. – 2015. – Vol. 70. – P. 417–427.
7. Park, J.B. A New Fatigue Prediction Model for Marine Structures Subject to Wide band Stress Process / J.B. Park, J. Choung, K.S. Kim // *Ocean Eng.* – 2014. – Vol. 76. – P. 144–151.
8. Evaluation of Mechanical Component Fatigue Behavior under Random Loads: Indirect Frequency Domain Method / C. Braccesi, F. Cianetti, G. Lori, D. Pioli // *Int. J. Fatigue*. – 2014. – Vol. 61. – P. 141–150.
9. Marques, J.M.E. Fatigue Analysis of Nonstationary Random Loadings Measured in an Industrial Vehicle Wheel: Uncertainty of Fatigue Damage / J.M.E. Marques, L. Solazzi, D. Benasciutti // *Metals*. – 2022. – Vol. 12, no. 4. – P. 616.
10. Akbaba, Ö.M. Vibration Based Fatigue Analysis of a Structure Integrated on an Air Vehicle by Using Experimental and Theoretical Methods / Ö.M. Akbaba, B. Yildirim, G. Canbaloglu // *Results Eng.* – 2022. – Vol. 15. – P. 100549.
11. Demirel, G.I. Implementation of Dirlik's Damage Model for the Vibration Fatigue Analysis / G.I. Demirel, A. Kayran // *Procedia Struct. Integr.* – 2019. – Vol. 21. – P. 101–111.
12. Wang, Y. Adapted Locati Method used for Accelerated Fatigue Test under Random Vibrations / Y. Wang, R. Serra, E.P. Argoul // *Procedia Struct. Integr.* – 2019. – Vol. 19. – P. 674–681.
13. Fatigue Life Estimation of a Military Aircraft Structure subjected to Random Loads / G. Zucca, F. Cianetti, M. Palmieri *et al.* // *Procedia Struct. Integr.* – 2018. – Vol. 12. – P. 183–195.
14. Non-Gaussianity and Non-Stationarity in Vibration Fatigue / M. Palmieri, M. Česnik, J. Slavič *et al.* // *Int. J. Fatigue*. – 2017. – Vol. 97. – P. 9–19.
15. Kihm, F. Influence of the Modal Damping on the Estimated Fatigue Life / F. Kihm, A. Langelier, K. Munson // *Procedia Eng.* – 2018. – Vol. 213. – P. 270–281.
16. Fatigue Reliability Analysis System for Key Components of Aero-Engine / H. Qi, Y. Lu, S. Song, Q. Xu // *International Journal of Aerospace Engineering*. – 2022. – Vol. 2022. – Article ID: 1143901.
17. Zorman, A. Short-Time Fatigue-Life Estimation for Non-Stationary Processes Considering Structural Dynamics / A. Zorman, J. Slavič, M. Boltežar // *International Journal of Fatigue*. – 2021. – Vol. 147. – P. 106178.

18. Мыльников, В.В. Метод изучения частотной стабильности материалов при испытаниях на многоцикловую усталость стали / В.В. Мыльников, Э.А. Дмитриев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2023. – Т. 66, № 3. – С. 367–375.
19. Rezaei, R. Fatigue Life Sensitivity of Monopile-Supported Offshore Wind Turbines to Damping / R. Rezaei, P. Fromme, P. Duffour // Renewable Energy. – 2018. – Vol. 123. – P. 450–459.
20. Miles, J.W. On Structural Fatigue under Random Loading / J.W. Miles // J. Aeronaut. Sci. – 1954. – Vol. 21, no. 11. – P. 753–762.
21. Dirlik, T. Application of Computers in Fatigue Analysis: PhD thesis / T. Dirlik. – University of Warwick., UK, 1985. – 234 p.
22. Mršnik, M. Frequency-Domain Methods for a Vibration-Fatigue-Life Estimation – Application to Real Data / M. Mršnik, J. Slavič, M. Boltežar // International Journal of Fatigue. – 2013. – Vol. 47. – P. 8–17.
23. ГОСТ 25.502-79. Методы механических испытаний металлов. Метод испытаний на усталость. – М: Изд-во стандартов, 1979. – 44 с.
24. Нашиф, А. Демпфирование колебаний / А. Нашиф, Д. Джоунс, Д. Хендерсон. – М.: Мир, 1988. – 448 p.

