

УДК 620.192; 620.178.3

И.В. БИБЛИК

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО СУММИРОВАНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Рассмотрена возможность применения компьютерного моделирования для определения показателей надежности элементов конструкций, эксплуатирующихся в условиях действия спектра нагрузок. Предлагаемый подход основан на вероятностном суммировании усталостных повреждений. При этом вероятностное накопление повреждений рассматривается как мера деградации сопротивления усталости материала и моделируется как нестационарный процесс, который характеризуется зависящими от времени параметрами распределения – математическим ожиданием и дисперсией. Показано, что разработанный подход позволяет проводить оценку показателей надежности элементов конструкций при изменении условий нагружения.

Ключевые слова: многоцикловая усталость, суммирование повреждений, компьютерное моделирование, показатели надежности.

Введение и постановка задачи

Многоцикловая усталость является наиболее частой причиной отказов и предельных состояний элементов конструкций и деталей машин. Поэтому при оценке долговечности конструкции первостепенное значение приобретает оценка времени накопления величины повреждения от начального до некоторого предельного значения.

В большинстве случаев усталостные повреждения возникают при действии переменных напряжений, превышающих предел выносливости. Процесс накопления усталостных повреждений описывается различными моделями. Наиболее часто применяют линейную гипотезу суммирования усталостных повреждений, однако при любых моделях накопление повреждений зависит от амплитуды переменных напряжений.

Вопросам суммирования усталостных повреждений уделяется значительное внимание, развиты различные гипотезы суммирования повреждений [1]. Однако эти гипотезы, как правило, оперируют лишь различными мерами повреждаемости материала, не уделяя при этом достаточного внимания физической картине усталостного разрушения.

Поэтому большое значение приобретает проблема определения областей применимости тех или иных гипотез суммирования. Особенно это относится к гипотезе линейного суммирования повреждений, наиболее упрощенно описывающей физический механизм развития процесса усталости.

Методика оценки и прогнозирования остаточного ресурса с использованием метода линейного

суммирования повреждений, накапливаемых конструктивными материалами оборудования в процессе эксплуатации, известна давно и используется в ряде работ [2]. При этом в качестве критерия наступления предельного состояния, определяющего долговечность конструкции, принимается критическая совокупность имеющихся дефектов и накопленных повреждений.

При детерминированной оценке усталостной прочности от нагружения циклами с различными амплитудами поврежденность, накопленная материалом при данной амплитуде цикла, представляет собой отношение числа циклов нагружения с данной амплитудой к разрушающему числу циклов при этой же амплитуде. При линейном суммировании сумма повреждений от различных режимов равна единице.

В то же время хорошо известно [3], что усталостное разрушение носит ярко выраженный статистический характер. Так, даже при самом строгом соблюдении однородности условий испытаний образцы из одного и того же материала при одинаковых максимальных напряжениях разрушаются, как показывают эксперименты, при существенно различных количествах циклов. Величина разброса увеличивается с уменьшением уровня максимальных напряжений и соответствующим увеличением количества циклов, необходимых для разрушения образца.

В последние годы интенсивно развиваются вероятностные методы расчетов на прочность при напряжениях, переменных во времени. Эти методы основываются на вероятностной оценке рассеяния

усталостных характеристик материала, определяемых путем испытания достаточно большой партии идентичных образцов или изделий на различных уровнях максимальных напряжений цикла.

Необходимость перехода от детерминированного к вероятностному подходу при обосновании циклической прочности и определении ресурса следует именно из-за того, что при различных амплитудах напряжения достижение одного и того же предельного состояния с приблизительно одной и той же вероятностью происходит при различных накопленных усталостных повреждениях.

С переходом на вероятностную методику расчета циклической прочности появляется возможность определить дисперсию разрушающих повреждений в режиме испытаний с постоянной амплитудой цикла. В прежних расчетах на циклическую прочность этот параметр практически не использовался. При вероятностном подходе он становится определяющим, ответственным за оценку прочностной надежности [4].

Целью настоящей работы является оценка возможности применения компьютерного моделирования процесса разрушения материала в условиях действия спектра нагрузок для исследования особенностей процесса накопления усталостной поврежденности и оценки показателей надежности методом вероятностного суммирования усталостных повреждений.

