

УДК 621.0; 621.8

doi: 10.18698/0536-1044-2021-11-31-42

Инструменты и методы анализа усталостного многоциклового стохастического нагружения для оценки точности и надежности численных решений

В.В. Шелофаст¹, М.Ю. Ростовцев², А.А. Замрий²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана

² ООО НТЦ «АПМ»

Tools and Methods for Analysis of Fatigue High-Cycle Stochastic Loading for Evaluating the Accuracy and Reliability of Numerical Solutions

V.V. Shelofast¹, M.Yu. Rostovtsev², A.A. Zamry²

¹ Bauman Moscow State Technical University

² Research and Software Development Centre APM

Рассмотрены методы обработки и результаты анализа точности решений, получаемых при расчете усталостной долговечности конструкций в случае стохастического нагружения, с применением отечественных и зарубежных компьютерных систем. В отличие от зарубежных аналогов отечественные программные комплексы расчета усталостной долговечности металлоконструкций при случайном нагружении базируются на нормативных документах Российской Федерации и могут быть использованы наряду с методами, принятыми за рубежом.

Ключевые слова: случайное нагружение, долговечность при стохастическом нагружении, асимметричное нагружение

The article presents methods of processing and the results of the analysis of the accuracy of solutions obtained when calculating the structure fatigue life in the case of random loading using domestic and foreign computer systems. Unlike foreign analogues, domestic software products for calculating the fatigue life of a product under random loading are based on the regulatory documents of the Russian Federation, which are proposed along with methods adopted abroad.

Keywords: random loading, fatigue life under stochastic loading, asymmetric loading

Программы расчета сопротивления усталости конструкций имеют невысокую точность оценки допустимого числа циклов нагружения. Это связано с тем, что процессы усталостного разрушения зависят от степени изотропии материала, степени зернистости, состояния поверхности, наличия упрочнения и т. д. [1–4] Поскольку трудно добиться однородности свойств конструкционных материа-

лов, стабильность и повторяемость выходных параметров невысоки.

Тем не менее решения задач оценки усталостной долговечности в программных комплексах (ПК) адекватно описывают процессы разрушения, так как в основе инженерного анализа параметров сопротивления усталости лежат методы статистической обработки результатов. Чтобы убедиться в этом, необходимо

проанализировать расчетные данные, полученные в разных компьютерных средах.

Постановка задачи анализа точности решений также обусловлена разработкой отечественной программной системы APM StructFEM, где имеются инструменты расчета сопротивления усталости, в том числе при случайном (стохастическом) нагружении.

В обычных эксплуатационных условиях статическая прочность конструкций является, как правило, удовлетворительной. Основной причиной ее потери является усталостное разрушение, поэтому необходимость разработки программного обеспечения для оценки выносливости конструкций является актуальной задачей. Актуальность указанного программного обеспечения продиктована и тем, что в РФ реализуется программа импортозамещения, в том числе в области САЕ, и отечественные разработки в этом направлении востребованы как никогда.

Цель работы — верификация программного обеспечения для анализа сопротивления усталости при случайном нагружении в ПК APM StructFEM.

Рассмотрен вариант приложения случайной нагрузки к конструкции и определено время ее безотказной работы с 50%-ной вероятностью в таких условиях эксплуатации.

Описаны методы определения параметров сопротивления усталости конструкций при

стохастическом нагружении, реализованные в ПК APM StructFEM. Следует отметить, что это единственный программный продукт, в котором помимо зарубежных решений можно получить результаты согласно отечественным нормативным документам, учет которых в РФ является обязательной процедурой [2, 5].

Для оценки надежности результатов выполнен анализ данных, полученных в отечественном ПК APM StructFEM и зарубежных программных продуктах.

Первым этапом оценки усталостной долговечности является реализация стохастического нагружения. Эксплуатационные режимы нагрузки можно задать в виде последовательности блоков нагружения, каждый из которых состоит из определенного количества ступеней. Это — многоступенчатые испытания [6].

Другой вариант реализации нагружения — случайные испытания, когда задается последовательность экстремумов, вычисляемых на управляющем вибрационном стендом компьютере [6]. Промежуточный вариант реализации стохастического нагружения — блочное нагружение, когда блок содержит запись случайного процесса с достаточно большим числом экстремумов, характеризующих нагружение.

Для выполнения исследования необходимо ограничиться фрагментом, один из примеров которого приведен на рис. 1. Здесь количество экстремумов с разной амплитудой — 252,



Рис. 1. Стохастическая кривая нагрузки, построенная по результатам измерений динамической нагрузки к статической

коэффициент нерегулярности (отношение числа пересечений нуля к числу экстремумов) [5] — 0,499. Этот график в каждый момент времени определяет отношение действующих напряжений к статическим.

Такой вид изменения напряжений для любой точки конструкции при действии случайной нагрузки характерен для объектов транспортно-машиностроения, например для объектов авиационной техники. Очевидно, что во время взлета, посадки, руления и т. п. характер изменения нагрузки в этой же точке будет различным. Действующие напряжения не зависят от характера их получения и могут быть обусловлены, например, силовыми факторами, термонапряжениями и другими видами воздействия.

