

УДК 539.43: 669.14

Канд. техн. наук С. А. Беженев

Национальный технический университет, г. Запорожье

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Предложена методика ускоренного определения характеристик сопротивления усталости конструкционных металлических материалов, основанная на структурно-детерминистской концепции усталости.

Ключевые слова: многоцикловая усталость, долговечность, предел выносливости, кривая усталости, вероятность разрушения.

Введение

Основным фактором воздействия на материал инженерных конструкций является внешняя нагрузка, в подавляющем большинстве случаев действующая циклически и вызывающая в материале процесс усталости. Способность материала сопротивляться усталости оценивают по зависимости числа циклов до разрушения N от действующего в материале уровня напряжения σ_a , графическое изображение которой называют кривой усталости. По указанной зависимости производят оценку работоспособности материала на основе тех или иных параметров, называемых характеристиками сопротивления усталости. Проблема низкой эффективности существующих методик определения характеристик сопротивления усталости, основанных на разработанных к настоящему времени теориях усталости, имеет много аспектов, каждый из которых характеризуется своими целями и требует отдельного исследования. Одним из них является ме-

тодический аспект, которому в последнее время уделяется все большее внимание.

Постановка задачи

В настоящее время определение характеристик сопротивления усталости регламентируется государственными стандартами [1–5]. Одной из основных характеристик согласно [2] является медианное значение предела выносливости $\bar{\sigma}_{-1}$. Для построения кривой распределения предела выносливости образцы испытываются на шести уровнях напряжения. Причем на каждом уровне испытывается не менее 15 образцов и более половины из них испытываются до базы испытаний, что требует больших затрат времени, материальных и трудовых ресурсов. Кроме того, существенным недостатком является то, что медианное значение предела выносливости неоднозначно определяет сопротивление усталости материала, так как не менее важным фактором при этом выступает степень

разброса его значений. Значительное рассеивание результатов испытаний наблюдается при разных схемах нагружения, для разных материалов и для любых условий испытаний и существенно влияет на точность определения характеристик сопротивления усталости. Согласно [6, 7], в области многоциклового усталости наблюдаемые в опыте значения долговечностей при одинаковых уровнях напряжений могут отличаться в сотни раз.

Существующие ускоренные методы определения характеристик сопротивления усталости, основанные на испытаниях малых выборок, являются малоэффективными в аспекте точности определения параметров и оценке погрешности полученных результатов. Повышение эффективности определения работоспособности конструкционных металлических материалов в условиях действия циклических нагрузок возможно на основе новых подходов к исследованию процесса усталости. В последнее время разрабатывается структурно-детерминистская концепция процесса усталости [8, 9], которая дает возможность предложить более эффективные и надежные методики определения характеристик сопротивления усталости.

Целью работы является разработка методики ускоренного определения характеристик сопротивления усталости металлических материалов, обеспечивающей заданную точность определения параметров.

Теоретические основы методики

В настоящее время в инженерной практике широко используется вероятностная модель аппроксимации результатов испытания на усталость с применением двухпараметрического уравнения:

$$\sigma_a^m \cdot N = \text{const}, \quad (1)$$

где σ_a – амплитуда напряжений цикла, N – число циклов до разрушения, m – показатель наклона кривой усталости в двойных логарифмических координатах. Для обеспечения общности математического описания поведения широкого класса материалов структурные особенности материала в этой модели игнорируются. Коэффициенты m и C считаются структурно независимыми и принимают разные значения только для различных классов материалов.

Правомерно предположить, что в процессе испытания номинально идентичных, но фактически разных образцов при изменении уровня напряжения изменения остальных внешних воздействий являются несущественными и на изменение уровня рассеивания результатов испытаний существенно не влияют. Следовательно, основной причиной изменения величины рассеивания результатов испытаний на усталость при изменении уровня напряжения является различный темп накопления повреждений в материалах, находящихся в разном техническом состоянии, характеризующим коэффициентом m в уравнении (1).

