

ИСПЫТАНИЯ ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМ НАГРУЖЕНИИ КАК ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ О ПОВЕДЕНИИ КРИВОЙ УСТАЛОСТИ В ГИГАЦИКЛОВОЙ ОБЛАСТИ

И.В. Гадолина

TESTS UNDER IRREGULAR LOADING AS A SOURCE OF INFORMATION ABOUT THE FATIGUE CURVE BEHAVIOR IN THE GIGACYCLE REGION

I. V. Gadolina

Институт Машиноведения РАН, Москва, Россия

Abstract. By means of comparison of calculated and experimental durabilities estimations under service loading and using linear damage summation rule hypothesis a posterior estimation of the fatigue curve type (with-, or without horizontal part, broken type est.) in gigacycle region is estimated. Conception of acceleration coefficient is introduced to decrease the systematic error of estimation.

Для проведения оценки эксплуатационного ресурса, для сравнения технологических или конструктивных (для деталей) вариантов весьма важно знание поведения материала или элемента конструкции в области сверхвысоких чисел нагружения, или, другими словами, необходима кривая усталости до чисел циклов $N = 10^8 \dots 10^9$ (10^{10}). Технически это трудно осуществимо (образец разогревается) и экономически не всегда оправдано. С другой стороны на деталях, нагружаемых в эксплуатации, в силу особенностей случайного процесса нагружения, наличия фоновое низкоамплитудное нагружение с высокой частотой реализуется гигацикловое нагружение (т.е. суммарное число циклов до разрушения превышает 10^8 циклов). В некоторых случаях аналогичная ситуация имеет место и при испытаниях образцов при случайном нагружении в лабораторных условиях. В этом случае в предположении справедливости линейной гипотезы накопления усталостных повреждений возможна апостериорная оценка кривой усталости в гигацикловой области на основе данных об испытаниях при нерегулярном нагружении.

В практике оценки ресурса при усталости широко используется теория подобия /1/, при котором по результатам испытаний одной группы объектов (например, образцов) или деталей делается заключение о характеристиках сопротивления усталости другой (например, деталей). Применительно к оценке ресурса при эксплуатационном нагружении развитием теории подобия служит метод оценки коэффициента ускорения усталостных испытаний /2/, который, в частности, позволяет значительно снизить систематическую ошибку оценки ресурса. Увеличение точности оценки достигается за счет исключения таких субъективных факторов оценивания, как выбор блока нагружения, выбор нижней границы повреждающих напряжений при расчете ресурса, оценка корректирующего коэффициента линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений, а также влияние не учитываемых условий нагружения. В данной статье метод оценки коэффициента ускорения используется для уточнения вида кривой усталости в гигацикловой области.

По результатам многочисленных экспериментов и на основании рассмотрения физики процесса усталостного разрушения /3/ все многообразие кривых усталости в области много-(гига-)циклового усталости обобщенно можно представить в виде кривых типа **A**, **B** и **B**, показанных на рис.1, где S – это амплитуда напряжений, (возможно, приведенная, с учетом средних значений цикла), N – предельное число

циклов напряжений до разрушения (при наличии разброса экспериментальных значений - медианное или среднее геометрическое значение случайных величин). Кривая **A** – это кривая усталости без горизонтального участка (экспериментально подтверждена у цветных сплавов, а также для сталей в условиях коррозии). Испытания общемашиностроительных сталей часто описывалось кривой типа **B**. Тип **B** может оказаться преобладающим для высокопрочных легированных сталей, для сплавов с неоднородной структурой или имеющих неметаллические включения. Существующих экспериментальных и теоретических данных не достаточно, чтобы априори судить о том, какой именно вид кривой усталости будет характерен для некоторого испытания. Выводы, сделанные по результатам испытаний в области $N < 10^8$, часто также не позволяют сделать однозначное заключение о характере кривой. При ограниченных экспериментальных данных ошибочное описание зависимости кривой усталости с горизонтальным участком (тип **B**, рис.1) приводит к завышенной оценке ресурса при эксплуатационном нагружении /1/.

