

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАЛОСТЬ НАТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ

О.Ф. Трофимов

Показано, что при наличии в испытуемом объекте нескольких концентраторов напряжений кривая усталости, даже полученная методом регрессионного анализа, может давать искаженное представление о прогнозируемой с ее помощью долговечности конструкции. Предлагается методика анализа, устраняющая погрешности прогноза для этих случаев. Даются рекомендации по распространению данной методики и на расчетные методы оценки усталостной долговечности конструкций.

Ключевые слова: испытание конструкции, усталостная прочность, кривая усталости, долговечность, прогнозирование ресурса.

CHARACTERISTICS OF ASSESSMENT OF STRUCTURAL DURABILITY BASED ON THE RESULTS OF FATIGUE TEST OF PHYSICAL OBJECTS

O.F. Trofimov

The paper shows that if there are several stress concentrators in the tested object, the fatigue curve, even when obtained using regression analysis method, may give a distorted view about the structural durability which is predicted with its help. The analysis procedure which eliminates the prediction inaccuracy for these cases is proposed. The recommendations for this procedure propagation and for the computational methods of assessment of structure fatigue life are presented.

Keywords: structure test, fatigue strength, fatigue curve, durability, resource prediction.

Введение

Современная тенденция к увеличению срока службы машин и их надежности неизбежно приводит к необходимости предотвращения усталостных разрушений их узлов и деталей в условиях эксплуатации. Расчетные методы, оценивающие сроки появления таких разрушений, обладают относительно низкой точностью, поэтому любая разработка новой конструкции, как правило, сопровождается большим объемом опытно-конструкторских работ, включающих в себя и испытания на выносливость натуральных объектов.

Очень часто при проведении таких испытаний методически придерживаются классического

подхода, рекомендуемого ГОСТ 25.507-85, который для одноступенчатых испытаний практически не отличается от ГОСТ 25.507-79 для испытаний образцов металла. Как правило, это испытания при последовательно снижающихся напряжениях до получения предельного уровня (предела выносливости), при котором усталостное разрушение не возникает при произвольно большом числе циклов. От анализа результатов таких испытаний зависит оценка ресурса разрабатываемой конструкции. Однако на практике часто встречаются объекты, при упрощенном анализе результатов испытаний которых, аналогично анализу для металлических образцов, могут возникнуть существен-

ные ошибки при оценке ресурса испытанной конструкции.

Целью данной работы является представление методики анализа усталостной долговечности деталей, имеющих несколько очагов усталостного разрушения, основанной на обработке результатов стендовых испытаний натуральных объектов, и ее распространение на оценку долговечности вновь проектируемых конструкций.

Особенности анализа результатов усталостных натуральных объектов

При анализе результатов испытаний имеют место два случая. В первом случае исследуемая конструкция должна иметь неограниченный ресурс, т.е. эксплуатационные напряжения в ней не должны превышать предела выносливости. В этом случае особых проблем с анализом, основанном на классическом подходе, не возникает, и методика оценки запаса по усталостной прочности хорошо известна [1, 2]. Здесь важно получить требуемое значение предела выносливости детали, совершенствуя конструкцию в очагах разрушения, выявленных в процессе испытаний.

Второй случай анализа связан с тем, что существует целый ряд конструкций, в которых по экономическим и эксплуатационным условиям не удастся обеспечить неограниченный ресурс, поскольку в процессе эксплуатации напряжения в таких конструкциях с определенной вероятностью могут превышать предел выносливости, полученный для испытанных объектов. К таким объектам относятся конструктивные элементы транспортных машин, авиационных конструкций, кораблей и т.д. Тогда в этих условиях возникает необходимость определять не только предел выносливости, но и долговечность объекта, так как в его элементах будет происходить накопление усталостных повреждений, которые, в конце концов, приведут к его разрушению. В этом случае для оценки долговечности используется не только значение предела выносливости конструкции, но и параметры кривой усталости при напряжениях выше него [3]:

$$N_{\text{сум}} = N_0 \cdot a_p \sigma_{-1д}^m \left[\int_{\sigma_{-1д}}^{\sigma_{a\max}} \sigma_a^m f(\sigma_a) d\sigma_a \right]^{-1},$$

где $N_{\text{сум}}$ – долговечность до появления разрушения, выраженная в числе циклов процесса нагружения; $f(\sigma_a)$ – плотность распределения

амплитуд σ_a в эксплуатационном процессе нагружения; a_p – корректирующий коэффициент; $\sigma_{a\max}$ – максимальный уровень амплитуд, учитываемый в накоплении усталостного повреждения.

