

## ОБОБЩЕННЫЙ СВМУ КРИТЕРИЙ МНОГОСНОГО РАЗРУШЕНИЯ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ КРИТИЧЕСКОЙ ПЛОСКОСТИ

Бураго Н.Г.<sup>1</sup>, Никитин А.Д.<sup>2,3</sup>, Никитин И.С.<sup>2,3</sup>, Якушев В.Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем механики РАН им. А.Ю. Ишлинского

<sup>2</sup>Институт автоматизации проектирования РАН

<sup>3</sup>«МАИ» - Национальный Исследовательский Университет

В последние 20 лет было установлено, что относительно небольшие циклические напряжения (меньшие классического предела усталости материала), действующие с высокой частотой (порядка 1 кГц и выше) могут приводить к разрушению конструкций [1]. Высокочастотное нагружение приводит к значительным наработкам ( $N \sim 10^9 - 10^{10}$  циклов) за время расчетного срока службы изделия. Указанный диапазон долговечностей  $N > 10^8$  известен в литературе как сверхмногоцикловая усталость (СВМУ).

В настоящее время разработаны и реализованы методики СВМУ испытаний для весьма ограниченного набора циклических нагружений, в первую очередь для реверсивного и пульсирующего растяжения-сжатия, а также кручения образцов. Однако для оценок долговечности различных элементов конструкций, подверженных высокочастотным длительным воздействиям в условиях сложного нагружения, необходимы критерии многоосного СВМУ разрушения. В данной работе предлагается простая и естественная форма такого рода критериев, основанная на обобщении известных многоосных моделей для классических усталостных режимов. Ранее в [2] была предложена процедура определения параметров классических многоосных критериев (Сайнса, Кроссланда) в диапазоне малоциклового и многоциклового усталости (МЦУ и МНЦУ) по результатам одноосных испытаний с двумя разными коэффициентами асимметрии цикла (левая ветвь бимодальной одноосной усталостной кривой, Рис.1).

Современные подходы к построению многоосных критериев усталостного разрушения часто используют понятие критической плоскости. Первый критерий с определением критической плоскости был предложен Финдли [3]. Согласно этому критерию разрушение происходит по плоскости с нормалью  $\mathbf{n}$  с компонентами  $n_k$  при выполнении условия:

$$(\Delta \tau_n / 2 + \alpha_F \sigma_n)_{MAX_n} = S_F + A_F N^{\beta_F}, \quad \sigma_n = \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}, \quad \tau_n = |\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} - (\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}|$$

где  $\beta_F < 0$ ,  $\alpha_F$ ,  $S_F$ ,  $A_F$  – параметры, определяемые по данным эксперимента,  $N$  – число циклов до разрушения.

В главных осях тензора напряжений можно получить формулы:

$$\Delta \tau_n = \sqrt{(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_2)^2 n_1^2 n_2^2 + (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)^2 n_1^2 n_3^2 + (\Delta \sigma_2 - \Delta \sigma_3)^2 n_2^2 n_3^2}, \quad \sigma_n = \sigma_1 n_1^2 + \sigma_2 n_2^2 + \sigma_3 n_3^2$$

Для одноосного нагружения с коэффициентом асимметрии цикла  $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$  критерий будет выглядеть так:

$$\sigma_{\max} (\alpha_F + \sqrt{(1-R)^2 + 4\alpha_F^2} / 2) / 2 = S_F + A_F N^{\beta_F} \quad \text{при} \quad n_1 = 1/2 + \alpha_F / \sqrt{(1-R)^2 + 4\alpha_F^2}$$

Сравнивая с представлением Баскина одноосной усталостной кривой

$$\sigma_{\max} (1-R) / 2 = \sigma_R + \sigma_{CR} N^{\beta_F} \quad \text{и имея данные испытаний при } R = -1 \text{ и } R_0, \text{ получаем:}$$

$$S_F = \sigma_{-1} (\alpha_F + \sqrt{1 + \alpha_F^2}) / 2, \quad A_F = (\sigma_B - \sigma_{-1}) (\alpha_F + \sqrt{1 + \alpha_F^2}) 10^{-3\beta_F} / 2,$$

$$\alpha_F = \left( \sqrt{(2\kappa / (1-R_0) - 1)^2 + \kappa^2} - 1 - 2\kappa / (1-R_0) + \kappa^2 \right) / \kappa / (4 / (1-R_0) - \kappa)$$

где  $\sigma_{-1}$  и  $\sigma_{R_0}$  – классические пределы усталости по усталостным кривым при коэффициентах асимметрии цикла -1 и  $R_0$  соответственно,  $\sigma_B$  – статический предел прочности,  $\kappa = \sigma_{-1} / \sigma_{R_0}$ .

Анализ критерия Финдли для реверсного режима чистого кручения дает формулы:

$$\tau_{-1} = \sigma_{-1} (1 + \alpha_F / \sqrt{1 + \alpha_F^2}) / 2, \quad \tau_c = (\sigma_B - \sigma_{-1}) (1 + \alpha_F / \sqrt{1 + \alpha_F^2}) 10^{-3\beta_F} / 2$$

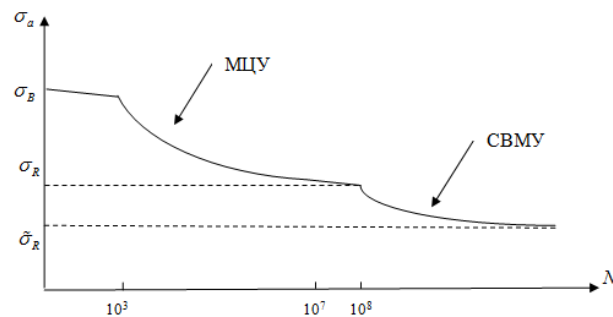


Рис. 1. Бимодальная усталостная кривая для режимов МЦУ и СВМУ

Предложим схему обобщения многоосного критерия разрушения на режим СВМУ (Рис. 1, правая ветвь одноосной бимодальной усталостной кривой при  $N > 10^8$ ).