Не вызывает сомнения, что при номинально одинаковых макроусловиях технологических процессов получения слитка и его дальнейшей обработки микроусловия для его микрообъемов не являются одинаковыми. Следовательно, микроструктура и напряженное состояние отдельных микрообъемов материала одного изделия не одинаковы. Тем более, в разном техническом состоянии будут находиться как микро-, так и макрообъемы материалов разных слитков и поковок. Из этого следует, что на усталость испытываются изделия, материалы которых находятся в разном техническом состоянии, что существенно влияет на их характер механического поведения в условиях многоциклового усталости, а следовательно, и на рассеивание результатов испытаний. Не вызывает также сомнений некоторое изменение внешних условий испытания объектов, что также влияет на рассеивание результатов испытаний, но их связь с величиной напряжений не отмечается. Типичные результаты массовых испытаний на усталость [6, 7, 10, 11] имеют закономерность увеличения рассеивания результатов с уменьшением разрушающего напряжения. При этом можно провести прямые линии по минимальным и максимальным значениям долговечностей, которые пересекутся в некоторой точке, условно называемой полюсом диаграммы усталости всех испытанных образцов. Точки, расположенные на каждой из этих прямых, характеризуют одинаковый уровень сопротивления усталости образцов: в первом случае – минимальный, во втором – максимальный.

Такой подход к анализу результатов испытаний дает основание считать, что сопротивляемость усталости каждого конкретного образца характеризуется своим углом наклона прямой к оси ординат, проведенной из общей точки (полюса) кривых усталости материала определенного химического состава через соответствующую точку данных испытаний. При таком подходе случайными, т. е. плохо контролируруемыми, являются свойства материала конкретных изделий, а их способность сопротивляться усталости является величиной детерминированной, зависящей от фактической микро- и макроструктуры материала испытываемого объекта. Структурно-детерминистская концепция усталости конструкционных материалов дает возможность представить адекватную математическую модель их поведения в условиях многоциклового усталости. При этом результаты испытаний на усталость аппроксимируются той же формулой (1), но она рассматривается уже как трехпараметрическое уравнение, в котором переменным является также коэффициент m , характеризующий техническое состояние материала конкретной детали. В двойных логарифмических координатах формула (1) принимает вид уравнения:

$$m \cdot \lg \sigma_a + \lg N = \lg C, \quad (2)$$

где коэффициент C имеет постоянное значение лишь

для конкретного матеріала в заданому технічному стані, т.е. при виконанні умови $m = \text{const}$.

С позицій изложеного підходу крива усталості конструкційних металічних матеріалів в області багатоциклової усталості в подвійних логарифмічних координатах представляє собою частину прямої, що проходить через полюс під кутом $\arctg m$ к осі напружень. При цьому рівняння кривої усталості в подвійних логарифмічних координатах представляється в вигляді [9]:

$$\lg \sigma_a = \lg \sigma_p - \frac{1}{m} (\lg N - \lg N_p), \quad (3)$$

де N_p і σ_p – координати полюса діаграми усталості. Тоді для побудови кривої усталості необхідно і достатньо визначити три параметри: координати полюса, межі області багатоциклової усталості, кут нахилу кривої усталості по величині коефіцієнта m .

Визначення координат полюса кривих усталості і граничних значень числа циклів для області багатоциклової усталості N_k і N_G

Координати полюса N_p і σ_p в загальному випадку визначаються точкою перетину ліній, проведених через точки рівної ймовірності руйнування зразків, випробуваних на різних рівнях напружень. Проведеними дослідженнями [8, 12–14] встановлено, що координати полюсів кривих усталості для сплавів на основі заліза, нікелю і титану практично однаково $\lg \sigma_p \approx 3,0$. Абсциси полюсів в значительній ступені залежать від хімічного складу конструкційних металічних матеріалів і практично не залежать від їх технічного стану. В таблиці 1 наведено експериментально отримані значення координат полюсів кривих усталості для деяких найбільш часто використовуваних в машинобудуванні сплавів.