Компьютерное моделирование процесса усталостного разрушения проводилось в рамках разработанного в ИПМаш НАН Украины специального расчетно-экспериментального метода (РЭМ) [5].

В основе РЭМ лежат некоторые положения системной динамики и имитационного компьютерного моделирования. Кроме того, он базируется на экспериментальном определении механических характеристик материала элементов конструкций с учетом режима и условий эксплуатации.

Ранее было показано [6, 7], что РЭМ позволяет не только получать кривые усталости для различных материалов, совпадающие с экспериментальными кривыми, но и оценивать на каждом этапе усталостного нагружения интегральную поврежденность материала независимо от очередности воздействия напряжений различных уровней. При этом в качестве меры повреждений может быть использовано как отношение числа циклов при данной амплитуде напряжения к разрушающему числу циклов, так и относительное число разрушенных структурных элементов в модели материала.

Результаты и их обсуждение

Вначале рассмотрим результаты применения компьютерного моделирования в рамках РЭМ для

вероятностной оценки характеристик сопротивления многоциклового усталости на примере образцов стали 12Х18Н12Т.

На рис. 1 приведены кривые усталости равной вероятности разрушения (σ_A – амплитуда циклического напряжения).

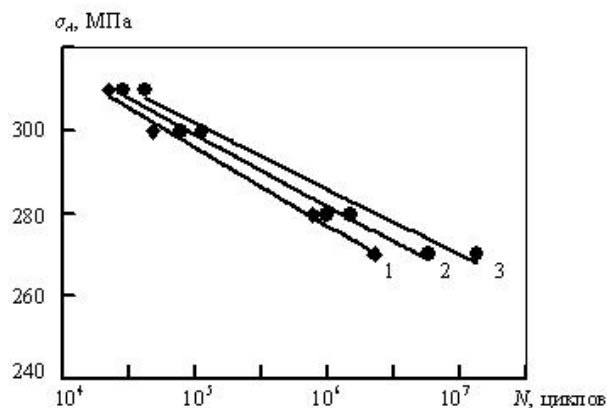


Рис. 1. Кривые усталости для трех значений вероятности разрушения:
1 – 30 %; 2 – 50 %; 3 – 70 %

Для каждой амплитуды цикла модель материала создавалась 50 раз, в каждом случае определялось число циклов до разрушения, N_i , промежуточная поврежденность, $a_i(N)$, и предельная поврежденность a_0 . Полученные ряды чисел циклов до разрушения для каждой амплитуды цикла служили исходной информацией для вероятностной оценки усталостных характеристик материала. Вероятность разрушения R при данном N_i на каждом уровне σ_A вычислялась по формуле

$$R = \frac{i - 0,5}{n}, \quad (1)$$

где i – число образцов, разрушившихся при числе циклов, меньшем N_i ;

n – число образцов, доведенных до разрушения на данном уровне σ_A .

Полученная таким образом зависимость между максимальными напряжениями цикла σ_A , долговечностью N и вероятностью разрушения R представляется в виде семейства кривых усталости, построенных для различных вероятностей разрушения R .

Применение гипотезы линейного суммирования повреждений для определения циклической долговечности при нагружении материала с различными σ_A предполагает использование только средней кривой усталости, соответствующей вероятности разрушения 50 % (кривая 2 на рис. 1). При этом накапливаемое в материале за один цикл повреждение соответствует величине $1/N$, где N – математическое ожидание функции распределения разрушающих чисел циклов для $\sigma_A = \text{const}$.

В то же время, оценка показателей надежности (или циклической долговечности) может быть проведена на основе подхода, использующего в качестве меры поврежденности материала, как уже отмечалось выше, относительное число разрушенных структурных элементов в модели материала РЭМ.

На рис. 2 приведено схематическое изображение изменения усталостной поврежденности (a) в зависимости от числа циклов нагружения (a_0 определяет предельно допустимый уровень поврежденности).

