



РАСЧЕТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ДВУХЧАСТОТНОМ СПЕКТРЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **И. Ю. РОМАНОВА**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрена методика расчетного прогнозирования долговечности сварных соединений при двухчастотном циклическом нагружении с применением гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений Пальмгрена–Майера. Показано, что данная расчетная методика позволяет получить соответствующие оценки долговечности соединений без дополнительных экспериментальных исследований.

Ключевые слова: циклическое нагружение, двухчастотное нагружение, расчетное прогнозирование долговечности, гипотеза линейного суммирования повреждений Пальмгрена–Майера

Современные сварные конструкции эксплуатируются в различных условиях. При этом имеющие место в них силовые нагрузки являются в большинстве случаев наиболее критичными с позиций ресурса безопасности эксплуатации. Усталостные разрушения сварных конструкций, связанные с переменными нагрузками, являются предметом исследований многих научных коллективов во всем мире [1, 2]. Наиболее изучено регулярное нагружение, которое характеризуется периодическим законом изменения нагрузки с одним максимумом и одним минимумом в течение одного периода при постоянстве параметров цикла напряжений в течение всего времени эксплуатации (испытания).

Применительно к сопротивлению усталости сварных соединений в условиях регулярного нагружения имеется большой объем экспериментальных данных и соответствующих обобщений [1, 2] и др. Особый интерес вызывают рекомендации относительно использования параметров сопротивления усталости при регулярном нагружении по произвольно заданному спектру (рис. 1) на основе использования гипотезы линейного суммирования повреждений Пальмгрена–Майера.

В соответствии с этой гипотезой доля повреждений при любом уровне амплитуды нагружения пропорциональна отношению количества циклов его действия n_i к предельному количеству циклов $[N_{fi}]$, что привело бы к разрушению, т. е. $D_i = n_i/[N_{fi}]$, где D_i — накопление повреждений при i -м режиме. Тогда в соответствии с гипотезой Пальмгрена–Майера это соотношение для спектра, представленного на рис. 1, можно записать в виде

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{[N_{fi}]}, \quad (1)$$

где k — количество режимов нагружения.

Рассмотрим применение этой гипотезы к случаю двухчастотного нагружения (рис. 2). Исследования показали, что при таком нагружении снижение сопротивления усталости происходит в гораздо большей степени, чем при одночастотном с максимальной амплитудой, равной суммарному значению амплитуд обеих составляющих цикла [1].

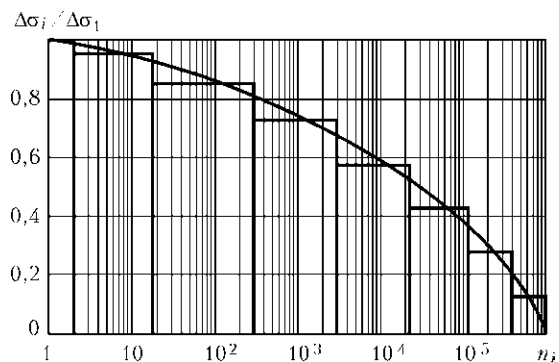


Рис. 1. Пример заданного спектра циклического нагружения $\Delta\sigma_i / \Delta\sigma_1 - n_i$

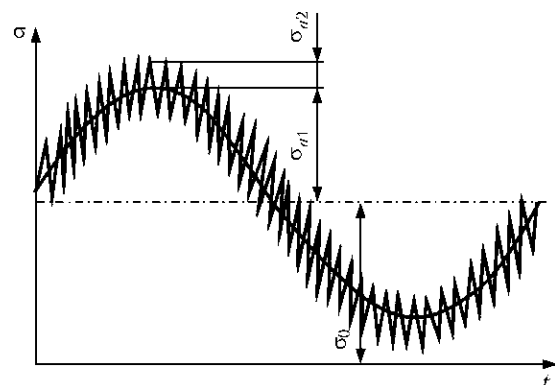


Рис. 2. Изменение напряжений при двухчастотном нагружении



В работе [1] для оценки долговечности при двухчастотном нагружении используются эмпирические соотношения, связывающие амплитуды напряжений σ_{a1} , σ_{a2} и долговечности $[N_1]$, $[N_2]$, где $[N_1]$, $[N_2]$ — соответственно низко- и высокочастотные нагружения. Чаще всего такие зависимости получают по экспериментальным данным.

