

## ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ С УЧЕТОМ СПЕКТРА ВОЛН ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ОБЩЕМ АНАЛИТИЧЕСКОМ УРАВНЕНИИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ КРИВЫХ УСТАЛОСТИ

*Мыльников В.В.*

*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,  
Нижний Новгород*

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, скорость деформирования, пластическая деформация, сопротивление усталости, прочность.

**Аннотация.** Рассмотрено влияние циклического нагружения на разрушение с позиций конкуренции скоростей нагружения и релаксации внутренних напряжений с учетом спектра волн пластической деформации. Показано, что с увеличением скорости деформирования (частоты циклического нагружения) время нарастания напряжения сокращается, при этом напряжение, соответствующее определенной пластической деформации, увеличивается. Получены общие аналитические уравнения для описания поведения кривых усталости металлов и сплавов, позволяющие представить влияние факторов их состояния в зависимости от влияния внешних условий циклического нагружения.

## ESTIMATION OF THE ULTIMATE DEFORMATION OF METAL ALLOYS TAKING INTO ACCOUNT THE SPECTRUM OF PLASTIC DEFORMATION WAVES IN THE GENERAL ANALYTICAL EQUATION FOR DESCRIBING THE BEHAVIOR OF FATIGUE CURVES

*Mylnikov V.V.*

*Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,  
Nizhny Novgorod*

**Keywords:** stress-strain state, strain rate, plastic deformation, fatigue resistance, strength.

**Abstract.** The influence of cyclic loading on fracture is considered from the standpoint of competition between loading rates and relaxation of internal stresses, taking into account the spectrum of plastic deformation waves. It is shown that with increasing strain rate (frequency of cyclic loading), the stress rise time is reduced, while the stress corresponding to a certain plastic deformation increases. General analytical equations are obtained to describe the behavior of fatigue curves of metals and alloys, which make it possible to represent the influence of factors of their state depending on the influence of external conditions of cyclic loading.

Поведение материалов в различных областях циклического нагружения очень различно и может зависеть как от их состояния, так и от условий испытания [1-2]. Получаемые из опытов кривые усталости (диаграммы Велера) систематизированы в несколько характерных типов и даются в координатах оптимальное ( $\sigma_{\max}$ ) или амплитудное ( $\sigma_a$ ) напряжение-долговечность ( $\ln N$ ). Обычно, они описываются лишь эмпирическим уравнением Вейбулла  $\sigma N^Q = \text{const}$  [3]. В данном уравнении такие параметры состояния поликристаллов, как плотность (дефектность), скорость релаксации напряжений, скорость нагружения, структурно-энергетическое состояние материала (прочность,

твердость) и приложенное возникающее напряженно-деформированное состояние в явном виде не содержится.

Целью настоящей работы является попытка получения общего теоретического уравнения для описания связи  $\sigma_a(N)$ , в котором бы содержались все необходимые параметры состояния и отражало бы поведение металлов и сплавов при усталости и общий характер кривой усталости Велера, а так же объясняло характер различных типов диаграмм усталости различных материалов.

Если рассмотреть сущность циклического нагружения и разрушения, то фактически оно сводится к конкуренции скоростей нагружения ( $\varepsilon_n$ ) и скорости релаксации внутренних напряжений ( $\dot{\varepsilon}_{рел} = \dot{\varepsilon}_p$ ), заключающихся в накоплении повреждений и фактически являющихся скоростью падения сопротивления разрушению ( $\sigma_k$ ) материала, т.е.  $\dot{\varepsilon}_p$ . Скорость нагружения за цикл примем равной:

$$\varepsilon_n = \Delta\sigma / \Delta t^{(1)} \approx \sigma_a / \Delta t^{(1)}, \quad (1)$$

где  $\Delta t^{(1)}$  – время, в течение которого достигается максимальное напряжение в цикле (для симметричного цикла  $\Delta t^{(1)} = 0,25t_u$ , где  $t_u$  – время цикла).

Скорость релаксации ( $\dot{\varepsilon}_{рел}$ ) примем как скорость снижения сопротивления разрушению ( $\sigma_k$ ), описываемую для поликристалла уравнением вида

$$\varepsilon_{рел} = \varepsilon_p = \sigma_k / \left( \Delta t^{(1)} K_u N \right), \quad (2)$$

где  $\sigma_k$  – сопротивление разрушению поликристалла при однократном нагружении на разрыв цилиндрического образца;  $K_u$  – коэффициент цикла, учитывающий отношение времени  $\Delta t^{(1)}$  ко времени всего цикла (изменяется от нуля до единицы);  $N$  – число циклов до разрушения при заданном максимальном или амплитудном напряжениях.

Соотношение скоростей  $\varepsilon_p / \varepsilon_n$  из отношения уравнений (2) и (1) будет таким:

$$\varepsilon_p / \varepsilon_n = \sigma_k / \left( \sigma_a K_u N \right), \quad (3)$$

Поскольку любой поликристалл в произвольном термомеханическом состоянии характеризуется определенными величинами предельной деформации (пластичностью)  $\varepsilon_i^{np}$  и сопротивлением разрушению (прочностью на разрыв)  $\sigma_k$ , зависящими, как правило, от четырех факторов состояния: дефектности, структурно-энергетического состояния, релаксационной способности, напряженно-деформированного состояния, то конкуренция скоростей  $\varepsilon_p / \varepsilon_n$  будет всегда протекать в подобных состояниях одной самоорганизующейся системы, отличающейся соотношением (диапазонами) указанных параметров состояния. На основании работы [4] были предложены уравнения (4) и (5) для оценки предельной деформации металлических сплавов и сопротивления деформации поликристаллов в зависимости от факторов их состояния: соотношение плотности в исходном и конечном состоянии, структурно-энергетического состояния (соответствие твердости и предела текучести), показателей напряженно-деформированного состояния и соотношение скоростей релаксации внутренних напряжений и скорости нагружения.

$$\varepsilon_i^{np} = \varepsilon_0 + \frac{\ln(\rho_{M_0} / \rho_{M_{кр}})}{\left(\frac{HB}{\sigma_T} - 2\right) e^{\alpha\Pi} - \dot{\varepsilon}_{рел} / \dot{\varepsilon}_n}; \quad (4)$$

$$\sigma_K = \sigma_{K_0} e^{\left\{\left(\frac{HB}{\sigma_T} - 2\right) \frac{\dot{\varepsilon}_{рел}}{\dot{\varepsilon}_n} \varepsilon_{рх} e^{\alpha\Pi}\right\} (\varepsilon_j^{np} - \varepsilon_0)}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_0$  – упругая деформация;  $(\rho_{M_0} / \rho_{M_{кр}})$  – исходная плотность металла;  $HB$  – твердость материала (сплава) в заданном термомеханическом состоянии;  $\sigma_m$  – предел текучести (упругости) основы материала при котором возможны сдвиги при циклическом нагружении;  $\Pi$  – показатель напряженного состояния, изменяющийся от  $-\infty$  (при сжатии) до  $+\infty$  (при растяжении);  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий влияние коэффициентов Лодэ – вида деформаций и напряжений.

Из уравнений (4) и (5) следует, что предельная деформация сплавов снижается с уменьшением исходной плотности и с повышением твердости в заданном термомеханическом состоянии, а так же с возрастанием жесткости напряженного состояния и с увеличением скорости деформирования и повышается с увеличением скорости релаксации. Эти уравнения получены в рамках традиционного рассмотрения пластической деформации без учета диссипативных процессов происходящих в локальных объемах циклически деформируемых металлических материалов.

В зависимости от вида и условий нагружения формируется различный спектр волн пластической деформации и разрушения при различных видах и условиях нагружения. Каждый структурный уровень пластической деформации характеризуется своей эффективностью релаксации внутреннего механического поля с определенной последовательностью вовлечения в деформацию различных структурных уровней [5].

Таким образом, при усталостном нагружении сталей релаксационному механизму пластической деформации предшествует волновой характер, при котором размеры изделия не меняются, а пластичность падает практически до нуля. Следовательно, уравнения (4) и (5) примут следующий вид:

$$\varepsilon_i^{np} = \varepsilon_0 + \frac{\ln(\rho_{M_0} / \rho_{M_{кр}})}{\left(\frac{HB}{\sigma_T} - 2\right) e^{\alpha\Pi} - \left[\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_n} - \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_n}\right)_{волн}\right]}; \quad (6)$$

$$\sigma_K = \sigma_{K_0} e^{\left\{\left(\frac{HB}{\sigma_T} - 2\right) \left[\frac{\dot{\varepsilon}_{рел}}{\dot{\varepsilon}_n} - \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_n}\right)_{волн}\right] \varepsilon_{рх} e^{\alpha\Pi}\right\} (\varepsilon_i^{np} - \varepsilon_0)}, \quad (7)$$

где  $\left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_n}\right)_{волн}$  – соотношение скоростей с учетом спектра волн пластической деформации;  $\varepsilon_{рх} = e^{\omega}$  – коэффициент разрыхления, зависящий от поврежденности  $\omega$ , изменяющейся от нуля до единицы.

