

УДК 620.17

ОБРАБОТКА ДАННЫХ МАЛОЦИКЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ УСТАЛОСТИ

Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В., Ильиных В.Н.

ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет»,
Тюмень, e-mail: Kv.Syzzr@gmail.com

Для описания данных разрушения образцов в области малоциклового деформирования использована математическая модель, разработанная в кинетической теории механической усталости. В модель включены два дополнительных параметра. Первый параметр характеризует начальное повреждение материала детали, которое имеет место еще до начала ее циклического деформирования. Вторым параметром отражает сопротивление детали росту усталостных трещин. Предложенные ранее способы экспериментального определения значений этих параметров в реальных условиях испытаний деталей получить требуемую информацию не позволяют. В работе рассмотрена задача расчета отмеченных параметров на основе результатов испытаний образцов на долговечность и разработанной математической модели. Задача сведена к решению двух трансцендентных уравнений. На основе построенной математической модели создана методика статистической обработки данных малоцикловых испытаний образцов. Методика проиллюстрирована на примере определения кривой малоциклового усталости для образцов, изготовленных из гибкой трубы HS80, подвергнутых циклическому деформированию до поломки в условиях мягкого режима нагружения. С использованием предложенной математической модели построена кривая усталости для 50% вероятности разрушения и ряд кривых усталости с различной величиной накопленного усталостного повреждения.

Ключевые слова: предел прочности, циклическое деформирование, малоцикловая усталость, накопление повреждений

THE DATA PROCESSING OF LOW-CYCLE FATIGUE TESTS ON BASE OF KINETIC THEORY OF FATIGUE

Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V., Ilinykh V.N.

Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, e-mail: Kv.Syzzr@gmail.com

To describe the results of tests of samples destruction in a field of low-cycle deforming authors use mathematical model developed in the kinetic theory of mechanical fatigue. Two additional parameters were included in developed model. First parameter characterizes the initial damage of part material, which exists before cyclic deforming of part. Second parameter describes the part resistance against the growth of fatigue cracks. Proposed earlier methods of experimental determination of these parameters values in real operational tests of parts do not allow to obtain required information. The paper considers the task of calculation of these parameters based on results of sample's longevity tests and developed mathematical model. Described task is leaded to two transcendental equations solving. Developed mathematical model allowed to create the method of statistic data processing for samples low-cycle fatigue tests. The method is illustrated on a example of low-cyclic fatigue curve description for the samples made of HS80 pipe steel, tested in conditions of cyclic deforming to its breakage at constant displacement amplitude. The fatigue curve corresponding to 50% of samples destruction probability and also several fatigue curves characterized by different values of accumulated fatigue damage.

Keywords: tensile strength, cyclic deforming, low-cycle fatigue, damages accumulation

В практике обработки результатов испытаний образцов на циклическую прочность с целью построения кривой усталости (кривой Велера) в настоящее время наибольшее распространение получили регрессионные зависимости [2], являющиеся линейными в системе координат $\log N - \sigma$, где N – число циклов деформирования, σ – максимальная амплитуда напряжения, возникающая в месте разрушения образца. Эти зависимости в рамках статистических моделей рассеивание механических и усталостных свойств материала учитывают, однако какого-либо физического наполнения не имеют. Обеспечение требуемой долговечности и надежности циклически нагружаемых изделий с заданной вероятностью неразрушения

связано с необходимостью использования более сложных моделей, отражающих процесс накопления усталостных повреждений в изделиях. Именно такие модели разработаны в кинетической теории механической усталости [1]. Наиболее важным практическим значением этой теории является возможность построения кривых усталости, соответствующих различной величине поврежденности материала (D): от $D = D_0 \geq 0$, характеризующей начальное повреждение материала детали, которое имеет место еще до начала ее циклического деформирования, вплоть до предельной величины $D = D_k \leq 1$, соответствующей разрушению детали (образца) вследствие накопленных усталостных повреждений.

Целью настоящей работы является построение алгоритмов обработки данных малоцикловых испытаний (совокупности $i = \overline{1, n}$ значений напряжений σ_i и числа циклов N_i до разрушения образцов) на основе полуэмпирических моделей, разработанных в рамках кинетической теории усталости, а также методики расчета границ доверительных интервалов кривой малоцикловой усталости.

Математическая модель кривой малоцикловой усталости

В работе [1] для описания кривой многоцикловой усталости получено выражение

$$N = \frac{Q}{\sigma} \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma - \sigma_r}{\sigma_r - \sigma_{rT}} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (1)$$

где N – число циклов нагружения; σ – максимальное напряжение цикла; Q – коэффициент выносливости; σ_r – предел выносливости детали при коэффициенте асимметрии цикла r ; σ_{rT} – циклический предел текучести (ниже его уровня следы пластической деформации даже после нескольких миллионов циклов нагружения отсутствуют).

