

УДК 620.178.3

М.Б. МИЛЕШКИН, И.В. БИБЛИК*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина***ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАССЕЙЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ**

В рамках специального расчетно-экспериментального метода, основанного на компьютерном моделировании механического поведения материалов и элементов конструкций, рассмотрена возможность определения параметров статистического распределения долговечности и предела выносливости металлических материалов. Показано, что на основе полученных результатов возможно для конкретной конструкции в конкретных условиях эксплуатации проводить оценку коэффициентов запаса по числу циклов нагружения и по действующим напряжениям, тем самым обеспечивая существенное сокращение объема испытаний.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, расчетно-экспериментальный метод, многоцикловая усталость, долговечность, предел выносливости.

Введение и постановка задачи

Хорошо известно, что рассеяние характеристик механических свойств материалов и несущей способности конструкций является практически фундаментальным свойством конструкционных материалов и деталей машин. Физико-механические свойства локальных объемов любого технического материала неодинаковы. Несмотря на очевидность и важность учета возможного влияния распределенности механических свойств локальных объемов на механические свойства образцов и элементов конструкций, детального исследования этого влияния не проведено, хотя при оценке механических свойств материалов при статическом, малоцикловом и многоцикловом нагружении широко используются вероятностные характеристики [1 – 3], причем эти характеристики относятся к свойствам образца в целом.

Усталость является основной причиной разрушения многих элементов конструкций энергетических объектов. Особенность усталостного разрушения состоит в том, что оно может иметь длительный инкубационный период, в течение которого выявление признаков приближающегося разрушения затруднительно. Статистическая природа усталости проявляется и в том, что вследствие рассеяния свойств материала число циклов до разрушения одинаковых образцов при одних и тех же параметрах цикла может различаться в несколько раз, значения предела выносливости также могут существенно отличаться. Поэтому число циклов до разрушения при заданных параметрах цикла и предел выносливости являются величинами случайными и

должны характеризоваться не только средним значением, но и законом распределения. Параметры этих распределений, как правило, получают экспериментально путем испытаний на усталость. При этом необходимость статистической обработки результатов вызывает многократное увеличение количества объектов испытаний и их общей продолжительности.

Однако испытания большого количества таких деталей ГТД, как валы и диски, сопряжено с трудностями и высокой стоимостью. В большинстве случаев удается провести испытания лабораторных образцов из материалов деталей ГТД в условиях, лишь приближающихся к эксплуатационным.

Для суждения о несущей способности деталей по этим данным необходимо искать новые методы, которые с достаточной достоверностью отражали бы влияние на сопротивление усталости различных факторов, в том числе, технологии изготовления и физико-механических характеристик материалов.

Целью настоящей работы является анализ рассеяния характеристик сопротивления усталости стальных образцов. Для исследования статистической природы многоцикловой усталости был применен разработанный авторами специальный расчетно-экспериментальный метод (РЭМ) [4], основанный на компьютерном моделировании механического поведения материалов. Как было показано ранее [5], РЭМ позволяет учесть влияние распределенности свойств отдельных мезообъемов материала на прочность и долговечность образцов и элементов конструкций. При этом основополагающим моментом является создание модели материала. В РЭМ модель материала представляет собой массив

структурных элементов с распределенными свойствами (каждому структурному элементу присваивается значение его предельной деформации). В связи с этим предполагалось, что способ создания модели материала – программным путем с двойным использованием генератора случайных чисел (для определения номера структурного элемента массива и для определения значения его предельной деформации) – должен позволить оценить разброс результатов усталостных „испытаний”, а также определить функции распределения числа циклов до разрушения и предела выносливости материала.

Результаты исследования

В качестве материала для исследования была выбрана сталь 20X13, достаточно широко применяемая в энергетическом машиностроении. Механические свойства стали 20X13 при температурах 300 °C и 500 °C приведены в табл. 1. Модули упругости составляли $2,0 \cdot 10^5$ МПа и $1,84 \cdot 10^5$ МПа соответственно.