Случайные функции, характеризующие изменение напряжений во времени, можно эффективно использовать, например, с датчиками, определяющими напряженно-деформированное состояние исследуемого объекта. В таком варианте совместного использования программного обеспечения и тензометрии можно прогнозировать остаточный ресурс эксплуатационного объекта с большой степенью надежности.

Параметры стохастического нагружения. В блоке нагружения стохастическая нагрузка обладает определенными статистическими параметрами и продолжительностью. Для оценки параметров стохастического нагружения используют такие статистические характеристики, как среднее значение (математическое ожидание), дисперсия, эксцентриситет и коэффициент асимметрии.

Обработка стохастической нагрузки с целью выделения циклов нагружения и оценка их характеристик. Разрушение конструкции при случайных воздействиях пролонгировано во времени, а ее сопротивление усталости зависит от совокупности амплитудного и среднего значений напряжений циклов нагружения. При определенных условиях каждый цикл нагружения может вызвать структурное изменение материала на микроуровне, а совокупность таких изменений может привести к разрушению конструкции в целом.

Очевидно, что для прогнозирования срока службы конструкции необходимо вести расчет экстремумов от рассматриваемого стохастического воздействия, включая и малозначительные. В ПК APM StructFEM эта обработка вы-

полняется автоматически с использованием специализированного обработчика.

Обработка стохастического нагружения в среде APM StructFEM проводится согласно ГОСТ 25.101–83 [7]. К наиболее востребованным среди предложенных в стандарте можно отнести методы полных циклов и «дождя», так как они подходят для полного диапазона коэффициента нерегулярности 0...1. Эти два метода дают близкие результаты. В программе APM StructFEM использован метод «дождя», так как его проще реализовать.

Чтобы подтвердить корректность обработки сигнала, аналогичную процедуру выполняли в ручном режиме, который предназначен только для проверки точности. Эту процедуру и расчеты напряжений рассматриваемого участка трубопровода, проведенные по известным аналитическим зависимостям, будем называть аналитическими вычислениями.

Задача определения усталостной долговечности при стохастическом нагружении. Оценим усталостное разрушение при стохастическом нагружении на примере участка трубопровода конечной длины, жестко закрепленного с одного из концов, находящегося под действием различных нагрузок и их комбинации. Такой пример рассмотрен в статье, посвященной анализу усталостной долговечности конструкции при регулярном нагружении [8].

Суть метода обработки сигнала стохастического нагружения (схематизации) состоит в фиксации локальных значений экстремумов при обходе непрерывной кривой. Из этих экстремумов по правилам, описанным в методе «дождя», формируются циклы, для которых фиксируются амплитудное и среднее значения напряжений.

Результаты такой обработки в безразмерных величинах (как отношение динамической нагрузки к статической) приведены в табл. 1. Для представленной случайной функции после проведения схематизации выделено 252 полных цикла, но показана только ограниченная выборка, упорядоченная по возрастанию амплитуды (полуразмаха) цикла.

Определение параметров усталостной долговечности. Объектом исследования являлся участок трубопровода круглого поперечного сечения [8], который нагружался последовательно собственным весом, изгибом в вертикальной

Таблица 1

**Параметры локальных циклов, выделенных из стохастической последовательности
обработчиком случайных сигналов методом «дождя»**

Номер полного цикла	Значение в выделенном цикле		Среднее значение цикла	Амплитуда (полуразмах) цикла
	минимальное	максимальное		
1	-0,8531880	-0,853164	-0,853176	0,000012190
2	-0,7103220	-0,709797	-0,710060	0,000262365
3	0,0188397	0,0176333	-0,018237	0,000603188
4	0,8434310	0,844960	0,844195	0,000764795
5	-0,5799690	-0,572459	-0,576214	0,003754840
...
223	-1,0327400	1,075580	0,0214201	1,05416000
224	-1,0285100	1,130290	0,0508922	1,07940000
225	-1,0429400	1,136250	0,046652	1,08959000
226	-1,226140	0,961699	-0,132220	1,09392000
227	-0,5938050	1,636560	0,521376	1,11518000
228	-1,2610100	0,976160	-0,142425	1,11858000
229	-1,3426600	0,902191	-0,220233	1,12242000
230	-0,8987310	1,360880	0,231073	1,12980000
231	-1,4079400	0,871310	-0,268316	1,13963000
232	-0,5643310	1,748530	0,592101	1,15643000
233	-1,4148200	0,925931	-0,244442	1,17037000
234	-1,4202000	0,926100	-0,247048	1,17315000
235	-1,3415400	1,068510	-0,136513	1,20503000
236	-2,0497600	0,471151	-0,789303	1,26045000
237	-1,1248600	1,406630	0,140883	1,26575000
238	-1,3156800	1,245050	-0,035316	1,28037000
239	-1,6397000	0,921690	-0,359007	1,28070000
240	-1,0444000	1,542420	0,249007	1,29341000
241	-1,2812400	1,379000	0,048879	1,33012000
242	-1,4132600	1,362980	-0,025139	1,38812000
243	-1,6927100	1,166080	-0,263315	1,42939000
244	-0,8690880	2,025240	0,578075	1,44716000
245	-1,5824000	1,429720	-0,076338	1,50606000
246	-1,4252700	1,637030	0,105879	1,53115000
247	-1,2438700	1,824880	0,290503	1,53437000
248	-2,0560000	1,059660	-0,498167	1,55783000
249	-2,1157400	1,596760	-0,259493	1,85625000
250	-2,0014900	2,002850	0,000684	2,00217000
251	-2,1142800	2,028510	-0,042885	2,07140000
252	-2,1974100	2,246740	0,0246692	2,22208000