Таблиця 1 – Значення координат полюса діаграм усталості для матеріалів різних класів

| матеріал | $\lg \sigma_p$ | $\lg N_p$ |
|--------------------|----------------|-----------|
| Сталь 20 | 3,021 | 2,000 |
| Сталь 45 | | 1,778 |
| Сталь У7А | | 1,041 |
| Сталь 40Х | 3,041 | 2,903 |
| Сталь 30ХГСА | | 2,699 |
| Сталь 40ХН2МА | | 2,447 |
| ХН77ТЮР-ВД | 3,000 | 3,010 |
| ВТ8 | 2,991 | 3,021 |
| ОТ 4-1, ВТ18, ВТ22 | | 3,000 |

Межі багатоциклової усталості нормативними матеріалами строго не регламентуються. В роботах [11, 15] приводиться огляд робіт, в яких показано,

що перехід від малоциклової к багатоциклової усталості часто пов'язаний з зміною форми кривої усталості – наявністю перегибу або навіть розриву кривої, що обумовлено зміною напруженого стану матеріала. В роботі [11] показано, що при певному критичному напруженні σ_k змінюється локальне напружене стану у вершині тріщини. При цьому встановлено, що початкові значення області багатоциклової усталості (N_k) різних сплавів визначаються металом, що складає їх основу. В таблиці 2 наведено значення N_k елементів, що складають основу найбільш поширених конструкційних металічних матеріалів.

Таблиця 2 – Значення критичного числа циклів для деяких металів [11]

| Металл | Fe | Ni | Cr | Co | W | Mo | Al | Mg | Ti |
|---------------------------------|----------|------|------|------|----|----|-----|-----|-----|
| $N_k \cdot 10^{-4}$, циклів | 20, 0 | 18,9 | 19,0 | 19,7 | 56 | 38 | 2,3 | 1,1 | 7,1 |

Аналіз поведінки кривих усталості, отриманих різними дослідниками, показує, що у сплавів, що мають фізичний межу вичерпаності, після точки перелому з координатами σ_G і N_G крива усталості практично горизонтальна, а її можливі відхилення знаходяться в межах похибки оцінки зовнішнього навантаження. Згідно [3], величина N_G в більшості випадків коливається в межах від 10^6 до $3 \cdot 10^6$ циклів. Рекомендовано для сплавів на основі заліза розрахункове значення N_G прийняти рівним $N_G = 2 \cdot 10^6$ циклів. Для сплавів, що не мають явно вираженого горизонтального сегмента кривої багатоциклової усталості, до яких відносяться, наприклад, сплави на основі нікелю, значення граничного числа циклів N_G цілком природно прийняти рівним $N_{base} = 10^7$ циклів, що відповідає, згідно [2], базі для порівняльних випробувань для визначення меж вичерпаності таких матеріалів. Криві усталості сплавів на основі титану в області $\lg N > \lg N_k$ мають два сегменти: нахилений і близький до горизонтального. При цьому точка перелому вказаної залежності знаходиться в діапазоні значень довговічності приблизно $3 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^5$ циклів навантаження [13]. С достатньою ступеню точності можна прийняти для титанових сплавів $\lg N_G = 5,6$ ($N_G \approx 4 \cdot 10^5$ циклів).

Визначення показателя ступеня рівняння кривої усталості

В межах структурно-детерміністської концепції усталості коефіцієнт m в рівнянні (3) не залежить від рівня напружень при випробуванні і є величиною