Определение значений параметров σ_r , σ_{rT} и Q зависимости (1) на основе имеющейся совокупности данных разрушения образцов σ_p , N_p , $i = \overline{1, n}$ выполняется путем минимизации функции [4, 3]:

$$\Phi(Q, \sigma_r, \sigma_{rT}) = \sum_{i=1}^n \left\{ N_i - \frac{Q}{\sigma_i} \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma_i - \sigma_r}{\sigma_r - \sigma_{rT}} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} \right\}^2 \xrightarrow{Q, \sigma_r, \sigma_{rT}} \min, \quad (2)$$

построенной в соответствии с методом наименьших квадратов.

Математическое описание кривой усталости в малоцикловой области ($N \leq 10^5$) представлено в работе [1] выражением

$$\sigma = \sigma_B + \vartheta \cdot \lg \left(\frac{N}{H} + 1 \right), \quad (3)$$

где σ_B – предел прочности материала; ϑ – угол наклона кривой усталости в системе координат $\log N - \sigma$; H – число циклов деформирования до верхней точки перегиба

кривой малоцикловой усталости, рассчитываемое по выражению (1) при $\sigma = \sigma_B$:

$$H = \frac{Q}{\sigma_B} \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma_B - \sigma_r}{\sigma_r - \sigma_{rT}} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (4)$$

в котором коэффициент Q описывается зависимостью

$$Q = -Q_T \ln \left[1 - \exp \left(-\frac{D_0}{1 - D_0} \times \frac{\sigma}{\sigma_r - \sigma_{rT}} \cdot \frac{\sigma_B}{\sigma_B - \sigma_r} \right) \right], \quad (5)$$

где Q_T – коэффициент, характеризующий сопротивление детали росту усталостных трещин.

В работе [1] отмечено, что величины D_0 и Q_T могут быть определены на основе: зафиксированных длин усталостных трещин, измерений поврежденных площадей испытываемых деталей, путем расчета моментов инерции поврежденных сечений деталей. Однако в реальных условиях испытаний получение такой информации часто весьма затруднено, а в подавляющем большинстве случаев просто невозможно. Тем не менее знание начального D_0 и предельного значения параметра D_k позволяет при заданной величине действующего напряжения σ и числа циклов нагружения N оценить достигнутый уровень текущей поврежденности материала D и в конечном итоге, реализовать процедуру расчета остаточной долговечности детали (образца).

Для кривой многоцикловой усталости (1) задача определения величин D_0 и Q_T на основе данных усталостных испытаний образцов σ_p , N_p , $i = \overline{1, n}$ впервые решена в работе [4]. В настоящей работе подобная задача решается для кривой малоцикловой усталости (3).

Воспользуемся зависимостью (5), которую преобразуем следующим образом:

$$\exp(-Q/Q_T) + \exp \left[-\frac{D_0}{1 - D_0} \times \frac{\sigma}{(\sigma_r - \sigma_{rT})} \cdot \frac{\sigma_B}{(\sigma_B - \sigma_r)} \right] = 1. \quad (6)$$

После решения задачи (2) значения параметров σ_r , σ_{rT} и Q на основе имеющейся совокупности данных усталост-

ных испытаний $\sigma_p, N_p, i = \overline{1, n}$ определены: $\sigma_r^*, \sigma_{rT}^*$ и Q^* . В этом случае выражение (6) получает вид

$$\exp\left(\frac{-Q^*}{Q_T}\right) + \exp\left[-\frac{D_0}{1-D_0} \times \frac{\sigma}{(\sigma_r^* - \sigma_{rT}^*)} \cdot \frac{\sigma_B}{(\sigma_B - \sigma_r^*)}\right] = 1. \quad (7)$$

Зададимся средним значением предела прочности $\sigma_B = \overline{\sigma_B}$. Тогда в уравнении (7) неизвестными являются только два параметра:

$$\left. \begin{aligned} \exp(-Q^*/Q_T) + \exp\left[-\frac{D_0}{1-D_0} \cdot \frac{\overline{\sigma_B}}{(\sigma_r^* - \sigma_{rT}^*)} \cdot \frac{\overline{\sigma_B}}{(\overline{\sigma_B} - \sigma_r^*)}\right] &= 1; \\ \exp(-Q^*/Q_T) + \exp\left[-\frac{D_0}{1-D_0} \cdot \frac{\sigma_r^*}{(\sigma_r^* - \sigma_{rT}^*)} \cdot \frac{\overline{\sigma_B}}{(\overline{\sigma_B} - \sigma_r^*)}\right] &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Решая систему (8) двух трансцендентных относительно D_0 и Q_T уравнений с использованием численных методов, определим искомые значения D_0^* и Q_T^* .

