

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА УСКОРЕННЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Ромашов Р.В.

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

В последние годы проблема ускоренного определения предела выносливости материалов приобрела особое значение, так как на предприятиях и в проектных организациях чаще всего нет возможностей проводить длительные и дорогостоящие испытания на усталость как образцов материалов, так и натуральных элементов конструкций. Тем не менее, развитие современной науки и техники в области авиации, ракетно-космической техники, атомной энергетики и других отраслей требует расширения круга вопросов, подлежащих исследованию в области усталости материалов.

Информация, даваемая классическими, длительными испытаниями на усталость, иногда теряет свою ценность из-за несвоевременности ее получения. Между тем, приближенные данные ускоренных испытаний могут быть вполне достаточными для оперативных решений по совершенствованию конструкций и освоению их производством в сжатые сроки. Считается [1], что трудоемкость ускоренных испытаний составляет 5...10% трудоемкости классических, а продолжительность на порядок, а то и на два порядка меньше. Они могут успешно применяться для приближенной оценки сопротивления усталости новых материалов в процессе их разработки и для контроля качества материала при его массовом производстве и применении.

Несмотря на большое разнообразие ускоренных методов усталостных испытаний, единой общепризнанной классификации их нет. Кроме того, ни один из известных методов в полной мере не удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к таким испытаниям. В данной работе в сжатой форме рассмотрены только те методы, которые с нашей точки зрения могут представлять определенный практический интерес и которые применялись в наших исследованиях.

Большое применение находят методы, основанные на испытаниях при изменяющемся уровне нагружения [1,2]. При этом амплитуда переменных напряжений в процессе испытания образца или детали монотонно (плавно или дискретно) или по определенной программе изменяется по мере наработки. Следует отметить методы Про, Эномото, Локати и др. В частности, метод Локати, благодаря более высокой точности и производительности, был принят в качестве объекта стандартизации (ГОСТ 19533-74), что предопределило особое место этого метода среди остальных. Метод Локати предполагает испытание одного или нескольких объектов при ступенчатом увеличении нагрузки. Метод основан на гипотезе Пальмгрена-Майнера о линейном характере накопления усталостного повреждения материала, согласно которой степень повреждения материала пропорциональна отношению циклов нагружения при данном уровне напряжения n_i к долговечности N_i при этом

уровне напряжения в условиях постоянной амплитуды, то-есть условие разрушения можно записать в виде:

$$\sum_1^k \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (1)$$

где k - число уровней напряжений, при которых проводятся испытания.

Результаты испытаний наносятся на график в координатах $\sum \frac{n_i}{N_i} - \sigma_R$ (σ_R - ожидаемые значения предела выносливости). Значение предела выносливости, соответствующее сумме относительных повреждений, равной единице, и будет искомым пределом выносливости σ_R .

Однако, некоторые исследователи установили, что не для всех материалов выдерживается условие разрушения (1). В правой части уравнения вместо единицы поставили константу « a », при этом величина ее в зависимости от свойств материала и программы нагружения может колебаться в весьма широком интервале: $a = 0,2...5$. Поэтому метод Локати рекомендуется использовать для контрольных испытаний партий материала или деталей, для которых на основании ранее проведенных исследований ориентировочно известны предел выносливости и величина константы a .

В особую группу ускоренных методов определения пределов выносливости можно отнести методы, основанные на зависимостях различных энергетических параметров от амплитуды напряжений. Ранее наиболее известным считался метод Лера, когда образец из исследуемого материала подвергается циклическому нагружению при постоянном увеличении нагрузки. При этом непрерывно измеряется температура образца, его прогиб, крутящий момент, расходуемая мощность и др. При напряжении, близком к пределу выносливости, эти параметры могут интенсивно возрастать. Проведенные в Институте проблем прочности АН Украины многочисленные исследования [3] показывают, что перспективным является метод, основанный на изменении характеристик неупругости металлов в процессе циклического нагружения. Такими характеристиками могут служить величина неупругой деформации $\Delta\varepsilon$ за один цикл (равная ширине петли динамического гистерезиса), а также энергия D , необратимо поглощенная материалом за один цикл (равная площади петли гистерезиса).

Нами были проведены эксперименты [4] по определению пределов выносливости по началу проявления энергетических эффектов при ступенчатом увеличении нагрузки на образце. На шести марках сталей измерялись температура разогрева образца ΔT °C, неупругая деформация $\Delta\varepsilon$ за один цикл и скорость накопления скрытой энергии циклических деформаций \dot{i}_e при увеличении амплитуды циклических напряжений. Результаты обработки опытных данных показывают, что указанные энергетические эффекты начинают проявляться при напряжении, близком к пределу выносливости материала, при этом наиболее близкое совпадение получается при анализе силовых зависимостей \dot{i}_e : погрешность в этом случае составляет $\pm 2...3\%$. При

использовании других энергетических параметров точность может уменьшаться до 10 %. Это объяснимо с физической точки зрения: при $\sigma_a = \sigma_R$ накопление скрытой энергии идет столь медленно и незначительно, что можно считать $\dot{u}_e = 0$, то-есть скрытая энергия не может достичь критических значений при любом неограниченно большом числе циклов деформаций.