Остальные параметры в этом уравнении являются членами уравнения кривой усталости объекта, записанного в форме

$$\sigma_{ai}^m N_i = \sigma_{-1д}^m N_0 = C, \quad (1)$$

где σ_{ai} и N_i – текущее значение амплитуды действующих переменных напряжений и соответствующая ему долговечность, выраженная в числе циклов данных амплитуд; $\sigma_{-1д}$ – предел выносливости испытанного объекта; N_0 – число циклов по кривой усталости, соответствующее выходу напряжений на уровень предела выносливости; m – параметр, характеризующий кривизну кривой усталости на участке выше предела выносливости; C – постоянный коэффициент, характеризующий данную кривую усталости.

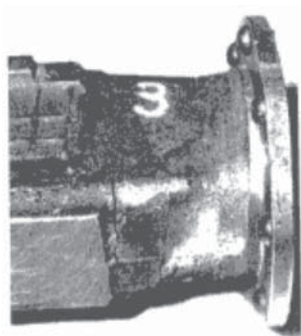
Особенностью оценки в данном случае является то, что сложные объекты, конструкция которых исходит из принципа равнопрочности, как правило, имеют множество зон концентрации напряжений, каждое из которых является потенциальным местом разрушения. На рисунках 1 и 2 показаны зоны разрушения объектов в процессе стендовых испытаний, при которых разрушения появлялись в разных местах конструкции.

Известно, что один и тот же материал конструкции в зависимости от значения коэффициента снижения предела выносливости $K_{\text{сд}}$ в зоне усталостного разрушения детали показывает не только различные значения пределов выносливости, но также и различные значения параметров кривой усталости m и N_0 . На рисунке 3 показано изменение кривых усталости для трех деталей, изготовленных из одного материала, но имеющих отличающиеся коэффициенты $K_{\text{сд}}$.

В том случае, когда сложные детали в процессе испытаний показывают несколько возможных мест разрушения, то такое влияние концентраторов на характеристику кривой усталости ставит вопрос о правомочности классического подхода к анализу результатов, в котором уравнения кривой усталости рассчитывают по всем полученным при испытаниях значениям чисел циклов, абстрагируясь от самих мест разрушения. Возникает возмож-



а



б



в

Рис. 1. Зоны разрушений при испытаниях картеров задних мостов грузового автомобиля:

а – по отверстию крепления редуктора; б – вблизи рессорной площадки; в – по колесной цапфе

ность искажения информации о фактических характеристиках усталости в зоне потенциального разрушения в условиях эксплуатации.

Таким образом, вопрос о степени достоверности оценок долговечности сложных деталей в случае игнорирования характеристик усталости конкретных очагов возможного разрушения подлежит дополнительному рассмотрению.

Методика проведения испытаний и результаты эксперимента

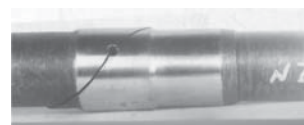
Для исследования были использованы результаты испытаний довольно простой детали – шатуна автомобильного двигателя. Испытания проводились при гармоническом цикле нагружения растяжением-сжатием с коэффициентом асим-



а



б



в

Рис. 2. Зоны разрушения при испытаниях полуосей грузового автомобиля:

а – по шлицам; б – по стержню; в – по отверстию воздухопровода

метрии $r = -0,476$, характерным для данной детали в определенных условиях эксплуатации. Испытания проводились в соответствии с рекомендациями ГОСТ25.507-85, т.е. путем последовательного снижения амплитуды нагрузки до выявления предела выносливости. За базу испытаний было принято 10^7 циклов нагружения.

При проведении испытаний были выявлены два характерных места усталостного разрушения детали: по стержню шатуна и по верхней головке. Характер разрушений представлен на рис. 4.

Результаты испытаний, проведенных разными способами, представлен на рис. 5. Уравнение кривой усталости получено в форме (1) по всем результатам, игнорируя место разрушения, исходя из того, что любое разрушение – это отказ детали (линия 3). Аналогичные уравнения получены для каждого из очагов разрушения: линия 1 – для разрушения по стержню и линия 2 – для разрушения по верхней головке.

