

УДК 621.431.73

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОГО РЕСУРСА И НАДЕЖНОСТИ РАМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВАГОНОВ

© 2013 г.

В.М. Волков, И.В. Петрова

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

Triha84@mail.ru

Поступила в редакцию 01.02.2013

Рассматривается решение задачи надежности и долговечности боковой рамы грузового вагона в рамках принципа безопасного ресурса, т.е. на стадии образования многоциклового усталостной трещины в зонах концентрации напряжений с учетом стохастичности нагрузок, усталостной прочности материала и коэффициента концентрации напряжений.

Ключевые слова: надежность, ресурс, многоцикловая усталость, коэффициент концентрации напряжений.

Введение

В зоне буксового проема (рис. 1) имеют место эксплуатационные нагрузки, обусловленные вибрацией от буксового узла. В качестве модели многоциклового усталости используется степенная зависимость числа циклов N_* до образования усталостной трещины от амплитуды напряжения σ , предела усталости σ_{-1} , эффективного коэффициента концентрации напряжений k_e и отношения среднего напряжения σ_m в конструкции к пределу прочности σ_b материала [1].



Рис. 1

Для стационарного случайного нагружения боковой рамы в зоне буксового проема используется зависимость времени до образования усталостной трещины от значений стандарта напряжений [1, 2], полученная на основе гипотезы линейного суммирования повреждений и закона Вейбулла:

$$T_* = T_e N_0 \left(\frac{\sigma_{-1}}{k_e \cdot d_\sigma} \right)^s B(y_0, s) \left(1 - v \frac{\sigma_m}{\sigma_b} \right)^s, \quad (1)$$

где T_e – эффективный период изменения напряжений за время до образования трещины, N_0 – базовое число циклов, равное 10^7 [3], ν – коэффициент влияния σ_m на усталостную прочность тонкостенной конструкции, s – показатель живучести материала, d_σ – стандарт напряжений для стационарного нагружения,

$$B(y_0, s) = \left[\int_{y_0}^{\infty} y^{s+1} e^{-y^2/2} dy \right]^{-1}, \quad y_0 = \frac{\sigma_{-1}}{d_\sigma}, \quad y = \frac{\sigma}{d_\sigma}.$$

1. Учет нестационарности нагружения

В период образования усталостной трещины стандарт напряжений d_σ принимает различные случайные значения в силу нестационарности процесса эксплуатации рамы. Эта нестационарность учитывается с помощью закона Вейбулла:

$$f_1(d_\sigma) = \alpha c d_\sigma^{\alpha-1} e^{-c \cdot d_\sigma^\alpha}. \quad (2)$$

Преобразуем выражение (1) к виду:

$$A = \frac{T_*}{T_e N_0 B_0} = \varphi[D_\sigma, \sigma_{-1}, k_e, \Psi] = \left(\frac{\sigma_{-1}}{k_e \cdot d_\sigma} \right)^s \left(1 - \nu \frac{\sigma_m}{\sigma_b} \right)^s, \quad (3)$$

где B_0 – значение B при $y_0 = m_*/d_{II}$; c, α – характеристики плотности распределения вероятностей (2) случайной величины стандарта D_σ , причем $d_{II} = (1/\alpha c)^{1/\alpha}$ – среднеквадратическое отклонение D_σ (приведенный стандарт напряжений), $\Psi = \sigma_m/\sigma_b$ [4].

Полагая в выражении (3) случайной величиной только D_σ , имеем плотность распределения вероятностей для случайной величины A (относительной усталостной долговечности) известное соотношение [4]:

$$f_A(a) = \frac{\partial F(a)}{\partial a} = f_1(d_\sigma(a)) \left| \frac{\partial d_\sigma(a)}{\partial a} \right|, \quad (4)$$

где $F(a) = P(A \leq a)$.

Выразим d_σ в выражении (4) с помощью (3) через величину a :

$$d_\sigma(a) = \frac{\sigma_{-1}}{k_e} \left(1 - \nu \frac{\sigma_m}{\sigma_b} \right) a^{1/s}.$$

В результате получим плотность распределения вероятностей относительной долговечности A :

$$f_A(a) = \frac{\alpha}{s} c \beta a^{-(\alpha/s+1)} e^{-c\beta/a^{\alpha/s}}, \quad (5)$$

где

$$\beta = \left[\frac{\sigma_{-1}}{k_e} \left(1 - \nu \frac{\sigma_m}{\sigma_b} \right) \right]^\alpha.$$