Недостатками энергетических методов можно считать следующие:

- проведение экспериментов требует высокой квалификации исполнителей и сложной измерительной техники;
- наибольшая точность получается лишь для отожженных и нормализованных сталей, а для высокопрочных сталей (например, 30 ХГСА – низкий отпуск) энергетические эффекты (температура разогрева, ширина петли гистерезеса и др.) проявляются слабо, и требуется повышать чувствительность измерительной аппаратуры.

В литературе имеется большое количество работ, посвященных установлению корреляции величин пределов выносливости с характеристиками механических свойств (пределом прочности, пределом текучести, твердостью и др.). Ни одна из этих зависимостей не является универсальной и их следует использовать с большой осторожностью из-за большой чувствительности предела выносливости к влиянию различных технологических, конструктивных и эксплуатационных факторов, что не учитывается указанными зависимостями.

На основе эргодинамических представлений о повреждаемости и разрушении материалов установлено, что представляется возможным установить корреляцию между пределом выносливостью и твердостью [5]. Измерение твердости не требует изготовления образцов и в ряде случаев может осуществляться на реальных деталях без их разрушения. Исследованиями многих ученых получено большое количество корреляционных зависимостей между твердостью и различными механическими характеристиками: пределами прочности и текучести, истинным сопротивлением разрыву и др. Наиболее физически обоснованно использовать корреляцию с твердостью истинных характеристик прочности, учитывающих неравномерность и сложность напряженного состояния в шейке образца, испытываемого на растяжение.

Нами ранее устанавливалась связь между пределом выносливости и характеристиками статической прочности, исходя из дифференциального кинетического уравнения состояния твердого тела, описывающего интенсивность (скорость) изменения плотности скрытой энергии \dot{u}_e в деформируемом элементе тела [6]. На основании анализа этого уравнения для случая циклического нагружения получено выражение для предела выносливости:

$$\sigma_R = \frac{1}{M_R} \left(\frac{u_e^*}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где M_R - коэффициент эквивалентности между постоянным напряжением σ и амплитудой циклического напряжения σ_a , то есть $\sigma = M_R \cdot \sigma_a$;

u_e^* - критическое (к моменту разрушения) значение плотности скрытой энергии.

Согласно современным дислокационным представлениям с накоплением в материалах скрытой энергии связано напряжения течения $S_0 : u_e^* = \alpha \cdot S_{0*}^2$. Напряжение течения можно определять через истинное сопротивление разрыву S_k по формулам Давиденкова Н.Н. или Бриджмена П. Однако, для практических целей удобнее использовать график Бриджмена П., выражающий зависимость отношения S_0/S_k от истинной деформации в шейке $e = \ln \frac{1}{1 - \psi_k}$

(ψ_k - коэффициент поперечного сужения). С учетом вышеуказанного, получены расчетные зависимости предела выносливости для сталей:

- для симметричного растяжения-сжатия $\sigma_{-1} = 0,191 \cdot S_k \cdot f(\psi_k)$;

- для симметричного изгиба $\sigma_{-1} = 0,288 S_k \cdot f(\psi_k)$,

где функция $f(\psi_k) = S_0/S_k$ определяется по графику Бриджмена П. Погрешность при расчете пределов выносливости составляет $\pm 3,5\%$ (в отдельных случаях до 10%). Следует отметить, что расчетные формулы получены не эмпирическим путем, как это делалось различными исследователями, а с использованием определенных физических представлений, основанных на энергетическом подходе к проблеме разрушения.

Выполненный краткий анализ ускоренных методов определения пределов выносливости показывает их большое разнообразие и количество (несколько десятков методов), а также необходимость дифференциального подхода к выбору метода применительно к решаемой задаче. Недостатком большинства методов является формальный подход и недостаточное внимание к исследованию кинетики накопления усталостного повреждения в различных классах материалов. Это не позволяет четко ограничить область применения методов и в ряде случаев приводит к несоответствию расчетных и экспериментальных результатов.

Список литературы

1. **Олейник, Н.В.** Ускоренные испытания на усталость / Н.В. Олейник, С.П. Скляр – Киев: Наукова думка, 1985. – 304 с.
2. **Школьник, Л.М.** – Методика усталостных испытаний / Л.М. Школьник – М.: Металлургия, 1978. – 302 с.
3. **Троценко, В.Т.** -Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении /В.Т. Троценко – Киев: Наукова думка, 1981. – 344 с.
4. **Ромашов, Р.В.** Исследование связи усталостного разрушения с энергетическими характеристиками процесса циклического деформирования металлов. Кандидатская диссертация / Р.В. Ромашов – Л.: Ленингр. политехн. институт, 1978 – 213 с.
5. **Ромашов, Р.В.** Определение предела выносливости с учетом модифицированного поверхностного слоя / Р.В. Ромашов, С.Н. Барышов, А.М. Щипачев // Вестник Оренб.гос.унив-та. – Оренбург: ОГУ, 2001. - №4 – С. 80-82.

6. **Ромашов, Р.В.** *О связи характеристик усталости с истинным сопротивлением пластической деформации по Давиденкову Н.Н./ Р.В. Ромашов// Сб. материалов XIX Петербургских чтений по проблемам прочности. Часть 1 – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2010. – С.225-227 – JSBN978-5-98340-235-5.*