Полученные регрессионные уравнения в логарифмическом виде представлены ниже: линия 1: $\lg N = 24,93 - 8,259 \lg P$; $P_r = 150$ кН; линия 2: $\lg N = 7,462 - 0,541 \lg P$; $P_r = 100$ кН; (2) линия 3: $\lg N = 12,81 - 2,984 \lg P$; $P_r = 100$ кН, где P – текущее значение амплитуды нагрузки; P_r – значение амплитуды, соответствующее пределу выносливости.

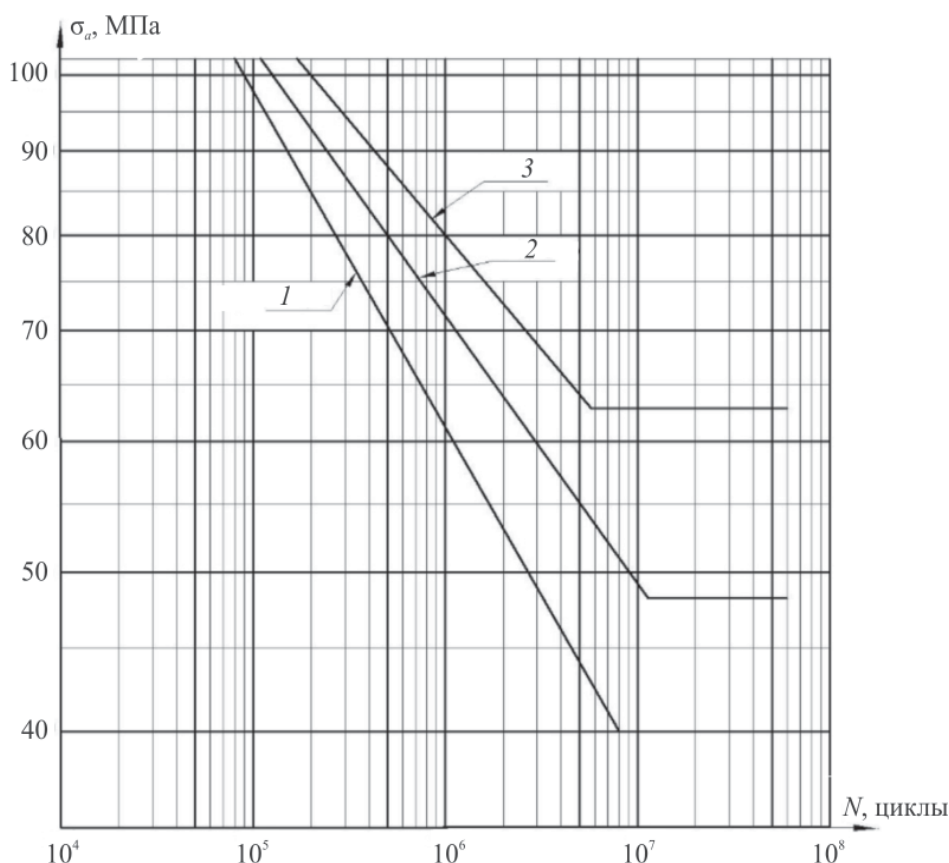


Рис. 3. Влияние уровня концентрации напряжений на изменение параметра m кривой усталости материала детали:

1 – корпус поворотного кулака, $K_{\text{сд}} = 3,3$, $m = 5,20$; 2 – картер заднего моста, $K_{\text{сд}} = 2,7$, $m = 6,27$;
3 – чашка дифференциала, $K_{\text{сд}} = 2,2$, $m = 7,66$

Как видно из уравнений, места разрушений имеют совершенно отличающиеся параметры кривой усталости. Так, для разрушения по стеблю предел выносливости обнаруживается при нагрузке с амплитудой $P_r = 150$ кН и показателе $m = 8,259$, а для концентратора в зоне верхней головки – при $P_r = 100$ кН и показателе $m = 0,541$. При этом они не совпадают с параметрами осредненной кривой, у которой нагрузка, соответствующая пределу выносливости, составляет $P_r = 100$ кН и показатель $m = 2,984$.

Рассмотрим влияние этих различий на оценку долговечности объекта, имеющего несколько очагов усталостного разрушения.