личной стохастической, определяемой механическими испытаниями на усталость. Согласно [2] необходимое количество образцов определяют по относительной ошибке для среднего значения исследуемой величины, используя формулу (4), и по относительной ошибке для среднего квадратичного отклонения величины, используя формулу (5):

$$n \geq \frac{v^2}{\Delta_{\bar{m}}^2} \cdot Z_{1-\alpha/2}^2; \quad (4)$$

$$n \geq 1,5 + \frac{1}{2\Delta_{\bar{s}}^2} \cdot Z_{1-\alpha/2}^2. \quad (5)$$

Здесь α – вероятность ошибки первого рода, которую выбирают в пределах 0,05...0,1; $\Delta_{\bar{m}}$ и $\Delta_{\bar{s}}$ – предельные относительные ошибки для доверительной вероятности $P = 1 - \alpha/2$ соответственно при определении средней величины \bar{m} и среднего квадратичного отклонения \bar{s} , значение которых принимают в пределах $\Delta_{\bar{m}} = 0,02 \dots 0,1$ и $\Delta_{\bar{s}} = 0,1 \dots 0,5$; $v = \bar{s}/\bar{m}$ – коэффициент вариации; $Z_{1-\alpha/2}$ – квантиль нормированного нормального распределения, для вероятности $P = 1 - \alpha/2$, значение которой для наиболее часто принимаемых значений α определяется из таблицы 3.

Таблица 3 – Значения квантили нормированного нормального распределения для наиболее часто применяемых значений α [2]

| α | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,10 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|
| $Z_{1-\alpha/2}$ | 1,96 | 1,88 | 1,81 | 1,75 | 1,70 | 1,64 |

При ограниченном количестве образцов испытания на усталость проводят на разных уровнях напряжений, пошагово уменьшая их, начиная со значения $\sigma_{a1} = 0,5 \dots 0,6 \sigma_g$. Шаг изменения напряжений согласно [2] рекомендуется принимать равным 20 МПа. В процессе испытания шаг может быть изменен. Напряжение в испытуемых образцах понижают до достижения базы испытаний для сплавов железа $N_{base} = 10 \cdot 10^6$ и $N_{base} = 100 \cdot 10^6$ для цветных металлов. Оставшиеся из выборки образцы продолжают пошагово испытывать при увеличении напряжения испытаний.

Значения коэффициента m для каждого образца рассчитывают по формуле

$$m_i = \frac{\lg N_i - \lg N_p}{\lg \sigma_p - \lg \sigma_{ai}} \quad (6)$$

и делают статистический анализ вариационного ряда полученных значений m .

Используя медианное значение коэффициента m и его доверительные интервалы для принятой вероят-

ности разрушения, проводят из полюса с известными координатами медианную кривую усталости, а также нижнюю и верхнюю границы рассеивания значений параметра m . Пересечение указанных линий с вертикалью, соответствующей значению $\lg N_G$, дает расчетные значения σ_G для соответствующих кривых усталости. Для подтверждения положения точки перегиба кривой усталости испытуемого материала следует испытать несколько образцов при напряжениях $\sigma_a = (1,05 \dots 0,95) \sigma_G$ до числа циклов, превышающих верхнюю границу рассеивания результатов испытаний. При этом не менее трех образцов не должно разрушиться.

Точность расчета максимально допустимого напряжения (эквивалента пределу выносливости) оценивается по кривым усталости как размах напряжений $\Delta(\sigma_G)$, соответствующий верхней и нижней границам рассеивания результатов испытаний при числе циклов $N = N_G$. Точность прогнозирования долговечности на заданном уровне напряжений σ_a оценивается соответствующим размахом $\Delta(N_{\sigma})$, определяемым границами рассеивания результатов испытаний.

При определении работоспособности материала следует принимать во внимание вероятностный характер кривых усталости. При этом практическое значение имеет нижняя часть кривых усталости до медианного ее значения. Предельное состояние материалов, обеспечивающих безопасную эксплуатацию ответственных конструкций, определяется нижней границей рассеивания результатов испытаний. Верхняя часть поля кривых усталости (от медианного значения до верхней границы рассеивания) представляет интерес в аспекте повышения характеристик сопротивления усталости исследуемого материала путем изучения особенностей технического состояния материала образцов с повышенной прочностью.