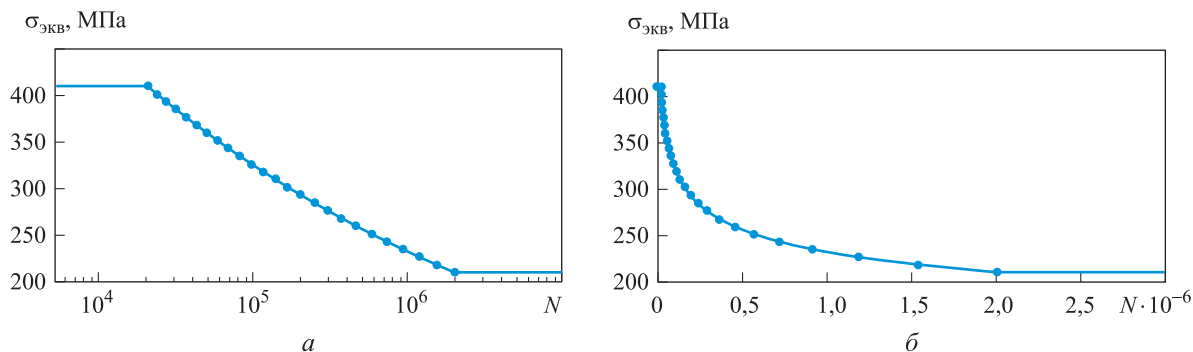


Рис. 2. Зависимости максимальных эквивалентных напряжений от числа циклов в логарифмическом (а) и линейном (б) видах

плоскости, центральным растяжением, внутренним давлением, а также комбинацией перечисленных нагрузок. Последующие результаты приведены для комбинации нагрузок.

Напряжения, действующие в рассматриваемой точке, определяются произведением эквивалентных напряжений из результатов статического расчета на коэффициент, задаваемый графиком нагружения, исходя из данных статистической обработки тензометрической информации (см. рис. 1). Таким образом, получаем график изменения напряжений в точке, которая расположена на расстоянии 10 % длины трубы от заделки [8]. Комплекс APM StructFEM позволяет проанализировать такие изменения во всех точках расчетной модели.

Каждый из выявленных циклов по среднему и амплитудному значениям необходимо привести к симметричному режиму нагружения, эквивалентному повреждающему воздействию.

Существует несколько методов приведения асимметричного нагружения к симметричному, самыми популярными из которых являются методы Гудмана, Герберга, Зодерберга [9–11] и Серенсена — Кинасошвили [12].

Первые три метода реализованы в зарубежных программных продуктах. Метод Серенсена — Кинасошвили, на базе которого созданы российские нормативные документы по расчету на выносливость [2, 5], не представлен ни в одной из имеющихся компьютерных систем за исключением отечественной APM StructFEM.

В основу анализа параметров сопротивления усталости при стохастическом нагружении (как и при регулярном усталостном нагружении) конструкции положена кривая Велера (рис. 2), определяющая 50%-ную вероятность ее разрушения [12–15]. Кривая Велера представляет собой зависимость максимальных

эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ от числа циклов в логарифмическом и линейном видах.

Для рассматриваемого материала можно выделить две базовые точки:

- перелома наклонной прямой усталости [5] в двойных логарифмических координатах $N_G = 2 \cdot 10^6$, $\sigma_{-1} = 209$ МПа;
- начала многоциклового областа с координатами $N = 2 \cdot 10^4$, $\sigma_b = 410$ МПа [13–15].

Рассмотрим порядок решения поставленной задачи с использованием гипотезы линейного накопления повреждения Пальмгрена — Майнера.

Определение параметров усталостной долговечности с использованием методов Гудмана, Герберга, Зодерберга и Серенсена — Кинасошвили. Усталостное разрушение при стохастической нагрузке характеризуется повреждением конструкции, вызванным не отдельным случайным воздействием, а их совокупностью. Физическим параметром разрушения является величина повреждения, которая определяет негативные изменения во всех точках объемных и поверхностных структур конструктивных элементов, приводящих к потере прочности.

Под повреждением, вносимым i -м циклом приведенной нагрузки, следует понимать отношение числа таких циклов n_i , полученных приведением к эквивалентному симметричному циклу, к числу циклов кривой Велера N_i данного уровня нагрузки:

$$d_i = \frac{n_i}{N_i}.$$

Суммарный коэффициент повреждения определяется как

$$Damage = \sum_{i=1}^{N_c} d_i,$$

где N_c — число полных циклов, выделенных схематизацией [7] стохастического процесса, и вносящих повреждение в конструкцию.