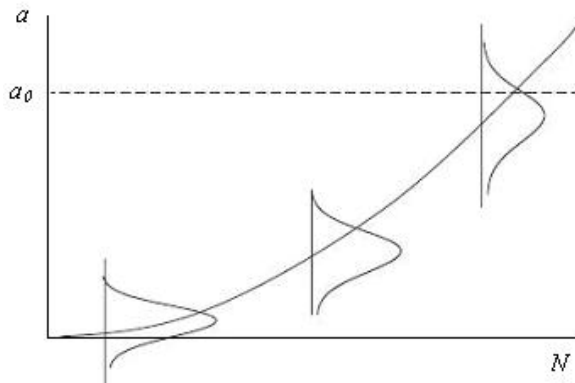


Рис. 2. Вероятностное накопление усталостных повреждений

Под усталостной поврежденностью материала подразумевается необратимое накопление повреждений при циклических воздействиях в течение времени эксплуатации, которое неизбежно ведет к отказу объекта. При этом поврежденность рассматривается как случайная величина, распределенная по нормальному закону, которая характеризуется математическим ожиданием и дисперсией, зависящими от времени (или от числа циклов нагружения).

В качестве примера на рис. 3 приведены полученные с помощью компьютерного моделирования функции распределения предельных повреждений, $F(a_0)$, образцов стали 12X18H12T для двух значений амплитуд цикла (a_0 – число предельных повреждений, отнесенное к общему числу структурных элементов, составляющих модель материала).

Одним из преимуществ компьютерного моделирования, проводимого в рамках РЭМ, является возможность непосредственного определения степени поврежденности материала на любом этапе усталостного нагружения. В связи с этим появляется возможность для произвольного момента времени t (или числа циклов N) определять параметры функции распределения усталостных повреждений (математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение) для действующих на образец или изделие амплитуд цикла.

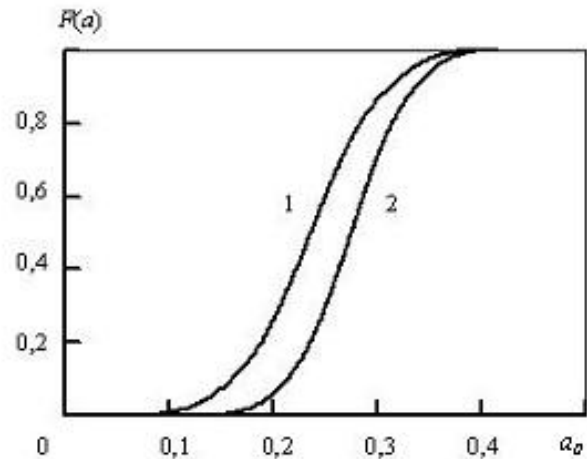


Рис. 3. Функции распределения предельных повреждений для двух амплитуд цикла:
1 – 270 МПа; 2 – 310 МПа

Рассмотрим методологию оценки показателей надежности по критерию накопленной усталостной поврежденности, определяемой в результате компьютерного моделирования.

При заданной предельной степени повреждения a_0 вероятность разрушения будет равна вероятности превышения накопленной за N циклов поврежденностью $a(N)$ предельно допустимого уровня a_0 .

В предположении нормального закона распределения усталостных повреждений на каждом эксплуатационном режиме (при различных σ_A) для вероятности ненаступления предельного состояния (вероятности безотказной работы) можно записать следующее соотношение [8]

$$P(N) = \frac{1}{2} + \Phi \left(\frac{a_0 - a(N)}{\sqrt{s_f^2 + s_N^2}} \right), \quad (2)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-z^2/2} dz$ – функция Лапласа;

$a(N)$ – математическое ожидание усталостной поврежденности при числе циклов, равном N ;

s_f^2 – дисперсия разрушающих повреждений;

s_N^2 – дисперсия повреждений при числе циклов, равном N .

Поскольку РЭМ позволяет определить как математическое ожидание усталостной поврежденности, так и ее дисперсию при любом произвольном числе циклов, с помощью формулы (2) можно получить зависимости $P(N)$ для произвольных значений σ_A . На рис. 4 приведены зависимости вероятности безотказной работы (ВБР), полученные для образцов стали 12X18H12T при трех значениях σ_A (a_0 в формуле (2) принималась равной единице).