Таблица 1

Механические свойства стали 20X13 при двух температурах

Температура					
300 °C			500 °C		
$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
390	540	18	360	440	32

Наиболее полное представление о несущей способности деталей ГТД можно получить с помощью семейств кривых усталости, отвечающим требуемым вероятностям разрушения. При прогнозировании сроков службы для заданных условий нагружения необходимо располагать соответствующими функциями распределения пределов выносливости.

Известно [6], что если провести испытания большого количества образцов, можно получить кривые усталости для разных значений вероятности разрушения. Такие кривые позволяют описать полосу разброса с указанием верхней и нижней границ работоспособности материала и статистически обосновать нормативное значение запаса усталостной прочности, которое обеспечивает неразрушение конструкции в пределах назначенного срока службы.

В качестве примера на рис. 1 приведены полученные с помощью РЭМ кривые усталости (зависимости амплитуды цикла σ_A от логарифма числа циклов до разрушения) для трех значений вероятности разрушения (1 – 20%, 2 – 40% и 3 – 80%) образцов стали 20X13 при $T = 500$ °C.

С помощью кривых усталости, аналогичных приведенным на рис. 1, можно получить функции плотности распределения долговечности для различных σ_A . Проведенные с помощью РЭМ расчеты показали, что функции плотности распределения долговечности образцов стали 20X13, также как и функции плотности распределения пределов выносливости, подчиняются нормальному закону.

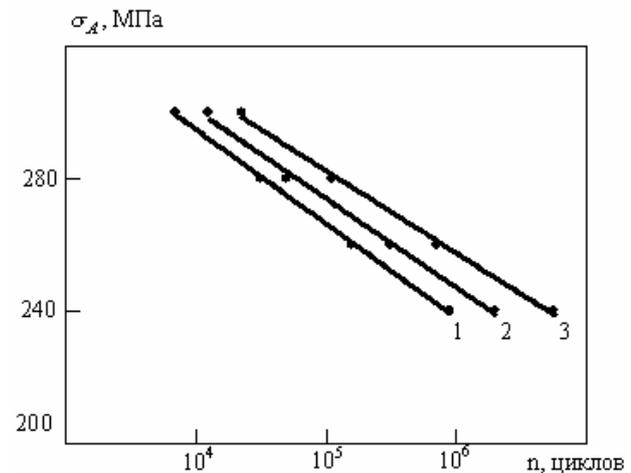


Рис. 1. Кривые усталости стали 20X13 для трех значений вероятности разрушения

На рис. 2 приведены кривые плотности распределения числа циклов до разрушения для образцов стали 20X13 ($T = 500$ °C) при двух амплитудах цикла – 300 МПа (кривая 1) и 240 МПа (кривая 2), а на рис. 3 – кривые плотности распределения пределов выносливости этих же образцов при двух температурных уровнях – 500 °C (кривая 1) и 300 °C (кривая 2).

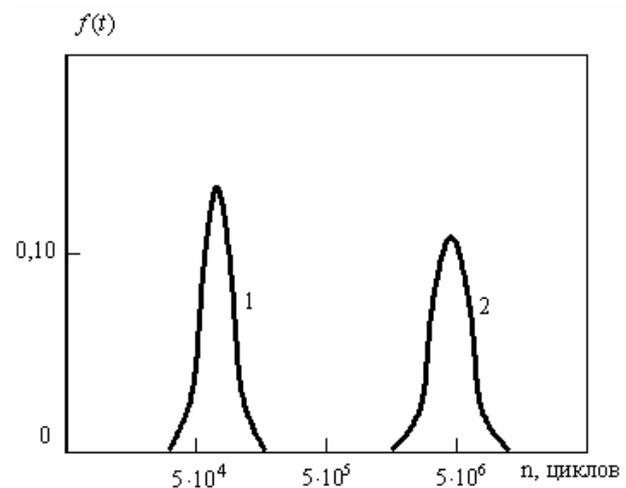


Рис. 2. Функции плотности распределения числа циклов до разрушения

Из рис. 2 видно, что по мере приближения σ_A к пределу выносливости среднее квадратическое отклонение

нение числа циклов до разрушения возрастает.