Анализ результатов

Поскольку для оценки ресурса усталостной прочности шатуна эти расхождения не принципиальны, так как он относится к первой группе деталей, где для оценки используется только предел выносливости, интерес представляет

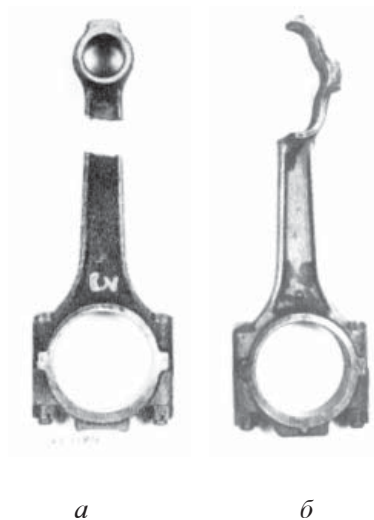


Рис. 4. Зоны разрушения деталей шатуна в процессе усталостных испытаний:

а – по стеблю; б – по верхней головке

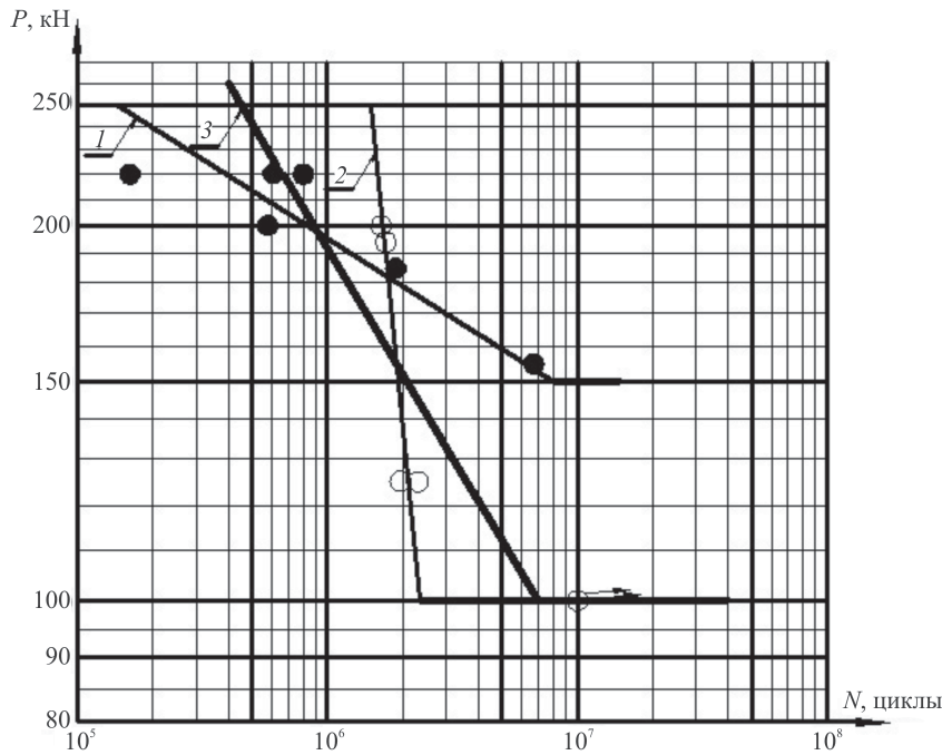


Рис. 5. Кривые усталости:

1 (темные точки) – для разрушений стебля; 2 (светлые точки) – для разрушений головки; 3 – осредненная кривая для разрушений детали

второй расчетный случай, когда такое расхождение наблюдалось бы на деталях, например, шасси или ходовой части автомобиля, где нагрузки систематически превышают предел выносливости.

Рассмотрим случай движения автомобиля по однородному дорожному покрытию с постоянной скоростью. При таком режиме движения характер нагружения приближается к стационарному случайному процессу [4]. При таком нагружении для оценки долговечности можно воспользоваться закономерностями трансформации параметров кривой усталости в параметры функции долговечности, записанной в форме

$$N_D = N_S \left(\frac{S_w}{S_x} \right)^q, \quad (3)$$

где N_D – долговечность, выраженная в числе циклов до разрушения объекта; N_S – долговечность при воздействии случайного процесса с уровнем предела повреждаемости; S_x – среднеквадратичное отклонение (СКО) напряжений в эксплуатационном процессе нагружения; S_w – уровень предела повреждаемости случайного процесса нагружения, в котором максимальные амплитуды не превышают предела выносливо-

сти детали; q – показатель, характеризующий крутизну функции долговечности.