В основе обобщенного многоосного критерия типа Финдли лежит подобие поведения левой и правой ветвей бимодальной усталостной кривой. Это обобщение заключается в замене параметров левой ветви бимодальной усталостной кривой на параметры правой ветви:  $\sigma_B \rightarrow \sigma_{-1}$ ,  $\sigma_{-1} \rightarrow \tilde{\sigma}_{-1}$ ,  $\sigma_R \rightarrow \tilde{\sigma}_R$ ,  $3\beta_F \rightarrow 8\tilde{\beta}_F$ , где  $\tilde{\sigma}_{-1}$  и  $\tilde{\sigma}_R$  это «новые» пределы усталости на правой ветви усталостной кривой для коэффициентов асимметрии -1 и  $R$ .

Для режима СВМУ имеем (все параметры отмечены знаком ~):

$$\tilde{S}_F = \tilde{\sigma}_{-1}(\tilde{\alpha}_F + \sqrt{1 + \tilde{\alpha}_F^2}) / 2, \quad \tilde{A}_F = (\sigma_{-1} - \tilde{\sigma}_{-1})(\tilde{\alpha}_F + \sqrt{1 + \tilde{\alpha}_F^2})10^{-8\tilde{\beta}_F} / 2, \quad \tilde{\kappa} = \tilde{\sigma}_{-1} / \tilde{\sigma}_{R_0},$$

$$\tilde{\alpha}_F = \left( \sqrt{(2\tilde{\kappa} / (1 - R_0) - 1)^2 + \tilde{\kappa}^2} - 1 - 2\tilde{\kappa} / (1 - R_0) + \tilde{\kappa}^2 \right) / \tilde{\kappa} / (4 / (1 - R_0) - \tilde{\kappa})$$

Для реверсного режима чистого кручения  $\tilde{\tau}_a = \tilde{\tau}_{-1} + \tilde{\tau}_c N^{\tilde{\beta}_F}$  получаем:

$$\tilde{\tau}_{-1} = \tilde{\sigma}_{-1}(1 + \tilde{\alpha}_F / \sqrt{1 + \tilde{\alpha}_F^2}) / 2, \quad \tilde{\tau}_c = (\sigma_{-1} - \tilde{\sigma}_{-1})(1 + \tilde{\alpha}_F / \sqrt{1 + \tilde{\alpha}_F^2})10^{-8\tilde{\beta}_F} / 2$$

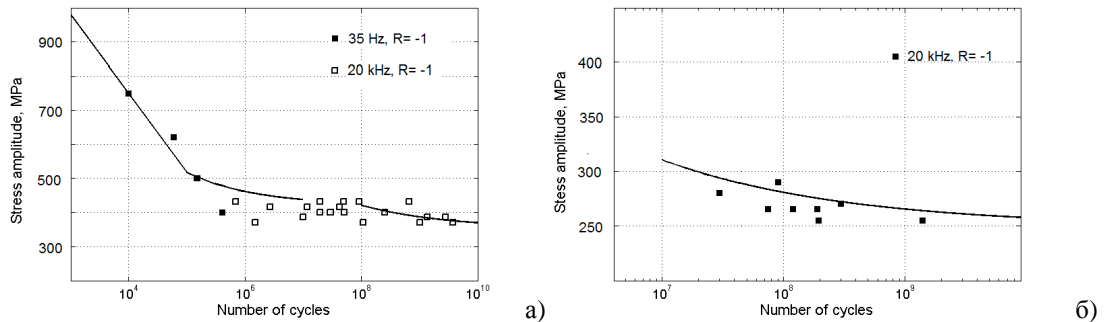


Рис. 2. СВМУ экспериментальные данные для сплава ВТЗ-1 . Растяжение-сжатие –а), кручение –б)

Были определены параметры обобщенного критерия СВМУ разрушения по результатам испытаний титановых образцов:  $\sigma_B = 1100 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{-1} = 400 \text{ MPa}$ ,  $\tilde{\sigma}_{-1} = 365 \text{ MPa}$ ,  $\tilde{\sigma}_{0.1} = 215 \text{ MPa}$ ,  $\tilde{\beta} = -0.24$  (Рис. 2-а). Полученные значения параметров были использованы для расчетной оценки долговечности образцов при СВМУ испытаниях на реверсное кручение. Сравнение показало близость расчетных и экспериментальных результатов (Рис. 2-б). Тем самым была подтверждена возможность использования обобщенного критерия многоосного усталостного разрушения в режиме СВМУ и предложенной схемы определения его параметров для приближенной оценки долговечности элементов конструкций.

Работа выполнена по проекту РФФИ № 15-08-02392-а.

### Список литературы

1. Bathias C., Paris P.C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. New York. Dekker, 2005.
2. N. G. Bourago, A. B. Zhuravlev, I. S. Nikitin. Models of multiaxial fatigue fracture and service life estimation of structural elements. Mechanics of Solids. Vol. 46. N. 6. 2011. Pp. 828-838.
3. Findley W. A theory for the effect of mean stress on fatigue of metals under combined torsion and axial load or bending. J. of Eng. for Indust. 1959. P. 301–306.