Принимая во внимание, что текущая поврежденность материала описывается выражением (5) при замене D_0 на D , и учитывая результат решения системы (8), математическую модель кривой малоциклового усталости (4) преобразуем к виду

$$N = \left(1 - 10^{\frac{\sigma - \overline{\sigma_B}}{\vartheta}}\right) \cdot Q_T^* \cdot B_0 \cdot \ln \left[1 - \exp\left(-\frac{D \cdot \overline{\sigma_B}}{(1-D)(\sigma_r^* - \sigma_{rT}^*)(\overline{\sigma_B} - \sigma_r^*)} \cdot \sigma\right) \right], \quad (9)$$

где

$$B_0 = \frac{\ln \left\{ 1 + \left[\exp\left(\frac{\overline{\sigma_B} - \sigma_r^*}{\sigma_r^* - \sigma_{rT}^*}\right) - 1 \right]^{-1} \right\}}{\overline{\sigma_B}}.$$

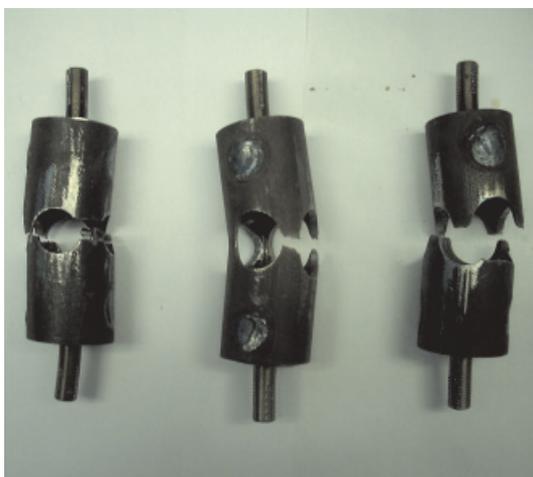


Рис. 1. Разрушенные образцы гибких труб

тра: D_0 и Q_T . Для их определения воспользуемся следующим приемом. Поскольку величина D_0 характеризует поврежденность материала в исходном состоянии, ее значение от величины действующего напряжения (σ) при деформировании образца не зависит. То есть D_0 является постоянной для всего диапазона изменения напряжений σ . Если, в дополнение к отмеченному, предположить, что и коэффициент Q_T в диапазоне

изменения напряжений $\sigma_r^* \leq \sigma \leq \overline{\sigma_B}$ также является величиной постоянной, то для расчета D_0 и Q_T войдем в уравнение (7) дважды: при напряжении $\sigma = \overline{\sigma_B}$ и $\sigma = \sigma_r^*$. В результате получим

Обработка данных малоциклового испытания образцов

На основе модели (9) осуществим обработку данных малоциклового испытания образцов из гибкой трубы HS-80. В результате растяжения образцов гибкой трубы на разрывной машине до разрушения (рис. 1) определено значение $\sigma_B = 602,1$ МПа. В процессе малоциклового деформирования вырезанных из гибкой трубы экспериментальных образцов прямоугольной формы на стенде (рис. 2) в условиях жесткого нагружения, получена совокупность данных $N_p, \sigma_p, i = \overline{1, 40}$. Обработка их в соответствии с вышеизложенной методикой позволила установить параметры модели (9): $\vartheta = -121,811$; $Q_T^* = 1,53 \cdot 10^6$; $\sigma_r^* = 263,621$ МПа; $\sigma_{rT}^* = 201,914$ МПа.