Выводы

Сопротивляемость усталости, являясь индивидуальным свойством конкретного изделия, зависит от технического состояния его материала и определяется показателем степени m уравнения кривой усталости, характеризующим ее наклон к оси напряжений.

Положение кривой усталости определяется тремя параметрами: координатами полюса, границами области многоциклового усталости и углом наклона кривой усталости к оси ординат.

Координаты полюса кривых усталости и границы области многоциклового усталости для материала определенного химического состава являются детерминированными величинами.

Показатель степени m есть величина стохастическая, не зависящая от напряжения, точность определения которой обеспечивается в зависимости от заданной вероятности разрушения статистической обработкой результатов ограниченного числа испытаний.

Перечень ссылок

1. ГОСТ 23.207-78 Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 48 с.
2. ГОСТ 25.502-79 Методы механических испытаний металлов. Методы испытания на усталость – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 32 с.
3. ГОСТ 25.504-82 Расчеты испытания на прочности. Методы расчета характеристик сопротивления усталости – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 182 с.
4. ГОСТ 25.507-85 Методы испытания на усталость при эксплуатационных режимах нагружения – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 32 с.
5. ДСТУ 2825-94 Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення основних понять – К. : Держстандарт України, 1995 – 40 с.
6. Троценко В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов : справочник в 2-х ч. / В. Т. Троценко, Л. А. Соновский. – К. : Наук. думка, 1987. – 1303 с.
7. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях: Анализ, предсказание, предотвращение / Дж. Коллинз ; [пер. с англ.]. – М. : Мир, 1984. – 624 с.
8. Беженев С. А. Некоторые аспекты теории усталостного разрушения металлических материалов / С. А. Беженев // Deformation & Fracture of materials – DFM2006 : Book of articles, ed. by Yu.K.Kovneristiy et al. – Moscow : Interkontakt Nauka, 2006. – С. 58–61.
9. Беженев С. А. О некоторых методологических проблемах теории усталостного разрушения конструкционных материалов / С. А. Беженев // Надійність і довговічність машин і споруд. – 2008. – Вип. 30. – С. 6–14.
10. Вагапов Р. Д. Вероятностно-детерминистская механика усталости. / Р. Д. Вагапов – М. : Наука, 2003. – 254 с.
11. Иванова В. С. Природа усталости металлов / В. С. Иванова, В. Ф. Терентьев. – М. : Металлургия, 1975. – 456 с.
12. К вопросу оценки характеристик сопротивления усталости конструкционных материалов / [С. А. Беженев, А. И. Беженев, В. Ю. Коцюба, С. Н. Пахолка] // Вісник двигунобудування. – 2004. – № 4. – С. 66–71.
13. Беженев С. А. Методика экспресс-оценки характеристик сопротивления многоциклового усталости титановых сплавов / С. А. Беженев // Вісник двигунобудування. – 2008. – № 2. – С. 141–145.
14. Беженев С. А. К вопросу ускоренного определения характеристик сопротивления усталости сплавов на основе никеля / С. А. Беженев, А. И. Беженев // Надійність і довговічність машин і споруд. – 2008. – Вип. 31. – С. 37–42.
15. Терентьев В. Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов / В. Ф. Терентьев. – М. : Интернет Инжиниринг, 2002. – 288 с.

Одержано 24.05.2010

Беженев С.О. Методичні аспекти проблеми оцінювання характеристик опору втоми металевих матеріалів

Запропоновано методику прискореного визначення характеристик опору втоми конструкційних металевих матеріалів на основі структурно-детерміністської концепції втоми.

Ключові слова: багаточиклова втома, довговічність, границя витривалості, крива втоми, імовірність руйнування.

Bezhenov S. The methodic aspects of the estimating problem of the metal materials fatigue resistance characteristics

The method of rapid determining of fatigue resistance characteristics of structural metal materials based on the structural-deterministic conception of the fatigue have been suggested.

Key words: high-cyclic fatigue, durability, endurance limit, fatigue curve, probability of fracture.