Поступила в редакцию 28 сентября 2023 г.

Сведения об авторах

Хорошевский Кирилл Антонович – аспирант, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация, e-mail: khoroshevskiiika@susu.ru.

Ерпалов Алексей Викторович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация.

Гадолина Ирина Викторовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация.

*Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2023, vol. 15, no. 4, pp. 47–57*

DOI: 10.14529/mmp230406

A COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDY INTO THE INFLUENCE OF STRUCTURAL DAMPING ON A STRUCTURE'S DURABILITY UNDER RANDOM LOADING

K.A. Khoroshevskii¹, A.V. Erpalov¹, I.V. Gadolina²

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

² Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

E-mail: khoroshevskiiika@susu.ru

Abstract. Mechanical engineering products are often subjected to dynamic impact during operation. The analysis of the durability of structures functioning under random multi-frequency loading requires taking into account their dynamic parameters (natural frequencies and vibration forms, damping, etc.). This paper analyzes the influence of the damping coefficient on the durability of a structurally similar specimen using a method for the narrow-band process and the Dirlik method. A computational scheme based on a finite element model determines the stress spectral density. The study defines the range of the damping coefficient variation by experiment and calculates the durability of the damping coefficient. The influence of damping on durability is analyzed by different methods. The calculations are experimentally verified.

Keywords: fatigue life; frequency methods; damping coefficient; power spectral density.