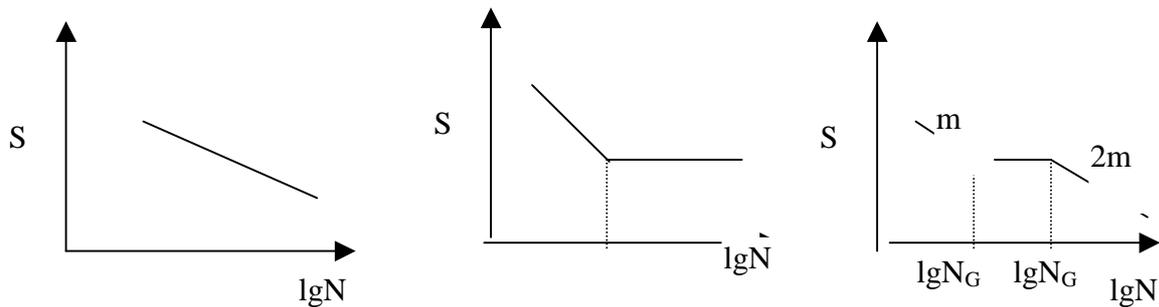


Рис. 1. Виды кривых усталости в гигацикловой области

Предположим, что для некоторой детали (образца) проведена серия испытаний с варьированием нагружения на $i=1,2,\dots,i_{\max}$ уровнях и при $j=1,2,\dots,j_{\max}$ видах случайного процесса. Общее число серий опытов равно произведению уровней факторов: $z = i_{\max} \cdot j_{\max}$. R_{ij}^* - это медианное или среднее геометрическое экспериментальное значение ресурса при i -том уровне нагружения при j -том виде случайного процесса. Минимальный экспериментальный ресурс

$$R_{\min}^* = \min (R_{ij}^*, i=1,2,\dots,i_{\max}; j=1,2,\dots,j_{\max}) \quad (1)$$

Индексы режима, для которого выполняется условие (1), обозначим i_{\min} и j_{\min} .

Для выбора оптимальной кривой усталости $g = (\mathbf{A}, \mathbf{B} \text{ или } \mathbf{B})$ определяют $(z-1)$ экспериментальных значений коэффициентов ускорения

$$k_{ij}^* = R_{ij}^* / R_{\min}^*, \text{ где } i < > i_{\min}; j < > j_{\min} \quad (2)$$

которые затем сопоставляют с теоретическими коэффициентами ускорения:

$$k_{ij}^{(g)} = R_{ij}^{(g)} / R_{i_{\min}, j_{\min}}^{(g)} \quad (3)$$

В выражении (3) $R_{ij}^{(g)}$ – это вычисленный в предположении о справедливости g -той кривой усталости ресурс для испытания в номером i, j ; $R_{i_{\min}, j_{\min}}^{(m)}$ то же для испытания с номером i_{\min}, j_{\min} . По определению $k_{ij}^* > 1$. Поскольку коэффициенты ускорений k_{ij}^* и $k_{ij}^{(m)}$ могут изменяться в весьма широких пределах, в оптимизационное уравнение (2) включены логарифмы их отношений:

$$W^{(g)} = \sum_j \sum_i \ln(k_{ij}^* / k_{ij}^{(g)}) - \ln(k_{i_{\min}, j_{\min}}^* / k_{i_{\min}, j_{\min}}^{(g)}) \quad (4)$$

Оптимальным является такой вид кривой (**A**, **B** или **B**) для которого $W^{(g)}$ является минимальным.

При использовании оптимизационного уравнения (4) по результатам испытаний в области ограниченной долговечности (кривая **Б**) «достраивают» предполагаемые кривые **А** и **В**. Не представляет трудностей экстраполяция кривой **А**. Что касается экстраполяции кривой **В**, то до проведения испытаний в области сверхвысоких чисел циклов о положении второй точки перелома кривой усталости N_{G2} и о наклоне второй наклонной ветви m_2 можно судить лишь на основании экспериментальных результатов других авторов (например, /6/, /7/). Предположение принять для вычисления коэффициента ускорения $N_{G2}=5.10^7$ и $m_2=2m_1$ (относительно последнего утверждения см. также /8/) не противоречит большинству опубликованных экспериментальных данных).