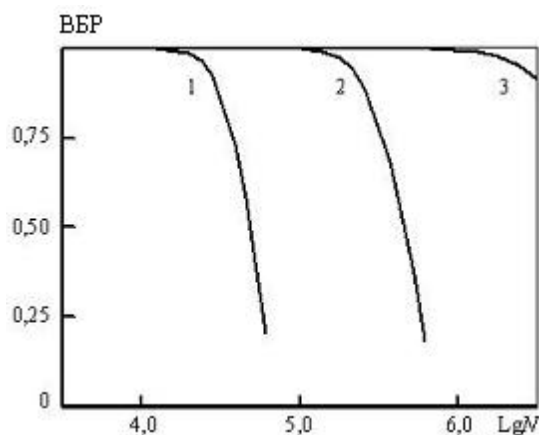


Рис. 4. Зависимости ВБР для трех амплитуд циклического нагружения:
1 – 310 МПа; 2 – 290 МПа; 3 – 270 МПа

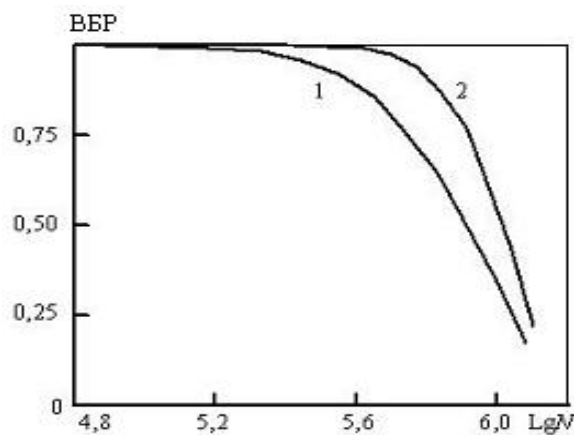


Рис. 5. Зависимости ВБР для двух режимов циклического нагружения:
1 – режим №1; 2 – режим №2

Известно [9], что учёт истории нагружения является важным фактором, влияющим на точность расчёта показателей надёжности. В связи с этим были рассмотрены два режима нагружения, отличающиеся последовательностью σ_A :

- режим №1 – 30000 циклов с $\sigma_A = 310$ МПа; 370000 циклов с $\sigma_A = 290$ МПа и оставшееся до разрушения число циклов (10^6 циклов) с $\sigma_A = 270$ МПа;
- режим №2 – обратная последовательность, т.е. 10^6 циклов с $\sigma_A = 270$ МПа; 370000 циклов с $\sigma_A = 290$ МПа и 30000 циклов с $\sigma_A = 310$ МПа.

В условиях действия спектра нагрузок формула (2) для определения ВБР преобразуется в формулу [10]:

$$P(N) = 1 - \Phi \left(\frac{1 - \sum_{i=1}^n a_i(N_i)}{\sqrt{s_f^2 + \sum_{i=1}^n s_{N_i}^2}} \right), \quad (3)$$

где $\sum_{i=1}^n a_i(N_i)$, $\sum_{i=1}^n s_{N_i}^2$ – математическое ожидание и дисперсия накопленной на n режимах усталостной поврежденности соответственно.

На рис. 5 приведены зависимости ВБР для двух рассмотренных режимов нагружения. Видно существенное отличие в полученных значениях ВБР, что подтверждает вывод о влиянии последовательности нагружения на показатели надёжности. Так, например, при допустимой величине ВБР, равной 0,75, усталостная долговечность составляет от 560 тыс. циклов для режима №1 до 800 тыс. циклов для режима №2. Таким образом, режим нагружения с последовательностью $\sigma_{A1} > \sigma_{A2} > \sigma_{A3}$ приводит к появлению вероятности достижения предельного состояния при значительно меньшем числе циклов, чем для обратной последовательности.

Выводы

Выполненные исследования позволили получить статистические оценки процесса накопления усталостных повреждений. Полученные с помощью компьютерного моделирования кривые усталости равной вероятности разрушения, а также функции распределения повреждений при любом произвольном N предоставляют возможность для существенного сокращения объема испытаний. Показано, что для количественной оценки вероятности достижения предельного состояния при режиме нагрузки с различными амплитудами циклов необходимо применять вероятностные методы оценки циклической прочности.