Из приведенных на рис. 2 результатов видно, что с переходом на вероятностную методику расчета циклической прочности металлических материалов [6] среднее квадратическое отклонение разрушающих чисел циклов, которое характеризует дисперсию разрушающих повреждений в режиме испытаний с постоянной амплитудой σ_A , становится определяющим параметром. Поскольку для практически полного предупреждения наступления предельного состояния коэффициент запаса по долговечности должен определять допустимое значение, как минимум за пределами трех среднее квадратических отклонений нормального распределения числа циклов до разрушения.

Что касается определения коэффициента запаса по напряжениям, то в принципе кривые плотности распределения двух случайных величин – амплитуды действующих на элемент конструкции переменных напряжений и предела выносливости (рис. 3) могут пересекаться. Это означает, что существует вероятность превышения действующими напряжениями предела выносливости, несмотря на то, что средние их значения значительно ниже среднего предела выносливости. Эта вероятность увеличивается с увеличением дисперсий и уменьшается с увеличением средних значений σ_A и σ_{-1} .

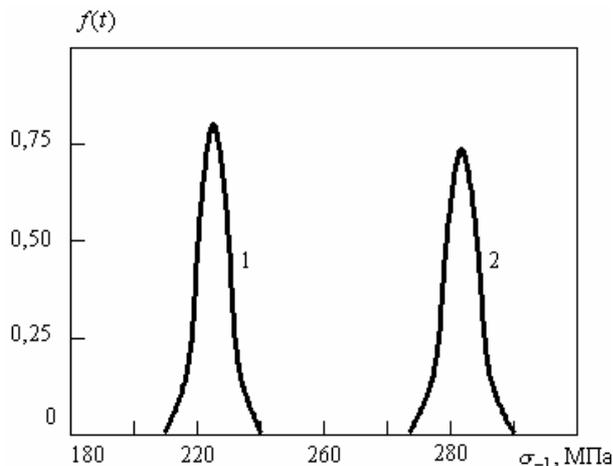


Рис. 3. Функции плотности распределения пределов выносливости

По допустимой вероятности разрушения элемента конструкции можно определить необходимый для этого коэффициент запаса по напряжениям. Естественно, что для этого необходимо, кроме данных о параметрах распределения предела выносливости, иметь статистически достоверные данные о параметрах распределения действующих переменных напряжений.

С помощью функции распределения числа циклов до разрушения $F(t)$ для заданной амплитуды

цикла можно также определить с какой вероятностью наступит предельное состояние у аналогично нагружаемого образца или объекта и оценить ресурс, соответствующий вероятности γ достижения предельного состояния. Рассмотрим приведенную на рис. 4 функцию распределения числа циклов до разрушения $F(t)$ при компьютерном усталостном нагружении с амплитудой цикла 240 МПа образцов стали 20X13 при температуре 500 °С.

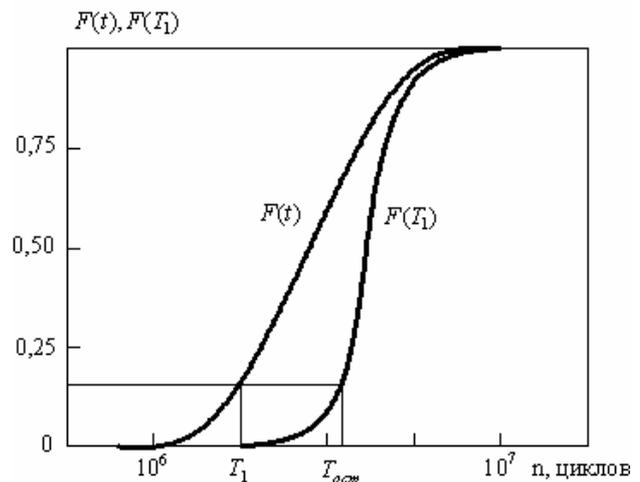


Рис. 4. Функции распределения $F(t)$ и $F(T_1)$

Для заданной вероятности γ достижения предельного состояния ресурс определяется значением T_1 . Если же γ не задана, а конструкция доработала до момента T_1 , при котором необходимо определять остаточный ресурс, то в этом случае кривая $F(t)$ перестраивается от момента T_1 следующим образом [7]:

$$F(T_1) = \frac{F(t) - F(T_1)}{1 - F(T_1)},$$

где $F(T_1)$ – значение $F(t)$ при T_1 .