Рис. 2. Стенд для испытаний образцов

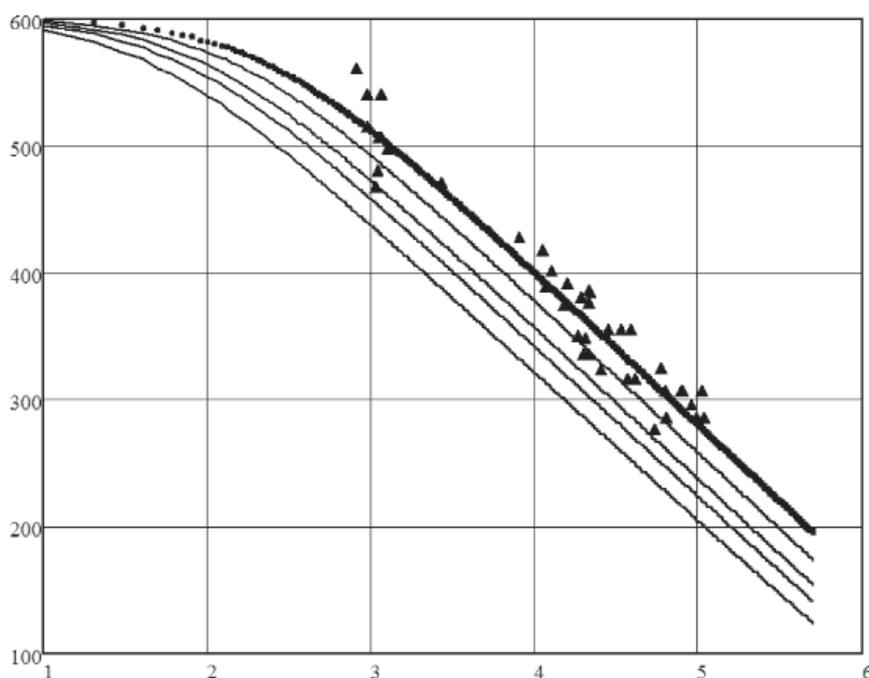


Рис. 3. Кривые малоциклового усталости с различной величиной поврежденности материала (гибкая труба HS-80)

На рис. 3 в координатах $\log N - \sigma$ представлены экспериментальные точки и ряд кривых усталости с величиной поврежденности:

$$D = D_0^* = 6,006 \cdot 10^{-11} \text{ (толстая линия);}$$

$$10^{-7}; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}.$$

Анализируя рис. 3, нетрудно видеть, что при $D = D_0$ и $\sigma_B = \sigma_B$ выражение (9) описывает кривую усталости (толстая линия), соответствующую 50% вероятности

разрушения образцов. По мере увеличения поврежденности материала кривая усталости смещается влево, в область с меньшей долговечностью образцов.

Математическая модель кривой малоциклового усталости в виде (9) позволяет не только определять снижение числа циклов деформирования образцов до разрушения в зависимости от накопленного усталостного повреждения, но и решать задачу определения эквивалентного по повреждающему воздействию напряжения при заданном

блоке изменения нагрузки. Методика решения этой задачи, разработанная на основе построенной математической модели (9), представлена в работе [5].

Заключение

На базе кинетической теории механической усталости построена математическая модель кривой Велера для малоциклового участка испытаний, отражающая процесс накопления усталостных повреждений в ходе циклического деформирования образцов. На основе полученных в ходе испытаний образцов на малоцикловую усталость экспериментальных данных разработаны алгоритмы определения параметров модели. С использованием разработанной модели обработаны данные малоцикловых усталостных испытаний образцов из гибкой трубы.

Список литературы

1. Почтенный Е.К. Кинетическая теория механической усталости и ее приложения. – Минск: Наука и техника, 1973. – 213 с.
2. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
3. Сызранцев В.Н., Ильиных В.Н. и др. Определение прочностных свойств стали гибких труб // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2013. – № 4. – С. 76–77.
4. Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В., Голофаст С.Л., Иванова Ю.С. Развитие кинетической теории усталости // Безопасность критических инфраструктур и территорий: сборник трудов I и II Всероссийских конференций и XI и XII школ молодых ученых 2007–2008 гг. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009 – С. 230–233.

5. Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В., Черная Л.А. Расчет эквивалентных по повреждающему воздействию напряжений // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – № 10. – С. 30–35.

References

1. Pochtenny E.K. Kineticheskaya teoriya mekhanicheskoy ustalosti i ee prilozheniya [*Kinetic theory of mechanical fatigue and its application*], Minsk, Science and engineering, 1973, 213p.
2. Stepnov M.N. Statisticheskie metody obrabotki rezultatov mekhanicheskikh ispytaniy [*Statistical methods of mechanical test data processing*] Moscow, Mashinostroenie, 1985, 232 p.
3. Syzrantsev V.N., Ilinykh V.N. Territoriya NEFTEGAZ, 2013, no. 4, pp. 76–77.
4. Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V., Golofast S.L., Ivanova Yu.S. Bezopasnost' kriticheskikh infrastruktur i territoriy, Sbornik trudov I i II Vserossijskikh konferenciy, Ekaterinburg, UrO RAN, 2009, pp. 230–233.
5. Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V., Chernaya L.A. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie, 2013, no. 10, pp. 30–35.

Рецензенты:

Лопатин Б.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Техническая механика», ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), филиал ЮУрГУ, г. Златоуст;

Трубачёв Е.С., д.т.н., профессор, и.о. зав. кафедрой «Конструкторско-технологическая подготовка машиностроительных производств», ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова», г. Ижевск.

Работа поступила в редакцию 09.02.2015.