Метод не может быть применен, если: 1) все зарегистрированные напряжения в спектре выше точки перелома кривой усталости, поскольку в этом случае $K_{ij}^A = K_{ij}^B = K_{ij}^B$; 2) разброс значений ресурсов на близких уровнях нагружения высок, и выборки статистически неразличимы; 3) имеются хотя бы несколько циклов нагружения в испытаниях имеются хотя бы несколько действующих циклов нагружения области малоциклового усталости области усталости.

Разработанный метод был применен к анализу кривой усталости деталей подвижного состава /4/ (эксплуатационные испытания), а также для стендовых испытаний образцов сталей двух типов на различных уровнях нагружения случайными процессами, характерными для деталей автомобилей /5/ (Табл.1). Для детали (номер опыта 1, Табл.1) использование кривых **А** и **В** дает примерно одинаковый результат совпадения (различие не является статистически значимым при имеющем место разбросе экспериментальных результатов). Для образца со значительной концентрацией (номера опытов 2, 3 - Табл.1) предпочтительной оказалась кривая усталости типа **А**.

Таблица 1

№ п.п.	Источник	Материал	Образец, вид нагружения	Случайный процесс нагружения	Оптимальн. кривая
1	/4/	60С2А3Г	Деталь; изгиб	Нагружение на двух уровнях	А, В
2		MAN-TEN		Случайный широкополосный	А
3	/5/	RQC	Компактный; растяжение-сжатие	широкополосный "bracket (SAE)"	А

Вывод

Предложен оптимизационный критерий, который позволяет при отсутствии испытаний на усталость в области сверхвысоких чисел нагружения на основании эксплуатационных данных или по лабораторным экспериментальным данным при случайном нагружении косвенно судить о виде кривой усталости, что представляет теоретический и для некоторых случаев практический интерес.

Литература

1. В.П. Когаев. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. 2-е изд. под ред. А.П.Гусенкова. М. Машиностроение, 1993. 364 с.
2. И.В.Гадолина, И.М.Петрова. Влияние методов схематизации на точность оценки ресурса // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1997. №1. С. 71- 76.
3. L.R.Botvina. Phenomenon of Fatigue Curve Discontinuity as a Common Peculiarity of Kinetic Processes // VHCF-3. Proc. of the Third International Conference on VERY HIGH CYCLE FATIGUE. Ed.T.Sakai. Sept 16-19, 2004. Ritsumeikan Univ., Kusatsu, Japan. P.77-84.

4. Когаев В.П., Гадолина И.В. Расчет деталей машин при нерегулярном режиме нагружения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1991. №5. С. 45-50.
5. Tucker, L and Bussa, S. / In: The SAE Cumulative Fatigue Damage Test Program "Fatigue under Complex Loading" (Ed. Wetzel R.M.). 1977. Society of Automotive Engineering. P.1-44.
6. Tanaka, R and others. Statistical analysis to High-Cycle fatigue property in very long-life regime of high strength steel SNCM439. // VHCF-3. Proc. of the Third International Conference on VERY HIGH CYCLE FATIGUE. Ed.T.Sakai. Sept 16-19, 2004. Ritsumeikan Univ., Kusatsu, Japan. P.77-84.
7. Mughrabi, H. Specific features and mechanisms of fatigue in the ultrahigh cycle regime. // VHCF-3. Proc. of the Third International Conference on VERY HIGH CYCLE FATIGUE. Ed.T.Sakai. Sept 16-19, 2004. Ritsumeikan Univ., Kusatsu, Japan. P.665-671.
8. Haibach E. The influence of cyclic material properties on fatigue life prediction by amplitude transformation // Application of Computers in Fatigue. Proc. Int.Conf. London. 1978. P.131-145.