При этом остаточный ресурс $T_{ост}$ определяется от момента T_1 , соответствующего нулевому значению $F(T_1)$.

Выводы

Выполненные исследования позволили получить статистические оценки числа циклов до разрушения и предела выносливости для образцов исследованной стали при двух температурных уровнях.

С помощью полученных функций распределения долговечностей и пределов выносливости возможно проводить оценку коэффициентов запаса по числу циклов нагружения и по действующим напряжениям, тем самым обеспечивая существенное сокращение объема испытаний.

Показано, что по определенной с помощью РЭМ функции распределения долговечности можно проводить оценку ресурса конструкции при проектировании (по известной γ) и остаточного ресурса в процессе эксплуатации.

Литература

1. Вероятностные характеристики прочности авиационных материалов и размеров сортамента: справочник / А.А. Кузнецов, О.М. Алифанов, В.И. Ветров, А.А. Золотов, М.И. Титов. – М.: Машиностроение, 1970. – 568 с.

2. Статистические закономерности малоциклового разрушения / Н.А. Махутов, В.В. Зацаринный, Ж.Л. Базарас и др.. – М.: Наука, 1989. – 252 с.

3. Троценко В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник / В.Т. Троценко, Л.А. Сосновский. – К.: Наук. думка, 1987. – 512 с.

4. Милешкин М.Б. Основы применения специ-

ального расчетно-экспериментального метода для оценки несущей способности элементов конструкций и исследования особенностей их разрушения / М.Б. Милешкин, И.В. Библик // Вісник Інженерної Академії України. – К., 2001. – № 3. – С. 126-129.

5. Милешкин М.Б. Исследование влияния статистического распределения механических свойств структурных элементов материала на конструкционную прочность и ресурс / М.Б. Милешкин, И.В. Библик // Надежность и долговечность машин и сооружений. – К., 2004. – № 2. – С. 75-80.

6. Ковалевич О.М. Общепромышленный подход и подход при использовании атомной энергии к безопасности / О.М. Ковалевич, В.Г. Веземский // Ядерная и радиационная безопасность. – 2005. – № 4. – С. 10-18.

7. Веземский В.Г. Вероятностный подход к определению остаточного циклического ресурса трубопроводов / В.Г. Веземский // Теплоэнергетика. – 2001. – № 12. – С. 41-46.

Поступила в редакцию 1.06.2010

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

ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ РОЗСПОВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРУ ВТОМИ

М.Б. Милешкин, І.В. Біблік

У рамках спеціального розрахунково-експериментального методу, заснованого на комп'ютерному моделюванні механічної поведінки матеріалів і елементів конструкцій, розглянуто можливість визначення параметрів статистичного розподілу довговічності і межі витривалості металевих матеріалів. Показано, що на основі отриманих результатів можливо для конкретної конструкції в конкретних умовах експлуатації проводити оцінку коефіцієнтів запасу за числом циклів навантаження і за діючими напруженнями, тим самим забезпечуючи істотне скорочення обсягу іспитів.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, розрахунково-експериментальний метод, багатоциклова втома, довговічність, межа витривалості.

COMPUTER MODELLING APPLICATION FOR THE ESTIMATION OF FATIGUE RESISTANCE CHARACTERISTIC DISPERSION

M.B. Mileszkin, I.V. Biblik

Within the framework of the special design-experimental method based on computer modelling of mechanical behaviour of materials and elements of designs, the opportunity of definition of statistical distribution parameters of life and fatigue limit of metal materials is considered. It is shown, that on the basis of the received results probably for a concrete design at service conditions to carry out an estimation of safety factors on number of loading cycles and on working stresses, thus providing essential decrease of tests.

Key words: computer modelling, design-experimental method, multicyclic fatigue, fatigue life, fatigue limit.

Милешкин Михаил Борисович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: miles@ipmach.kharkov.ua.

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.