Величина S_w определяется как отношение предела выносливости объекта σ_w к его пиковому фактору P_f

$$S_w = \sigma_w / P_f;$$

$$P_f = x_{\max} / S_x,$$

где $x_{\max}$ – максимальный уровень выбросов напряжений в эксплуатационном процессе нагружения.

Переходя в приведенных результатах эксперимента к показателям в напряжениях, получаем значения предела выносливости в режиме нагружения рассматриваемого объекта $\sigma_r = 146$ МПа. Используя уравнения (2), значение предела выносливости материала детали $\sigma_{-1d} = 190$ МПа и преобразование параметров в соответствии с рекомендациями [5], получаем уравнения функций долговечности для рассматриваемых случаев. Эти уравнения в логарифмической форме

$$\lg N_D = \lg N_S + q(\lg S_w - \lg S_x)$$

представлены ниже.

Для оценки разрушения по осредненной кривой усталости:

$$\lg N_D = 7,630 + 1,766 (1,486 - \lg S_x). \quad (4)$$

Для разрушения по концентратору 1:

$$\lg N_D = 8,063 + 4,890 (1,659 - \lg S_x). \quad (5)$$

Для разрушения по концентратору 2:

$$\lg N_D = 7,440 + 0,320 (1,486 - \lg S_x). \quad (6)$$

При расчетах использовалось значение пикового фактора $P_f = 4,8$ [6].

Полученные уравнения (4)–(6), выражающие долговечность объекта N_D в числах циклов до ожидаемого появления усталостного разрушения в зависимости от интенсивности эксплуатационного процесса нагружения, выраженного в СКО этого процесса (S_x), представлены на рис. 6.

Из анализа функций долговечности видно, что при напряжениях вблизи уровня повреждаемости ($S_w = 146/4,8 = 30,4$ МПа), когда СКО процесса нагружения $S_x = 30,5$ МПа, разрушение локализуется в концентраторе 2. В этом случае разрушение в зоне этого концентратора ожидается раньше, чем дает оценка по осредненным параметрам (линия 3). При этом ошибка, с учетом того, что график представлен в логарифмических координатах, составляет 150%. Разрушение по концентратору 1 в этих условиях исключено.

При более высоких СКО процесса нагружения, составляющих 30%....55% от значения предела выносливости объекта ($41 < S_x < 80$ МПа), расчет по осредненной кривой дает заниженные значения долговечности, наибольшая ошибка при $S_x = 65$ МПа достигает 190%.

При значениях СКО процесса, составляющего 45% от предела выносливости объекта и выше, местом разрушения становится концентратор 1. В более жестких условиях эксплуатации, когда СКО процесса нагружения составит более 55% от предела выносливости объекта, расчет по осредненной кривой усталости снова даст завышенную оценку долговечности. Фактическая долговечность с разрушением в зоне концентратора 1 может оказаться сколь угодно ниже полученной расчетом по формализованной кривой усталости. Так, при СКО, составляющем 75% от предела выносливости объекта ($S_x = 109,5$ МПа), ошибка достигает уже 280%. При дальнейшем ужесточении эксплуатационного процесса нагружения ошибка в оценке долговечности резко возрастает.

Таким образом, оценка долговечности, проведенная даже по результатам натурных испытаний, но без учета влияния отдельных концентраторов напряжений для объектов, имеющих несколько мест разрушения, приводит к существенным ошибкам.