References

1. Muñiz-Calvente M., Álvarez-Vázquez A., Pelayo F., Aenlle M., García-Fernández N., Lamela-Rey M.J. A Comparative Review of Time- and Frequency-Domain Methods for Fatigue Damage Assessment. *Int. J. Fatigue*, 2022, Vol. 163, p. 107069. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107069
2. Endo T., Matsuishi M., Mitsunaga K., Kobayashi K., Takahashi K. Rain Flow Method. *Bulletin of the Kyushu Institute of Technology. Science and technology*, 1974, Vol. 28, pp. 33–62. (in Jap.). <http://hdl.handle.net/10228/3927>
3. Gadolina I.V., Makhutov N.A., Erpalov A.V. Varied Approaches to Loading Assessment in Fatigue Studies. *Int. J. Fatigue*, 2021, Vol. 144, p. 106035. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106035
4. Zorman A., Slavič J., Boltežar M. Vibration Fatigue by Spectral Methods – A Review with Open-Source Support. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, Vol. 190, p. 110149. DOI: 10.1016/j.ymsp.2023.110149
5. Benasciutti D., Tovo R. Frequency-Based Fatigue Analysis of Non-Stationary Switching Random Loads. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2007, Vol. 30, no. 11, pp. 1016–1029. DOI: 10.1111/j.1460-2695.2007.01171.x
6. Braccesi C., Cianetti F., Tomassini L. Random Fatigue. A New Frequency Domain Criterion for the Damage Evaluation of Mechanical Components. *Int. J. Fatigue*, 2015, Vol. 70, pp. 417–427. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.07.005
7. Park J.B., Choung J., Kim K.S. A New Fatigue Prediction Model for Marine Structures Subject to Wide band Stress Process. *Ocean Eng.*, 2014, Vol. 76, pp. 144–151. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2013.11.002
8. Braccesi C., Cianetti F., Lori G., Pioli D. Evaluation of Mechanical Component Fatigue Behavior under Random Loads: Indirect Frequency Domain Method. *Int. J. Fatigue*, 2014, Vol. 61, pp. 141–150. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.11.017
9. Marques J.M.E., Solazzi L., Benasciutti D. Fatigue Analysis of Nonstationary Random Loadings Measured in an Industrial Vehicle Wheel: Uncertainty of Fatigue Damage. *Metals*, 2022, Vol. 12, no. 4, p. 616. DOI: 10.3390/met12040616
10. Akbaba Ö.M., Yildirim B., Canbaloğlu G. Vibration Based Fatigue Analysis of a Structure Integrated on an Air Vehicle by Using Experimental and Theoretical Methods. *Results Eng.*, 2022, Vol. 15, P. 100549. DOI: 10.1016/j.rineng.2022.100549
11. Demirel G.I., Kayran A. Implementation of Dirlik’s Damage Model for the Vibration Fatigue Analysis. *Procedia Struct. Integr.*, 2019, Vol. 21, pp. 101–111. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.12.091
12. Wang Y., Serra R., Argoul E.P. Adapted Locati method used for accelerated fatigue test under random vibrations. *Procedia Struct. Integr.*, 2019, Vol. 19, pp. 674–681. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.12.073
13. Zucca G., Cianetti F., Palmieri M., Braccesi C., De Paolis F. Fatigue Life Estimation of a Military Aircraft Structure subjected to Random Loads. *Procedia Struct. Integr.*, 2018, Vol. 12, pp. 183–195. DOI: 10.1016/j.prostr.2018.11.096
14. Palmieri M., Česnik M., Slavič J., Cianetti F., Boltežar M. Non-Gaussianity and Non-Stationarity in Vibration Fatigue. *Int. J. Fatigue*, 2017, Vol. 97, pp. 9–19. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.12.017
15. Kihm F., Langelier A., Munson K. Influence of the Modal Damping on the Estimated Fatigue life. *Procedia Eng.*, 2018, Vol. 213, pp. 270–281. DOI: 10.1016/j.proeng.2018.02.028
16. Qi H., Lu Y., Song S., Xu Q. Fatigue Reliability Analysis System for Key Components of Aero-Engine. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2022, Vol. 2022, Article ID: 1143901. DOI:10.1155/2022/1143901
17. Zorman A., Slavič J., Boltežar M. Short-Time Fatigue-Life Estimation for Non-Stationary Processes Considering Structural Dynamics. *Int. J. Fatigue*, 2021, Vol. 147, p. 106178. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106178
18. Myl’nikov V.V., Dmitriev E.A. A Method for Studying the Frequency Stability of Materials during Tests for Multi-Cycle Fatigue of Steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2023, Vol. 66, no. 3, pp. 367–375. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-3-367-375
19. Rezaei R., Fromme P. Fatigue Life Sensitivity of Monopile-supported Offshore Wind Turbines to Damping. *Renew. Energy*, 2018, Vol. 123, pp. 450–459. DOI: 10.1016/j.renene.2018.02.086

20. Miles J.W. On Structural Fatigue under Random Loading. *J. Aeronaut. Sci.*, 1954, Vol. 21, no. 11, pp. 753–762. DOI: 10.2514/8.3199
21. Dirlik T. *Application of Computers in Fatigue Analysis*: PhD thesis. University of Warwick, UK, 1985, 234 p.
22. Mršnik M., Slavič J., Boltežar M. Frequency-Domain Methods for a Vibration-Fatigue-Life Estimation – Application to Real Data. *Int. J. Fatigue*, 2013, Vol. 47, pp. 8–17. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.07.005
23. GOST 25.502-79 *Methods of mechanical testing of metals. Method of fatigue testing*. Moscow: Izd-vo standartov Publ., 1979, 44 p.
24. Nashif A., Jones D., Henderson J. *Vibration Damping*. John Wiley & Sons, Chichester, 1985, 453 p.

Received September 28, 2023

Information about the authors

Khoroshevskii Kirill Antonovich is Post-graduate Student, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, e-mail: khoroshevskiika@susu.ru.

Erpalov Aleksey Viktorovich is Cand. Sc. (Engineering), Senior Staff Scientist, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation.

Gadolina Irina Victorovna is Cand. Sc. (Engineering), Senior Staff Scientist, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation.