

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ  
НАГРУЖЕНИИ В ОБЛАСТИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ**

**И.М. Петрова**

**MODELING OF THE STRUCTURAL STEEL CYCLIC STRENGTH  
VARIATION UNDER DYNAMIC LOADING IN THE LONG-TERM  
LIFE REGION**

**I.M. Petrova**

*ИМАШ РАН, Москва, Россия*

**Abstract.** The fatigue resistance characteristics under  $10^8 \dots 10^9$  cycles life duration are considered. It is emphasized that generally the fatigue curve might have four characteristic zones. Stress concentration change due to loading cycles increase is examined. The comparison of the fatigue tests results under regular and irregular loading under  $10^8 \dots 10^9$  cycles was carried out.

Существующие методы оценки пределов выносливости и параметров кривых усталости в области долговечности, выраженной суммарным числом циклов динамического нагружения  $N_6 \leq 10^7$ , подтверждены многочисленными исследованиями прочности деталей машин и практикой их эксплуатации. Исчерпывающая информация об этом участке кривых усталости для многих материалов представлена в атласах и справочных материалах [1, 2, 3].

Для деталей, работающих в эксплуатации при динамическом нагружении, особое значение имеет сопротивление усталости в гигацикловой области при долговечности, определяемой числом циклов более  $10^8 \dots 10^9$ . Испытания на усталость такой длительности весьма дороги, трудоемки и требуют огромных временных затрат. В то же время при конструировании и расчете деталей машин актуально обеспечение безопасной работы именно в области превышающей  $10^8 \dots 10^9$ , из чего следует необходимость проведения исследований характеристик сопротивления усталости в данной области с целью обоснования уровня допустимых напряжений. Анализ имеющихся литературных данных показывает, что представление о горизонтальном положении кривой усталости в области  $N_6 > 10^7$  весьма условно. В ряде случаев при испытаниях на базах  $N_6 > 10^7$  имеются разрушения там, где в соответствии с принятым положением о горизонтальном участке кривой усталости, их не должно быть [4...8], то есть кривая усталости в области длительной долговечности с ростом числа циклов нагружения  $N$ , монотонно снижается при напряжениях  $\sigma < \sigma_{-1}$ , ( $\sigma_{-1}$  определен на базе  $10^7$  циклов) при этом возрастают значения эффективных коэффициентов концентрации  $K_\sigma$ . Для обеспечения необходимого ресурса при числе циклов нагружения  $N_{\text{сум}}$ , значительно превышающем базовое  $N_6 = 10^7$  циклов, требуется информация о положении кривой усталости в области более длительных долговечностей, когда  $N_{\text{сум}} \gg N_6$ . Поэтому в настоящий момент большое внимание уделяется положению участка кривой усталости для  $N_{\text{сум}} \gg N_6$  и проведению экспериментальных исследований при  $N = 10^9 \dots 10^{10}$  циклов для выявления соответствующего им значения  $\sigma_{-1д}$  и построению на их основе моделей накопления повреждений, необходимых для мониторинга технического состояния и оценки остаточного ресурса.

Известные данные об этом участке кривой усталости полученные при испытаниях образцов, моделей и деталей [4...8] показали, что кривая усталости в области

длительной долговечности с ростом числа циклов нагружения  $N$ , монотонно снижается. При испытаниях до базы  $N_6 = 10^8$  циклов сталей различного химического состава (никель-хром-молибденовая, хромомолибденовая, никельхромовая, углеродистая, мягкая, литая) с пределом прочности  $\sigma_B < 1200$  МПа, для которых традиционно считают, что кривые усталости свыше  $N_6 = 10^7$  циклов имеют горизонтальный участок, то есть предел выносливости не снижается, во многих случаях имелось разрушение при числе циклов  $>10^7$  [7]. Обобщение результатов экспериментальных исследований в области гигацикловой усталости, приведенных в [8] позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Кривая многоциклового усталости в общем случае может иметь четыре характерных зоны. Зона I – до  $10^6 \dots 4 \cdot 10^6$  циклов наклонный участок, зона II до  $10^8 \dots 5 \cdot 10^8$  циклов имеет незначительный наклон, соответствующий условному пределу выносливости. В зонах I, II, как правило, трещины зарождаются на поверхности (при отсутствии поверхностного упрочнения). Зона III – до  $10^9 \dots 10^{10}$  циклов наклон увеличивается, зарождение трещины начинается под поверхностью (трещина типа «рыбий глаз»), что свидетельствует о смене механизма разрушения, очагом зарождения трещины являются включения. IV – свыше  $10^9 \dots 10^{10}$  циклов зона не распространяющихся трещин, которую можно назвать порогом чувствительности по напряжениям.

2. Влияние концентрации напряжений с ростом числа циклов возрастает (увеличивается значение эффективного коэффициента концентрации) [8]. Этот вывод подтверждает работа [4], в которой результаты испытаний углеродистой стали St 38u -2 при изгибе с вращением до базы  $10^9$  циклов показали значительное снижение предела усталости образцов с надрезом и увеличение эффективного коэффициента концентрации  $K_\sigma$  на 34%. При увеличении базы испытаний это различие уменьшается и в области долговечностей  $10^{11}$  циклов кривые усталости гладких и надрезанных образцов совпадают [8].

Особое значение имеют испытания в области сверх высоких баз при нерегулярном нагружении, которое в основном имеет место в эксплуатации. В работе [5] приведены результаты испытаний до базы  $5 \cdot 10^8$  циклов образцов, изготовленных из стали 45 и стали 40X, проведенных в статистическом аспекте при различных видах напряженного состояния (изгиб, кручение) на образцах с различными уровнями теоретических коэффициентов концентрации напряжений (от  $\alpha_\sigma = 1$  до  $\alpha_\sigma = 1,87$ ) и величиной диаметров рабочей части (от  $d=7,5$  мм. до  $d=45$  мм.) при регулярном и нерегулярном нагружении. Программа нерегулярного нагружения была получена аппроксимацией экспоненциального закона распределения. Испытания при изгибе в одной плоскости проводились при максимальных напряжениях в блоке нагружения  $\sigma_{a,max} = 1,05\sigma_{-1}; 1,1\sigma_{-1}; 1,2\sigma_{-1}; 1,3\sigma_{-1}$ . База испытаний при нерегулярном нагружении была принята равной  $10^9$ . На каждом уровне нагружения было испытано от 5 до 10 образцов. Построенные функции распределения долговечности показали значительное увеличение рассеяния с уменьшением величины  $\sigma_{a,max}$ . Закономерности изменения рассеяния при регулярном и программном нагружении идентичны. Кривые усталости при программном и регулярном нагружении сближаются в области  $5 \cdot 10^8$  циклов. Аналогичные результаты получены в результате испытаний при изгибе с вращением при программном нагружении с нормальным и равномерным распределением амплитуд напряжений [6]. Максимальные напряжения в блоке нагружения были равны  $\sigma_{a,max} = 1,05\sigma_{-1}; 1,3\sigma_{-1}; 1,5\sigma_{-1}; 2,0\sigma_{-1}$ . База испытаний при нерегулярном нагружении была принята равной  $10^9$ . Результаты испытаний при случайном нагружении с различным уровнем нерегулярности случайных процессов характерных для элементов подвески, деталей трансмиссии и элементов рам автомобилей представлены в работе [9]. Для всех рассмотренных испытаний кривые усталости при программном и регулярном нагружении сближаются в области долговечности

$N = 10^8 - 10^9$  циклов. То есть на испытания при нерегулярном нагружении в первом приближении можно распространить вывод 1.

В то же время, как следует из вывода 1, кривые усталости имеют асимптотический характер приближаясь к некоторому значению напряжений, который в [10] предложено обозначить как порог чувствительности по напряжениям. Теоретические и экспериментальные исследования [10] показали, что повреждение, приводящее к зарождению и развитию трещины, накапливается в области сечения образца или детали, где напряжения превышают некоторое значение  $U$  равное  $0,5\sigma_{-1}$ , что также соответствует порогу чувствительности. Экспериментально выявленный диапазон напряжений, соответствующий порогу чувствительности, получен для углеродистых и для легированных сталей при разных напряженных состояниях и размерах объектов усталостных испытаний.

Таким образом, по приведенным выше данным кривая усталости в области длительной долговечности с ростом числа циклов нагружения  $N$ , монотонно снижается при напряжениях  $\sigma < \sigma_{-1}$ , но это снижение ограничивается порогом чувствительности. Если рассматривать кривые усталости с учетом их рассеяния, то можно заметить, что нижняя граница кривой усталости, соответствующая малой вероятности разрушения практически не зависит от масштабного фактора. Для оценки порога чувствительности по напряжениям в [11] были исследованы результаты испытаний ряда образцов и моделей с использованием уравнений подобия усталостного разрушения [10] и дана оценка нижнего значения предела выносливости  $U$  для каждого из рассмотренных испытаний. Было получено  $U$  равное  $\sim (0,53...0,85)\sigma_r$ , где  $\sigma_r$  - предел выносливости стандартных гладких образцов при базе испытания  $N_0 = 10^7$ , что указывает на возможность повреждающего действия регулярных напряжений на 20-45% ниже предела выносливости  $\sigma_r$ .

Для возможного учета положения кривых усталости в области  $10^9 - 10^{10}$  циклов при оценке долговечности и ресурса предложено исследовать их с учетом порога чувствительности. В работе [11] результаты испытаний образцов из сталей 45 и 40Х, полученные в работах [5, 6] на базах испытаний  $10^8 - 10^9$  циклов были обработаны методами регрессионного анализа с использованием упрощенного уравнения кривой усталости в форме Вейбулла и с учетом порога чувствительности по напряжениям. В результате было предложено уравнение кривой усталости в виде:

$$m \lg (\sigma_{ai} - 0,5\sigma_{-1}) + \lg N = C \quad (1)$$

где  $\sigma_{-1}$  - предел выносливости, определенный на базе  $N_0 = 10^7$  циклов;  $m$  и  $C$  - параметры кривой усталости, определяемые экспериментально;  $\sigma_{ai}$  - текущее значение напряжения. Проверка уравнения (1) путем сравнения расчетных и экспериментальных значений долговечности показала перспективность его применения.

Величина предела выносливости образцов, поврежденных циклическим нагружением, зависит от величины циклических напряжений, их длительности и может быть записана в виде [10]

$$\sigma_{-lнов} = \sigma_{-lucx} \left[ 1 - \frac{n_H}{N_H} K \left( \frac{\sigma_a}{\sigma_{-lucx}} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от механических характеристик материала;  $n_H$  – число циклов начального переменного нагружения при напряжении  $\sigma_a$ ;  $N_H$  - число циклов переменного нагружения при напряжении  $\sigma_a$  соответствующее кривой усталости. Формула (2) наиболее подходит для оценки накопления повреждений и оценки ресурса в области длительных долговечностей. Расчет на прочность базируется на учете постепенного снижения предела выносливости при действии циклического нагружения. Для каждого заданного значения суммарного числа циклов за весь срок

эксплуатации  $N_{\text{сум}}$ , соответствующего определенному ресурсу, можно определить предельный коэффициент нагруженности  $n_p = \sigma_{a \text{ max}} / \sigma_{-1D}$ . Предел выносливости детали перед началом эксплуатации  $\sigma_{-1D} = \sigma_{\text{Iucx}}$ . В этом случае вероятность разрушения детали за назначенный период эксплуатации определяется с помощью квантили

$$u_p = \frac{1 - \tilde{n}}{\sqrt{\tilde{n}^2 v_{\sigma_{-1}}^2 + v_{\varepsilon}^2}} \quad (3)$$

где  $\tilde{n} = \frac{n_p}{n}$  - относительный коэффициент запаса;  $n_p = \sigma_{a \text{ max}} / \sigma_{-1D}$  - предельный

коэффициент нагруженности;  $n = \frac{\bar{\sigma}_{a \text{ max}}}{\bar{\sigma}_{-1D}}$  - отношение среднего значения максимальной

амплитуды в блоке нагружения к среднему значению предела выносливости;  $v_{\sigma_{-1}}$  - коэффициент вариации предела выносливости,  $v_{\varepsilon}$  - коэффициент вариации максимальных амплитуд в блоке нагружения. Предельный коэффициент нагруженности  $n_p = \sigma_{a \text{ max}} / \sigma_{-1D}$  означает, что при  $\sigma_{a \text{ max}} / \sigma_{-1D} > n_p$  будут наступать усталостные разрушения до истечения срока службы или заданного значения долговечности (чисел циклов), а при  $\sigma_{a \text{ max}} / \sigma_{-1D} < n_p$  разрушений не будет. При расчете предполагается, что все напряжения блока нагружения действуют последовательно в порядке убывания, начиная с самого высокого значения амплитуды  $\sigma_a$ , что приведет к небольшой погрешности в безопасную сторону. Алгоритм расчета с использованием формулы (3) изложен в [12]. В результате расчета получают ряд значений коэффициентов предельной нагруженности  $n_p$ , соответствующий им ряд значений суммарной долговечности (ресурса)  $N_{\text{сум}}$  и вероятности безотказной работы  $P$  по которым можно оценить функцию распределения ресурса.

### Литература

1. Степнов М.Н. Расчетные методы оценки характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкции. М: Изд-во «МАТИ», 2003, 119 с.
2. Гребеник В.М. Усталостная прочность и долговечность металлургического оборудования. М.: Машиностроение. 1969. 256 с.
3. Трошенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник. Киев: Наукова Думка. 1987. Т. I 509с., Т. II 1327 с.
4. Tauscher H., Buchholz H. Dauerschwingverhalten der Stahle unter extrem langer Beanspruchungsdauer. // Maschinenbautechnik, 1974, Heft 12, s. 565-567.
5. Когаев В.П., Петрова И.М. Оценка долговечности при программном нагружении и больших базах испытания. // Машиноведение 1973, № 3, С. 51-56.
6. Когаев В.П., Вандышев В.П., Петрова И.М. Накопление усталостных повреждений и вероятностные методы расчета деталей машин на усталость при варьируемых амплитудах напряжений. - в сб. Прочность материалов и конструкций. Киев: Наукова Думка. 1975, С. 26-33
7. Cazaud R., Pomey G., Rabbe P., Janssen Ch. La fatigue des metaux. Paris, Dunod, 1969, 622 p.
8. Proceedings of the Third International Conference on Very High Cycle Fatigue Ritsumeikan University, Kusatsu, Japan. September 16-19, 2004. 689 p.
9. Darrell Socie. Variable amplitude fatigue life estimation models. // Proceedings of the SAE fatigue conference. P-109, 400 Commonwealth Drive Warrandale, PA 15096. April 1982 p. 133-161.
10. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение. 1993. 364 с.
11. Коновалов Л.В., Петрова И.М. Особенности циклической прочности конструкционных сталей в области длительной долговечности. // Вестник машиностроения. 1998. №9, С.3-11.
12. МУ Расчеты деталей машин на выносливость в вероятностном аспекте. / А.П. Гусенков, И.М. Петрова, И.В. Гадолина М.: МЦНТИ, 1991, С.85.