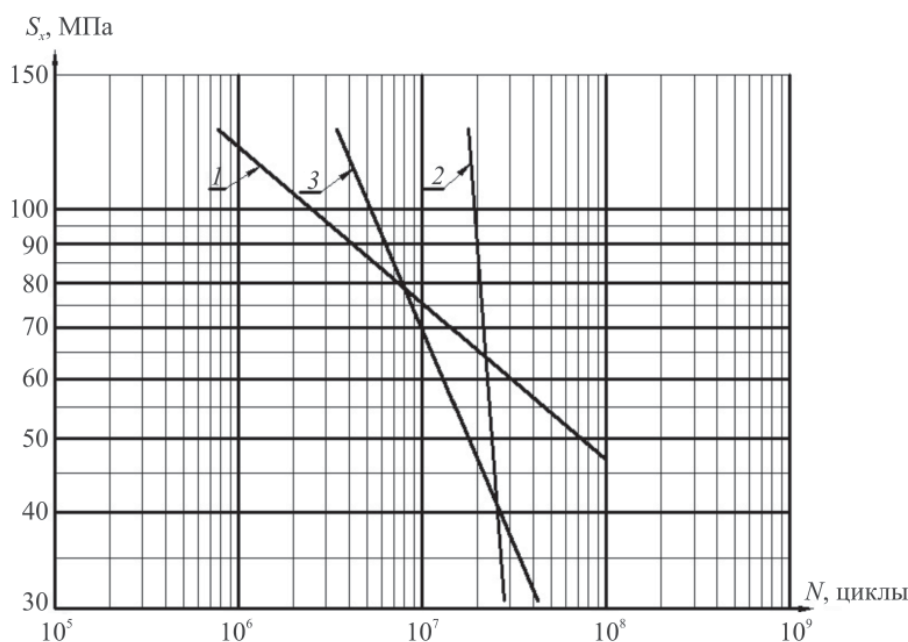


Рис. 6. Функции ожидаемой долговечности исследуемого объекта:

линия 1 – для разрушения по концентратору 1; линия 2 – для разрушения по концентратору 2;
линия 3 – для разрушения без учета локализации повреждения

Оценка долговечности проектируемых конструкций

Предложенная методика анализа усталостной долговечности, кроме обработки результатов стендовых испытаний натурных деталей, может быть распространена и на оценку долговечности вновь проектируемых конструкций. В этом случае последовательность операций выглядит следующим образом.

Используя метод конечных элементов [7], который успешно применяется для решения различных задач механики, в том числе, для исследования концентрации напряжений, находим значения коэффициентов концентрации напряжений в опасных зонах конструкции. Далее, используя механические характеристики материала детали и полученное значение коэффициента концентрации, а также справочные значения масштабного фактора и коэффициента качества обработки поверхности по известным расчетным зависимостям [1, 2] получаем значения суммарного коэффициента снижения предела выносливости $K_{сд}$ и предела выносливости детали $\sigma_{-1д}$ в зоне данного концентратора.

Для получения остальных параметров кривой усталости (1) можно воспользоваться их зависимостью от значения предела выносливости. На основе статистического анализа экспериментальных кривых усталости более 30 натурных деталей из различных сталей и чугунов автором рекомендованы следующие соотношения [8]:

1) для параметра m

$$m = 35 \frac{\sigma_{-1д}}{\sigma_B}, \quad (7)$$

где σ_B – предел прочности материала;

2) параметр N_0 определяется по уравнению (1), используя значение коэффициента C из такой зависимости:

$$\lg C = 4,71 + 1,61m. \quad (8)$$

Параметры, полученные с помощью этих соотношений, дают хорошее совпадение с практическими результатами и даже рекомендованы ГОСТ 25.504-82 для применения в расчетах [9]. В рекомендациях стандарта по методам расчета характеристик сопротивления усталости также использована эта зависимость, преобразованная для определения параметра m непосредственно через полученное значение $K_{сд}$. Преобразование сделано для частного

случая использования материалов, имеющих $\sigma_B = 580-1280$ МПа. При этих параметрах зависимость (7) имеет вид:

$$m = \frac{1}{K_{сд}} \left(5 + \frac{\sigma_B}{80} \right).$$

Поскольку зависимости (7) и (8) получены методом регрессионного анализа, они отражают наиболее вероятностное значение параметров. В случае исследования возможных отклонений можно воспользоваться 99% доверительными границами на значения этих параметров. Значения доверительных границ следующие:

$$m = 35 \left(\frac{\sigma_{-1д}}{\sigma_B} \pm 0,043 \right);$$

$$\lg C = (4,71 \pm 0,56) + m(1,61 \pm 0,53).$$

Применяя уравнения кривой усталости для каждой из исследуемых зон концентрации напряжений, можно получить для этих зон функции долговечности, используя закономерности трансформации их параметров [5].