Условная функция распределения $F_A(a | \sigma_{-1}, k_e, \Psi)$ случайной величины A определится интегралом ($\beta = \text{const}$):

$$F_A(a | \sigma_{-1}, k_e, \Psi) = \int_0^a f_A(y) dy = 1 - e^{-c\beta/a^{\alpha/s}}. \quad (6)$$

Надежность рамы $R(a) = P(A > a)$ или $R(t) = P(T_* > t)$, где $T_* = AT_e N_0 B_0$ согласно

выражению (3). На рис. 2 показаны зависимости надежности от времени t . Они определены на основе следующих данных [3, 5–7]: $\alpha = 2$, $k_e = 1,5$, $\psi = 0,18$, $s = 4$, $\nu = 0,6$, $\sigma_{-1} = 128$ МПа для трех значений приведенного стандарта напряжений d_{Π} (кривая 1 соответствует $d_{\Pi} = 5$ МПа, кривая 2 – $d_{\Pi} = 7$ МПа, кривая 3 – $d_{\Pi} = 10$ МПа). Согласно статистическим данным [3], d_{Π} находится в пределах 5÷10 МПа.

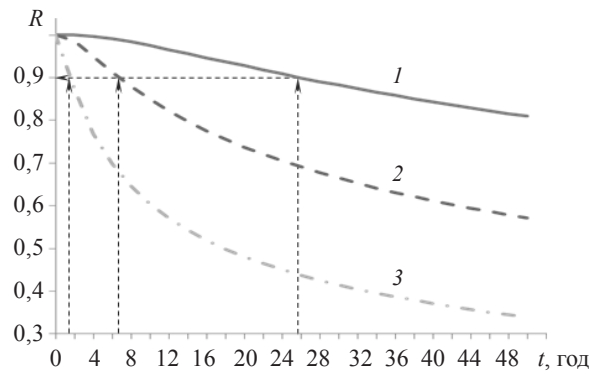


Рис. 2

2. Учет стохастичности параметров модели σ_{-1} , k_e , σ_m/σ_b

Случайность величин σ_{-1} , k_e , $\psi = \sigma_m/\sigma_b$ учитывается законами Гаусса с параметрами d_* , m_* , d_ψ , m_ψ , d_k , m_k для случайных величин Σ_{-1} , Ψ , K_e соответственно.

Интегрируя соотношение

$$\frac{d}{d\sigma_{-1}}[F(a, \sigma_{-1})] = F_A(a | \sigma_{-1})f_{-1}(\sigma_{-1})$$

по σ_{-1} , при распределении вероятностей усталостной прочности по Гауссу получим [4]:

$$F(a) = \int_0^{\infty} F_A(a, \sigma_{-1}) \frac{1}{\sqrt{2\pi}d_*} \exp\left[-\frac{(\sigma_{-1} - m_*)^2}{2d_*^2}\right] d\sigma_{-1}. \quad (7)$$

Аналогично можно учесть стохастичность эффективного коэффициента концентрации k_e и отношения среднего напряжения к пределу прочности ψ . При этом имеет место соотношение [6]: $k_e = 1 + q(k_t - 1)$, где k_t – теоретический коэффициент концентрации напряжений, q – коэффициент чувствительности материала к концентрации. Зависимость $k_e(k_t)$ верна для значений k_e в пределах от 1 до $k_e^{\text{пр}}$, где $k_e^{\text{пр}}$ – предельное значение величины, зависящее от материала, при $k_t = 4\div 7$. Для литого материала [6] $q = 1$. Область определения ψ находится пределах от 0 до 1 [8]. В результате имеем:

$$F(a) = \int_0^{\infty} \int_0^1 \int_0^1 F_A(a, \sigma_{-1}, k_e, \psi) f_{-1}(\sigma_{-1}) f_e(k_e) f_\psi(\psi) d\psi dk_e d\sigma_{-1}.$$

На рис. 3 показаны зависимости надежности боковой рамы грузового вагона от срока службы с учетом: 1 – случайного нагружения; 2 – случайного нагружения и стохастического характера усталостной прочности, 3 – случайного нагружения, стохастического характера усталостной прочности и эффективного коэффициента кон-

центрации напряжений, 4 – случайного нагружения, стохастического характера усталостной прочности, эффективного коэффициента концентрации напряжений и отношения среднего напряжения к пределу прочности. При этом характеристики законов распределения случайных величин Σ_{-1} , Ψ , K_e приняты в соответствии со статистическими данными [3, 5–7]: $d_{\Pi} = 5$ МПа, $d_* = 19$ МПа, $m_* = 128$ МПа, $d_{\Psi} = 0,018$, $m_{\Psi} = 0,018$, $d_k = 0,32$, $m_k = 1,5$.