Ожидаемое число повторений рассматриваемого блока стохастической нагрузки, при котором элемент конструкции с 50%-ной вероятностью выдержит разрушение, вычисляется как

$$\hat{N} = \frac{1}{Damage}.$$

Сначала определим значения приведенных эквивалентных напряжений методом Гудмана.

Затем исходя из кривой Велера, характеристики которой указаны ранее, найдем коэффициенты повреждения всех циклов (табл. 2). Расчеты выполнены для точки 1 на трубе, указанной в работе [8]. Строки в этой таблице упорядочены по значению амплитуды (полуразмаха) цикла.

Суммарный коэффициент повреждения $Damage = 1,3715 \cdot 10^{-4}$, а ожидаемое число повторений блока стохастической нагрузки, которое выдержит с 50%-ной вероятностью рассматриваемая модель трубы, $\hat{N} = 7291$.

В результате расчета получено допустимое число возможных повторений заявленных блоков, определяющее усталостную долговечность конструкции.

Таблица 2

Приведение полученных напряжений к эквивалентным методом Гудмана по результатам обработки случайных напряжений по методу «дождя» и по результатам аналитических вычислений

Номер полного цикла	Среднее напряжение цикла, МПа	Амплитуда (полуразмах) цикла, МПа	Приведенное эквивалентное напряжение, МПа	Число циклов по кривой Велера $N \cdot 10^{-5}$	Коэффициент повреждения $Damage \cdot 10^6$
214	100,1932	163,6607	226,1824	11,742	0,852
215	93,0195	165,0360	222,9212	12,900	0,775
218	128,5728	170,0064	258,6453	4,633	2,158
227	87,7934	187,7830	249,5325	5,991	1,669
230	38,9099	190,2454	219,5027	14,230	0,703
232	99,7027	194,7292	268,6942	3,625	2,759
235	-22,9871	202,9122	211,8993	18,146	0,551
236	-132,9092	212,2454	221,6459	13,381	0,747
237	23,7229	213,1365	236,2458	8,671	1,153
238	-5,9468	215,5982	225,1472	12,102	0,826
239	-60,4525	215,6541	225,2055	12,082	0,828
240	41,9298	217,7948	253,3506	5,375	1,861
241	8,2307	223,9762	238,6878	8,124	1,231
242	-4,2331	233,7425	244,0950	7,015	1,426
243	-44,3391	240,6928	251,3532	0,569	1,759
244	97,3409	243,685	333,7051	0,822	12,165
245	-12,8545	253,6028	264,8350	3,985	2,510
246	17,8288	257,8272	281,4869	2,600	3,847
247	48,9172	258,3703	306,3663	1,474	6,782
248	-83,8853	262,3199	273,9382	3,157	3,167
249	-43,6954	312,57	326,4138	0,946	10,572
250	0,1151	337,1413	352,1724	0,562	17,783
251	-7,2212	348,7984	364,2468	0,450	22,236
252	4,1540	374,1708	394,7425	0,258	38,787

Для верификации метода проведен расчет усталостной долговечности с использованием разных конечных элементов: стержневых (Pipe), пластинчатых трех- (Triang) и четырехузловых (Quad), твердотельных (объемных) десяти- (Tetra) и восьмиузловых (Hexa). Процесс численного анализа полностью автоматизирован как на этапе статического нагружения, так и на этапе обработки функции стохастического нагружения и приведения.

Результаты аналитических и автоматизированных расчетов параметров усталостной долговечности при стохастическом нагружении, полученные методами Гудмана, Гербера и Серенсена — Кинасошвили, для конечных элементов разного типа приведены в табл. 3. Здесь и далее параметры трех- и четырехузловых пластинчатых конечных элементов рассчитаны без учета кручения. В числителе указано аналитическое значение, в знаменателе — вычисленное в ПК APM StructFEM.

Одной из главных задач исследования являлось прогнозирование параметров усталостной долговечности для случая стохастического нагружения конструкции с оценкой точности получаемых результатов. Объектом исследования выбран отечественный ПК APM StructFEM, в качестве эталонного ПК использован зарубежный продукт ANSYS. Сравнительные вычисления выполнены для случая переменной нагрузки (см. рис. 1).

Значения усталостной долговечности при стохастическом нагружении, полученные аналитическим и автоматизированными расчетами с использованием методов Гудмана, Гербера и Зодерберга, для конечных элементов разного типа приведены в табл. 4.

Применяемый в отечественных стандартах расчета на выносливость [2, 5] метод Серенсена — Кинасошвили не участвовал в сравнительном анализе потому, что в ПК ANSYS он не реализован.