Для случая стационарного случайного процесса эксплуатационного нагружения расчет параметров функции долговечности (3) ведется по зависимостям:

$$\text{при } \frac{\sigma_T}{\sigma_{-1д}} < 3,4$$

$$q = m \left(0,15 + 0,13 \frac{\sigma_T}{\sigma_{-1д}} \right); \lg N_s = 7,4 + 0,0803 m;$$

$$\text{при } \frac{\sigma_T}{\sigma_{-1д}} \geq 3,4$$

$$q = m \left(0,45 + 0,04 \frac{\sigma_T}{\sigma_{-1д}} \right); \lg N_s = 11,3 - 0,312 m,$$

где σ_T – предел текучести материала детали.

В случае нестационарного случайного процесса нагружения, формирующегося при переменных условиях эксплуатации [10], расчет параметров функции долговечности проводится дополнительно по зависимостям:

$$\text{при } \frac{\sigma_T}{\sigma_{-1д}} < 3,4$$

$$q = m \left(0,15 + 0,13 \frac{\sigma_T}{\sigma_{-1д}} \right); \lg N_s = 10,978 - 0,11 m;$$

$$\text{при } \frac{\sigma_T}{\sigma_{-1д}} \geq 3,4$$

$$q = m \left(4,032 - 0,697 \frac{\sigma_T}{\sigma_{-1д}} \right); \lg N_s = 23,84 - 1,68 m.$$

Полученные уравнения функций долговечности наносятся на логарифмическую сетку аналогично тому, как приведено на рис. 6, из которых для эксплуатационного процесса нагружения с известным СКО (S_x) определяются ожидаемый ресурс конструкции и место возможного усталостного разрушения. В случае, если ресурс оказывается недостаточным, имеется возможность изменения геометрии концентратора в выясненной зоне разрушения и уточнение изменения ожидаемого ресурса последующим расчетом по изложенной методике.

Заключение

Результаты проведенной работы показывают, что для объектов, имеющих при испытаниях несколько очагов усталостного разрушения, анализ, основанный на том что все результаты одинаково характеризуют отказ объекта, приводит к ошибочным выводам. Для таких объектов необходимо учитывать параметры выносливости в каждом из выявленных очагов разрушения детали для более объективной и точной оценки ресурса конструкции в различных условиях эксплуатационного нагружения. Полученные результаты также будут полезны при оценке ресурса конструкций по усталостной прочности на стадии проектирования. Учет влияния на ресурс конструкции каждой из зон концентрации напряжений поможет выяснить ожидаемые зоны разрушения для различных условий эксплуатации объекта.

Список литературы

1. *Феодосьев В.И.* Соппротивление материалов. М.: «Наука», 1986. – 512 с.
2. *Когаев В.П., Дроздов Ю.Н.* Прочность и износостойкость деталей машин. М.: Высшая школа, 1991. – 318 с.
3. Методические указания. Методы расчета деталей машин на выносливость в вероятностном аспекте. М.: Изд-во стандартов, 1980. – 32 с.
4. *Трофимов О.Ф., Красиков В.С.* Возмущающее воздействие микропрофиля дорог как параметр усталостного повреждения автомобильных конструкций // Вопросы расчета, конструирования и исследования автомобиля. 1975. Вып. 6. С. 235–246.
5. *Трофимов О.Ф.* Прогнозирование усталостных повреждений материалов конструкций при стохастических режимах нагружения // Машиностроение и инженерное образование. 2012. № 3. С. 17–23.
6. *Трофимов О.Ф.* Влияние уровня выбросов в случайном процессе нагружения на накопление усталостного повреждения в материале конструкций // Машиностроение и инженерное образование. 2014. № 2. С. 20–27.
7. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. – 541 с.
8. *Гольд Б.В., Оболенский Е.П., Стефанович Ю.Г., Трофимов О.Ф.* Прочность и долговечность автомобиля. М.: Машиностроение, 1974. – 326 с.
9. ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. М.: Изд-во стандартов, 1982. С. 17–18.
10. *Трофимов О.Ф.* Влияние нестационарности случайных процессов нагружения на усталостное повреждение в материалах конструкций // Машиностроение и инженерное образование. 2013. № 1. С. 46–53.

Материал поступил в редакцию 08.12.14

**ТРОФИМОВ
Олег Федорович**

E-mail: oleg31934@hotmail.ru
Тел.: (495) 675-77-36

Кандидат технических наук, профессор кафедры технической механики ФГБОУ ВПО «МГИУ». Сфера научных интересов: усталость металлов, прогнозирование усталостной долговечности деталей транспортных машин. Автор 56 научных работ.