Для элементов конструкций, работающих в условиях спектра нагрузок, появляется возможность с помощью компьютерного моделирования определять наиболее консервативную функцию прочностной надёжности и по этой функции либо оценивать вероятность разрушения в конце назначенного срока эксплуатации объекта, либо по допустимой вероятности разрушения определять остаточную долговечность или ресурс.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что невозможно качественно улучшить прогноз усталостного ресурса изделий, исходя из общепринятых гипотез линейного суммирования повреждений и независимости повреждающего действия цикла напряжений от его места в общем спектре.

Литература

- 1 Коллинз, Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение [Текст]: пер. с англ. / Дж. Коллинз. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
- 2 Острейковский, В.А. Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций

[Текст] / В.А. Острейковский. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.

3 Троценко, В.Т. Усталость и неупругость металлов [Текст] / В.Т. Троценко. – К.: Наук. думка, 1971. – 268 с.

4 Ковалевич, О.М. Общепромышленный подход и подход при использовании атомной энергии к безопасности [Текст] / О.М. Ковалевич, В.Г. Вережемский // Ядерная и радиационная безопасность. – 2005. – № 4. – С. 10-19.

5 Милешкин, М.Б. Новый метод исследования особенностей механического поведения материалов и оценки прочностной надежности элементов конструкций [Текст] / М.Б. Милешкин, И.В. Библик // Надежность и долговечность машин и сооружений: сб. науч. тр. – Вып. 26. – К., 2006. – С. 302-310.

6 Милешкин, М.Б. Применение специального расчетно-экспериментального метода для исследования кинетики усталостного разрушения материалов и оценки ресурса элементов конструкций

[Текст] / М.Б. Милешкин, И.В. Библик // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: тр. VIII Междунар. науч.-техн. конф. – Х.: ХНПД «ФЭД», 2003. – С. 218-220.

7 Милешкин, М.Б. Применение компьютерного моделирования для оценки усталостной повреждаемости жаропрочных сплавов при многофакторном нагружении [Текст] / М.Б. Милешкин, И.В. Библик // Deformation & Fracture of Materials and Nanomaterials – DFMN 2007: Book of articles. – М., 2007. – Р. 653-655.

8 Когаев, В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени [Текст] / В.П. Когаев. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.

9 Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций [Текст] / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.

10. Probabilistic Modeling of Fatigue Damage Accumulation for Reliability Prediction [Text] / V. Rathod, O.P. Yadav, A. Rathore, R. Jain // Int. J. of Quality, Statistics and Reliability. – 2011. – P. 1-10.

Поступила в редакцию 1.06.2013, рассмотрена на редколлегии 14.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. отделом нестационарных механических процессов Ю.С. Воробьев, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.

ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ НА ОСНОВІ ІМОВІРНІСНОГО ПІДСУМОВУВАННЯ ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ

I.V. Biblik

Розглянуто можливість застосування комп'ютерного моделювання для визначення показників надійності елементів конструкцій, що експлуатуються в умовах дії спектру навантаг. Запропонований підхід заснований на імовірнісному підсумовуванні втомних пошкоджень. При цьому імовірнісне накопичення пошкоджень розглядається як міра деградації опору втомі матеріалу і моделюється як нестационарний процес, який характеризується залежними від часу параметрами розподілу - математичним очікуванням і дисперсією. Показано, що розроблений підхід дозволяє проводити оцінку показників надійності елементів конструкцій при зміні умов навантаження.

Ключові слова: багатоциклова втома, підсумовування пошкоджень, комп'ютерне моделювання, показники надійності.

RELIABILITY ASSESSMENT OF PERFORMANCE BASED ON PROBABILISTIC SUMMATION OF FATIGUE DAMAGES

I.V. Biblik

The possibility of computer simulation using to determine the reliability of structural elements that are operated under the action of loads spectrum is considered. The proposed approach is based on a probability summation of fatigue damages. In this case, the probability damage accumulation is considered as a measure of degradation of the material fatigue resistance and it is modeled as a non-stationary process, which is characterized by time-dependent distribution parameters – mean and variance. It is shown that the developed approach provides an assessment of structural element reliability when the loading conditions are changed.

Key words: high-cycle fatigue, damage summation, computer simulation, reliability.

Библик Ирина Валентиновна – главный инженер-исследователь отдела материаловедения Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: miles@ipmach.kharkov.ua.