Таблица 3

Параметры усталостной долговечности при стохастическом нагружении, рассчитанные методами Гудмана, Гербера и Серенсена — Кинасошвили, для конечных элементов разного типа

Тип конечных элементов	Коэффициент повреждения при блочном нагружении $Damage \cdot 10^4$	Погрешность, %	Допустимое число блоков нагружения до разрушения	Погрешность, %
<i>При использовании метода Гудмана</i>				
Стержневые	0,1371/0,1428	4,12	7291/7003	3,90
Пластинчатые трехузловые	0,8113/0,8310	2,42	12 326/12 100	1,83
Пластинчатые четырехузловые	0,8113/0,9223	13,68	12 326/10 840	12,05
Объемные десятиузловые	1,3715/1,4330	4,48	7291/6980	4,26
Объемные восьмиузловые	1,3715/1,6250	18,48	7291/6154	15,59
<i>При использовании метода Гербера</i>				
Стержневые	1,1449/1,1970	4,55	8734/8356	4,32
Пластинчатые трехузловые	0,6942/0,7041	1,42	14 405/14 280	0,86
Пластинчатые четырехузловые	0,6942/0,7827	12,75	14 405/12 780	11,28
Объемные десятиузловые	1,1449/1,1980	4,63	8734/8345	4,45
Объемные восьмиузловые	1,1449/1,3520	18,10	8734/7395	15,33
<i>При использовании метода Серенсена — Кинасошвили</i>				
Стержневые	1,0837/1,1290	4,18	9227/8856	4,02
Пластинчатые трехузловые	0,6624/0,6684	0,91	15 096/15 040	0,37
Пластинчатые четырехузловые	0,6624/0,7407	11,82	15 096/13 500	10,57
Объемные десятиузловые	1,0837/1,1320	4,45	9227/8837	4,22
Объемные восьмиузловые	1,0837/1,2700	17,2	9227/7876	14,64

Таблица 4

**Значения усталостной долговечности при стохастическом нагружении
для конечных элементов разного типа**

Тип конечных элементов	Усталостная долговечность (число повторений блока нагрузки)		
	Аналитические вычисления	Численный расчет в ПК ANSYS	Численный расчет в ПК APM StructFEM
<i>При использовании метода Гудмана</i>			
Пластинчатые трехузловые	12 326	15 018	11 920
Пластинчатые четырехузловые	12 326	11 858	10 710
Объемные десятиузловые	7291	7572	6899
Объемные восьмиузловые	7291	6883	6154
<i>При использовании метода Гербера</i>			
Пластинчатые трехузловые	14 405	18 160	14 110
Пластинчатые четырехузловые	14 405	14 501	12 630
Объемные десятиузловые	8734	9406	8241
Объемные восьмиузловые	8734	8667	7395
<i>При использовании метода Зодерберга</i>			
Пластинчатые трехузловые	232 840	296 900	195 100
Пластинчатые четырехузловые	232 840	216 800	180 500
Объемные десятиузловые	118 632	122 750	112 800
Объемные восьмиузловые	118 632	112 520	97180

Анализ значений усталостной долговечности при стохастическом нагружении, полученных путем аналитических вычислений и численных расчетов в ПК ANSYS [16] и APM StructFEM, показал следующее:

- при стохастическом нагружении рассеяние расчетных параметров существенно больше, чем при постоянном внешнем нагружении;

- метод Зодерберга дает результаты, значительно отличающиеся от получаемых другими методами, поэтому он не может быть рекомендован к использованию при стохастическом нагружении;

- результаты расчетов стержневых и объемных (десяти- и восьмиузловых) конечных элементов очень близки;

- при моделировании пластинчатыми трех- и четырехузловыми конечными элементами параметры усталостной долговечности имеют завышенные значения, что можно объяснить отсутствием учета напряжения поперечного сдвига, характерного для общего случая использования плоских конечных элементов;

- для получения более точных решений следует заменять плоские элементы конструкции объемными.

Очевидно, что усталостное разрушение характерно для мест с наибольшей концентрацией напряжений, но современные ПК способны оценивать поля, определяющие усталостную долговечность, в каждой точке анализируемой конструкции.

Пример твердотельного моделирования металлоконструкции, выполненной в среде графического редактора APM StructFEM, приведен

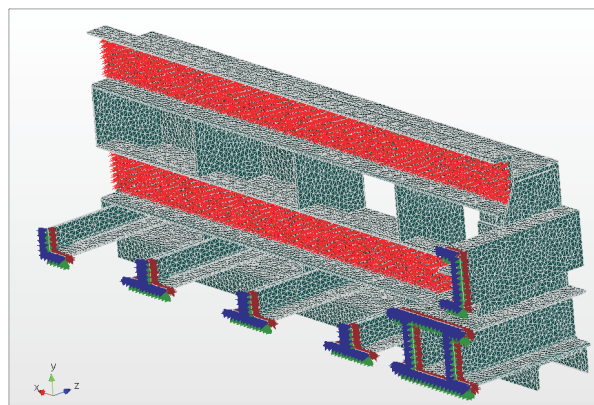


Рис. 3. Геометрическая модель металлоконструкции, созданная и разбитая на конечные элементы в среде графического редактора APM StructFEM