В настоящей работе рассматривается возможность получения указанных зависимостей на основе гипотезы Пальмгрена–Майера.

Представим, что двухчастотное циклическое нагружение условно состоит из двух синусоидальных, периодически изменяющихся во времени t напряжений σ_1 и σ_2 , которые можно представить следующими уравнениями:

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \sigma_{a1} \sin \omega_1 t \text{ при } 0 \leq \omega_1 t \leq 2\pi, \quad (2)$$

где $\omega_1 t = 2\pi \frac{m}{M}$ ($0 \leq m \leq M$);

$$\sigma_2 = \begin{cases} \sigma_{a2} \\ 0 \text{ на участке } m, \dots, m+1, \\ -\sigma_a \end{cases} \quad (3)$$

где σ_0 — среднее значение напряжения низкочастотного цикла; M — количество интервалов, в пределах которых правомерны выражения (3).

Таким образом, для высокочастотного цикла для m -го интервала имеем

$$\begin{aligned} \sigma_{\max}^{(m)} &= \sigma_0 + \sigma_{a2} + \sigma_{a1} \sin 2\pi \frac{m}{M}, \\ \sigma_{\min}^{(m)} &= \sigma_0 - \sigma_{a2} + \sigma_{a1} \sin 2\pi \frac{m}{M}. \end{aligned} \quad (4)$$

Соответственно

$$R_m^{\text{в.ч}} = \frac{\sigma_{\min}^{(m)}}{\sigma_{\max}^{(m)}}, \quad \Delta\sigma_m = \sigma_{\max}^{(m)} - \sigma_{\min}^{(m)} = 2\sigma_{a2}.$$

Кроме того, на высокочастотный цикл нагружения $\sigma_{\text{в.ч}}$ накладывается низкочастотный $\sigma_{\text{н.ч}}$, при котором

$$\Delta\sigma_{\text{н.ч}} = 2\sigma_{a2}; \quad R_{\text{н.ч}} = \frac{\sigma_0 - \sigma_{a1}}{\sigma_0 + \sigma_{a1}}. \quad (6)$$

В процессе расчетов на базе долговечности N , соответствующей количеству циклов низкой частоты, получаем MN циклов. Спектр нагружения состоит из $M+1$ элементов. Допускаемое количество циклов для низко- и высокочастотной составляющих определяется из соотношения

$$\begin{aligned} [N] &= 5 \cdot 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma}{FATf(R_m)} \right)^{-5} \text{ при } [N] > 5 \cdot 10^6 \text{ цикл,} \\ [N] &= 2 \cdot 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma}{FATf(R_m)} \right)^{-3} \text{ при } [N] < 5 \cdot 10^6 \text{ цикл,} \end{aligned} \quad (7)$$