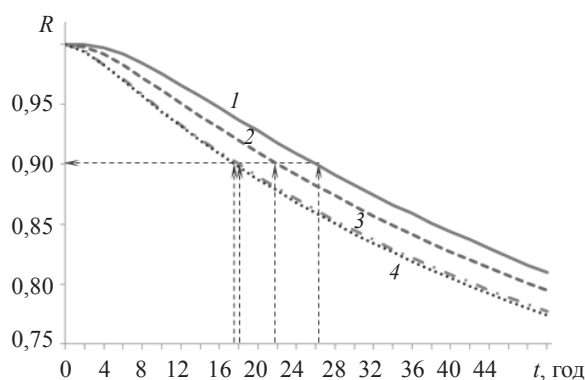


Рис. 3

3. Результаты

На основе модели многоциклового усталости в рамках критерия безопасного ресурса получены зависимости надежности $R(t)$ от эксплуатационных и конструктивно-технологических факторов, имеющих стохастический характер. Существенное влияние на ресурс оказывает уровень амплитудных напряжений и нестационарность нагружения (см. рис. 2). Концентраторы напряжений и уровень среднего напряжения уменьшают ресурс рамы в 2–3 раза. Стохастический характер усталостной прочности дополнительно снижает γ -процентный ресурс на 15%, коэффициента концентрации напряжений – на 18%, отношения среднего напряжения к пределу прочности – на 2% при $\gamma = R \cdot 100\% = 90\%$ (см. рис. 3).

До образования усталостной трещины γ -процентный ресурс для принятых выше характеристик законов распределения равен 17,6 лет при $\gamma = 90\%$. Для повышения ресурса необходимо снижать амплитуды напряжений, коэффициенты концентрации напряжений и уровень средних напряжений в раме или повышать усталостную прочность материала. Для оценки надежности на основе принципа безопасного повреждения можно воспользоваться объединенной моделью образования и роста усталостных трещин [9, 10].

Список литературы

1. Волков В.М. Прочность корабля. Н. Новгород: НГТУ, 1994. 257 с.
2. Волков В.М., Волков В.В., Волков И.В. Надежность и ресурс газопровода в области компрессорной станции и на его линейном участке // Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве: Докл. Всерос. научно-техн. конф., посвященной 75-летию ФМиАТ НГТУ им. Р.Е. Алексеева (17–20 ноября 2009 г.). Н. Новгород: НГТУ, 2009.
3. Расчет вагонов на прочность / С.В. Вершинский, Е.Н. Никольский, Л.Н. Никольский и др. М.: Машиностроение, 1971. 432 с.

4. Волков В.М. Надежность машин и тонкостенных конструкций: Учеб. пособие. Н. Новгород: НГТУ, 2011. 365 с.
5. Бунин Б.Б., Шашкова Е.В. Особенности применения программы MSC Fatigue для расчета долговечности несущих металлоконструкций железнодорожного подвижного состава // ВНИКТИ, 2006. 15 с.
6. ГОСТ Р 53337-2009: Специальный подвижной состав. Требования к прочности несущих конструкций и динамическим качествам.
7. Вагоны: Учеб. для вузов железнодорожного транспорта / Под ред. Л.А. Шадура. М.: Транспорт, 1980. 439 с.
8. Хейвуд Р.Б. Проектирование с учетом усталости / Под ред. И.Ф. Образцова. М.: Машиностроение, 1969. 504 с.
9. Волков В.М., Миронов А.А. Объединенная модель образования и роста усталостных трещин в концентраторах напряжений // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2005. Вып. 67. С. 20–25.
10. Миронов А.А., Волков В.М. Оценка надежности сварных соединений тонкостенных конструкций по результатам их неразрушающего контроля // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2009. Вып. 71. С. 45–51.

THE ASSESSMENT OF SAFE FATIGUE LIFE AND RELIABILITY OF RAILWAY CAR FRAMES

V.M. Volkov, I.V. Petrova

The problem of the reliability and safe fatigue life of a lateral frame of a freight car is analyzed at the stage of formation of a multi-cycle fatigue crack in stress concentration zones, taking into account the stochastic nature of loading, the fatigue strength of the material and the stress concentration coefficient.

Keywords: reliability, safe fatigue life, multi-cycle fatigue, stress concentration coefficient.