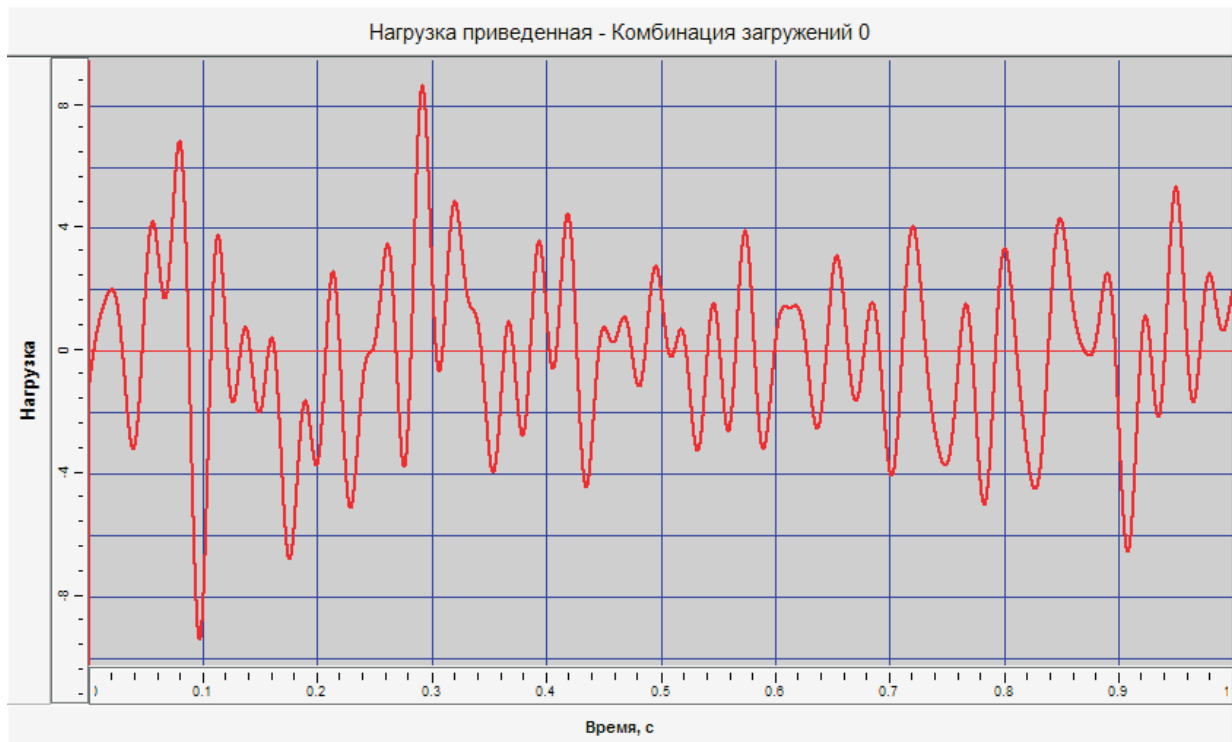


Рис. 4. График стохастического нагружения металлоконструкции

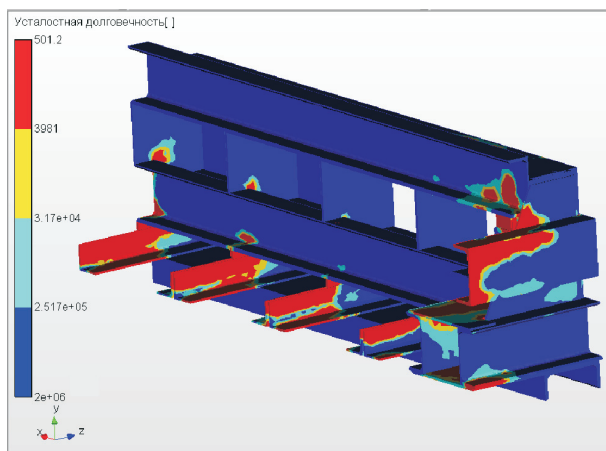


Рис. 5. Карта результатов расчета усталостной долговечности или числа повторений заданной нагрузки

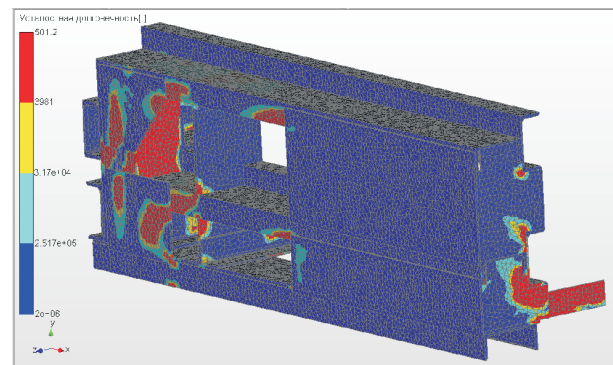


Рис. 6. Карта результатов расчета усталостной долговечности, совмещенная с конечно-элементной сеткой

на рис. 3, график стохастического нагружения этой конструкции — на рис. 4.

На рис. 5 и 6 приведены результаты численного расчета усталостной долговечности при стохастическом нагружении, что соответствует возможному числу повторений рассматриваемых блоков нагружения с 50%-ной вероятностью усталостного разрушения.

На конечные результаты оценки усталостной долговечности оказывает влияние продол-

жительность анализируемого участка случайной кривой.

Выводы

1. Рассмотрены численные методы прогнозирования усталостной долговечности деталей при стохастическом нагружении. Выполнен анализ расхождения полученных данных при использовании отечественного ПК АРМ

StructFEM и зарубежной компьютерной среды ANSYS.