Подставим соотношения (3) в уравнение (6) и (7) и, выразив зависимости  $N(\sigma_a)$ , получим выражение для связи диаграмм усталости с интересующими нас параметрами состояния. Они будут иметь следующий вид

$$N = \frac{\sigma_K}{\sigma_a K_{II} \left[ \left( \frac{HB}{\sigma_T} - 2 \right) e^{\alpha_{II}} - \frac{\ln(\rho_{M_0} / \rho_{M_{кр}})}{\varepsilon_i^{np} - \varepsilon_0} + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_n} \right)_{волн} \right]}; \quad (8)$$

$$N = \frac{\sigma_K \varepsilon_{px} e^{\alpha_{II}}}{\sigma_a K_{II} \left[ \left( \frac{HB}{\sigma_T} - 2 \right) - \frac{\ln(\sigma_K / \sigma_{K_0})}{\varepsilon_i^{np} - \varepsilon_0} + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_n} \right)_{волн} \varepsilon_{px} e^{\alpha_{II}} \right]}. \quad (9)$$

Теоретические закономерности кривых усталости, определяемые из уравнений (8) и (9), представлены на рисунке 1.

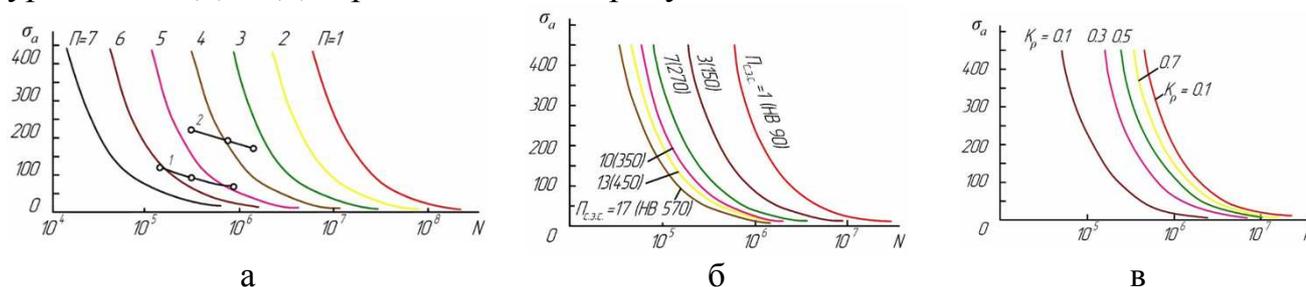


Рис. 1. Теоретические кривые усталости при различных значениях показателей: а –  $\Pi$  для стали 16ХСН в состояниях I (1) и II (2); б –  $\Pi_{с.э.с}$ ; в – при различных значениях плотности

**Заключение.** Получены общие аналитические уравнения для описания поведения кривых усталости поликристаллических сплавов, а именно сталей, позволяющие представить соотношение факторов их состояния: дефектности, структурно-энергетического состояния, релаксационной способности, напряженно-деформированного состояния в зависимости от внешних условий циклического нагружения.

### Список литературы

1. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. – М.: Наука, 2015. – 479 с.
2. Мыльников В.В., Чернышов Е.А., Шетулов Д.И. Прогнозирование циклической прочности и долговечности конструкционных материалов. – М.: Спутник+, 2013. – 146 с.
3. Weibull W. The phenomenon of rupture in solid // Proc. Royal Swed. Inst. Eng. Res. 1939, vol. 153, pp. 1-55.
4. Скуднов В.А. Предельные пластические деформации металлов. – М.: Metallurgy, 1989. – 176 с.
5. Панин В.Е. // Физическая мезомеханика материалов. Т. 1 / Отв. ред. С.Г. Псахье. – Томск: ТГУ, 2015. – 462 с.

### Сведения об авторе:

Мыльников Владимир Викторович – к.т.н., в.н.с. Управления науки, доцент кафедры Технологии строительства.