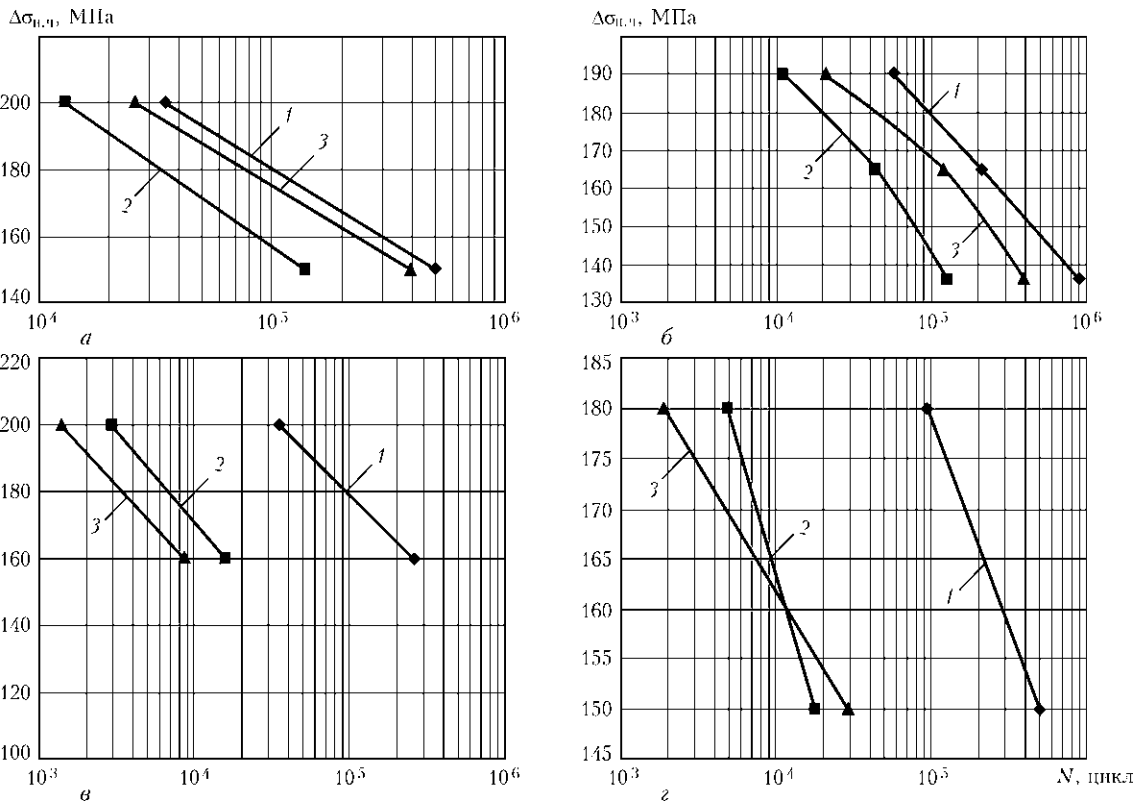


Рис. 3. Изменение долговечности при нагружении образцов из стали 22К при $M = 100$ (а, б) и 1000 (в, г): а — $\sigma_{a2}/\sigma_{a1} = 0,2$; б, в — $0,3$; г — $0,4$; 1, 2 — соответственно одно- и двухчастотное нагружение по [1]; 3 — расчетные данные, полученные на основе гипотезы Пальмгрена–Майера



где $f(R_m)$ определяется из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} f(R_m) &= 1,6 && \text{при } R_m \leq -1,0, \\ f(R_m) &= -0,4R_m + 1,2 && \text{при } -1,0 < R_m \leq -0,05, \\ f(R_m) &= 1,0 && \text{при } R_m > 0,5, \end{aligned}$$

$$m = 1, \bar{M}$$

FAT — характеристика соответственно для высоко- и низкочастотных составляющих, определяемая для данного сварного соединения по [2] на базе $N = 2 \cdot 10^6$ цикл либо из уравнений (7) при заданном значении долговечности при одночастотном нагружении [1].

Отсюда долговечность при двухчастотном нагружении составляет

$$N = \frac{1}{\frac{M}{\left(\frac{1}{[N_1]} + \sum_{m=1} \frac{1}{[N_{2m}]} \right)}} \quad (8)$$

В работе [1] представлены результаты испытаний образцов с геометрическим концентратором из стали 22К при двухчастотном нагружении. На рис. 3, а, б приведены соответствующие кривые изменения долговечности при одно- и двухчастотном нагружении образцов из стали 22К с концентратором напряжения при $M = 100$, где низкочастотная составляющая двухчастотного

нагружения соответствует отнулевому циклу, на рис. 3, в, г — то же, но при $M = 1000$.

Как видно из рис. 3, кривые усталости, характеризующие влияние двухчастотного нагружения при различных фиксированных значениях амплитудных и частотных соотношений, параллельны исходной кривой, соответствующей одночастотному нагружению. Повышение отношений амплитуд и частот ведет к смещению кривых в область меньшей долговечности. На рис. 3 также видна хорошая корреляция экспериментальных и расчетных данных.

Таким образом, применение гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений сварных соединений для случая двухчастотного нагружения позволяет использовать рекомендации работы [2] и получать для различных типов соединений (при различных FAT) соответствующие оценки долговечности, при этом дополнительные экспериментальные исследования не требуются.

1. *Прочность сварных соединений при переменных нагрузках* / Под ред. В. И. Труфякова. — Киев: Наук. думка, 1990. — 256 с.
2. *Recommendation for fatigue design of welded joints and components*. — S. I., [1996]. — 117 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1539-96/XV-845-96).

The method for calculation prediction of service life of welded joints under double-frequency cyclic loading by using the Palmgren-Maier hypothesis of linear summation of fatigue damages is considered. It is shown that this calculation method makes it possible to obtain appropriate estimates of service life of the joints requiring no additional experimental studies.

Поступила в редакцию 08.05.2009