2. Отмечено что ПК APM StructFEM — единственный в мире продукт, который предлагает инструменты расчета усталостной долговечности металлоконструкции методом Серенсена — Кинасошвили при стохастическом нагружении. На основании этого метода создан отечественный стандарт для анализа усталостной долговечности, в том числе при стохастическом нагружении. Установлено, что разность результатов расчета, полученных в ПК APM StructFEM и ANSYS для всех конечных элементов за исключением плоских тонкостенных, не превышает 15 %.

3. Показано, что результаты приведения асимметричного нагружения к симметричному методом Зодерберга существенно отличаются от данных, полученных другими методами. Метод Зодерберга приводит к неверным результатам, поэтому его не следует применять для анализа усталостной долговечности металлоконструкции.

4. Так как отечественный ПК APM StructFEM и зарубежный ПК ANSYS дают близкие результаты по расчету усталостной долговечности при стохастическом нагружении, в рамках импортозамещения можно с большой долей уверенности рекомендовать использовать отечественный продукт как альтернативу зарубежному.

Литература

- [1] Шелофаст В.В. *Основы проектирования машин*. Москва, АПМ, 2005. 472 с.
- [2] ГОСТ 25.504–82. *Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости*. Москва, Изд-во стандартов, 1982. 55 с.
- [3] ГОСТ 25.502–79. *Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость*. Москва, Изд-во стандартов, 1979. 24 с.
- [4] Берендеев Н.Н. *Сопротивление усталости. Основы*. Нижний Новгород, Нижегородский госуниверситет, 2010. 65 с.
- [5] ГОСТ 23207–78. *Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения*. Москва, Изд-во стандартов, 1981. 48 с.
- [6] ГОСТ 25.507–85. *Методы испытаний на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования*. Москва, Изд-во стандартов, 1985. 31 с.
- [7] ГОСТ 25.101–83. *Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов*. Москва, изд-во стандартов, 1983. 29 с.
- [8] Шелофаст В.В., Ростовцев М.Ю., Абдурашитов А.И. Анализ методов расчета на выносливость стационарных эксплуатационных режимов переменного нагружения с целью валидации отечественной CAE — системы APM StructFEM. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 8, с. 27–38.
- [9] Norton R.L. *Machine design. Integrated approach*. Prentice-Hall, 2000. 1078 p.
- [10] Lee Y.L., Pan J., Hathaway R., et al. *Fatigue testing and analysis. Theory and practice*. Butterworth-Heinemann, 2004. 416 p.
- [11] Берендеев Н.Н. *Применение системы ANSYS к оценке усталостной долговечности*. URL: <http://www.unn.ru/pages/e-library/aids/2006/4.pdf> (дата обращения: 15.05.2021).
- [12] Когаев В.П. *Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени*. Москва, Машиностроение, 1977. 232 с.
- [13] Форрест П.Дж. *Усталость металлов*. Москва, Машиностроение, 1968. 352 с.
- [14] Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. *Физико-механическое моделирование процессов разрушения*. Санкт-Петербург, Политехника, 1993. 391 с.
- [15] Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. *Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность*. Москва, Машиностроение, 1985. 224 с.
- [16] ANSYS release 11.0. *Documentation for ANSYS Workbench*. ANSYS Inc., 2007.

References

- [1] Shelofast V.V. *Osnovy proektirovaniya mashin* [Fundamentals of machine design]. Moscow, APM Publ., 2005. 472 p. (In Russ.)

- [2] GOST 25.504–82. *Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody rascheta kharakteristik soprotivleniya ustalosti* [State standard 25.504–82. Strength calculation and testing. Methods of fatigue strength behaviour calculation]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1982. 55 p. (In Russ.)
- [3] GOST 25.502–79. *Raschety i ispytaniya na prochnost' v mashinostroenii. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Metody ispytaniy na ustalost'* [State standard 25.502–79. Strength analysis and testing in machine building. Methods of metals mechanical testing. Methods of fatigue testing]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1979. 24 p. (In Russ.)
- [4] Berendeev N.N. *Soprotivlenie ustalosti. Osnovy* [Fatigue strength. Fundamentals]. Nizhniy Novgorod, Nizhegorodskiy gosuniversitet Publ., 2010. 65 p. (In Russ.)
- [5] GOST 23207–78. *Soprotivlenie ustalosti. Osnovnye terminy, opredeleniya i oboznacheniya* [State standard 23207–78. Fatigue strength. Terms, definitions and symbols]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1981. 48 p. (In Russ.)
- [6] GOST 25.507–85. *Metody ispytaniy na ustalost' pri ekspluatatsionnykh rezhimakh nagruzheniya. Obshchie trebovaniya* [State standard 25.507–85. Strength calculation and testing in machine building. Methods of fatigue testing under service loading. General requirements]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1985. 31 p. (In Russ.)
- [7] GOST 25.101–83. *Metody skhematizatsii sluchaynykh protsessov nagruzheniya elementov mashin i konstruktsiy i statisticheskogo predstavleniya rezul'tatov* [State standard 25.101–83. Strength calculation and testing. Representation of random loading of machine elements and structures and statistical evaluation of results]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1983. 29 p. (In Russ.)
- [8] Shelofast V.V., Rostovtsev M.Yu., Abdurashitov A.I. Analysis of Fatigue Calculation Methods for Variable Loading Stationary Operating Modes to Validate Domestic CAE Software — APM StructFEM. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie [BMSTU Journal of Mechanical Engineering]*, 2021, no. 8, pp. 27–38.
- [9] Norton R.L. *Machine design. Integrated approach*. Prentice-Hall, 2000. 1078 p.
- [10] Lee Y.L., Pan J., Hathaway R., et al. *Fatigue testing and analysis. Theory and practice*. Butterworth-Heinemann, 2004. 416 p.
- [11] Berendeev N.N. *Primenenie sistemy ANSYS k otsenke ustalostnoy dolgovechnosti* [Using ANSYS system for assessment of fatigue endurance]. URL: <http://www.unn.ru/pages/e-library/aids/2006/4.pdf> (accessed: 15.05.2021). (In Russ.)
- [12] Kogaev V.P. *Raschety na prochnost' pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni* [Strength calculations at time-variable stress]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 232 p. (In Russ.)
- [13] Forrest P.G. *Fatigue of metals*. Pergamon Press, 1962. 425 p. (Russ ed.: *Ustalost' metallov*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 352 p.).
- [14] Karzov G.P., Margolin B.Z., Shvetsova V.A. *Fiziko-mekhanicheskoe modelirovanie protsessov razrusheniya* [Physical-mechanical modeling of destruction process]. Sankt-Petersburg, Politekhnik Publ., 1993. 391 p. (In Russ.)
- [15] Kogaev V.P., Makhutov N.A., Gusenkov A.P. *Raschety detaley mashin i konstruktsiy na prochnost' i dolgovechnost'* [Calculation for strength and time endurance of machine parts and constructions]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 224 p. (In Russ.)
- [16] ANSYS release 11.0. *Documentation for ANSYS Workbench*. ANSYS Inc., 2007.

Статья поступила в редакцию 17.06.2021

Информация об авторах

ШЕЛОФАСТ Владимир Васильевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: vvshelofast@apm.ru).

РОСТОВЦЕВ Михаил Юрьевич — математик-программист. ООО НТЦ «АПМ» (141070, Московская область, Королев, Российская Федерация, Октябрьский бульвар, д. 14, офис 6, e-mail: rostovcev@apm.ru).

ЗАМРИЙ Александр Анатольевич — руководитель отдела обучения. ООО НТЦ «АПМ» (141070, Московская область, Королев, Российская Федерация, Октябрьский бульвар, д. 14, офис 6, e-mail: zamriy@apm.ru).

Information about the authors

SHELOFAST Vladimir Vasilyevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Machine Design Principles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vvshelofast@apm.ru).

ROSTOVITSEV Mikhail Yuryevich — Mathematician-programmer. Research and Software Development Centre APM (141070, Korolev, Moscow region, Russian Federation, Oktyabrsky Blvd., Bldg. 14, Office 6, e-mail: com@apm.ru).

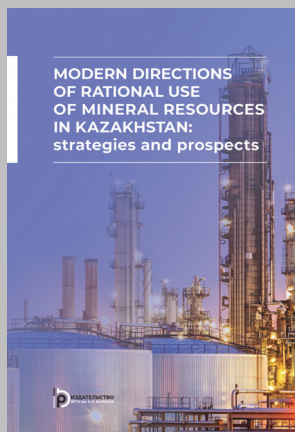
ZAMRY Aleksandr Anatolyevich — Candidate of Science (Eng.), Head of the Training Department. Research and Software Development Centre APM (141070, Korolev, Moscow region, Russian Federation, Oktyabrsky Blvd., Bldg. 14, Office 6, e-mail: zamriy@apm.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Шелюфаст В.В., Ростовцев М.Ю., Замрий А.А. Инструменты и методы анализа усталостного многоциклового стохастического нагружения для оценки точности и надежности численных решений. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 11, с. 31–42, doi: 10.18698/0536-1044-2021-11-31-42

Please cite this article in English as:

Shelofast V.V., Rostovtsev M.Yu., Zamry A.A. Tools and Methods for Analysis of Fatigue High-Cycle Stochastic Loading for Evaluating the Accuracy and Reliability of Numerical Solutions. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 11, pp. 31–42, doi: 10.18698/0536-1044-2021-11-31-42



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию**

«Modern directions of rational use of mineral resources in Kazakhstan: strategies and prospects»

**Авторы: М.Р. Сихимбаев, Е.А. Старожук,
Р.И. Мынжасаров, Д.Р. Сихимбаева**

The monograph is devoted to the study of the fuel and energy complex innovative development problem in Kazakhstan. Theoretical and methodological foundations of innovative development of fuel and energy complex of the country are disclosed, an analysis and prospects of use of innovations and the innovation process in the fuel and energy complex are presented, the necessity of transformation of innovation system in the fuel and energy complex of Kazakhstan is proven and directions of the fuel and energy complex innovative development of Kazakhstan, including specific mechanisms to improve the innovation system of subsoil use of the Republic are offered. The book is intended for researchers, teachers, graduate students, specialists of public services and enterprises dealing with the problems of the fuel and energy complex of Kazakhstan.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@baumanpress.ru; <https://bmstu.press>