

## СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ

*Канд. техн. наук РАКИЦКИЙ А. А., инженеры МЕЛЕШ В. И., ИСПЕНЬКОВ С. А.*

*Белорусский национальный технический университет,  
Белорусский автомобильный завод*

Несущие конструкции карьерных самосвалов в условиях эксплуатации подвержены многократному воздействию случайных динамических нагрузок. Следствием этого являются накопление и развитие усталостных повреждений вплоть до разрушения. Очевидно, в расчетах на долговечность таких конструкций должны учитываться характеристики сопротивления усталости компонентов. Без достоверных параметров состояния материалов невозможно прогнозирование ресурса ни компьютерным моделированием с помощью метода конечных элементов, ни тензометрией в условиях эксплуатации или дорожных испытаний.

Рама карьерного самосвала особо большой грузоподъемности – сварная конструкция и, хотя сварные швы составляют не более 1 % от массы рамы, до 80 % всех отказов связано со сваркой [1]. Значит, при расчете долговечности рамы в первую очередь должны закладываться усталостные характеристики именно сварных соединений.

Анализ литературных источников показал, что какой-либо строгой связи между усталостными характеристиками металлов и сварных соединений не установлено, более того, они свидетельствуют о существовании собственных усталостных характеристик швов независимо от свариваемых металлов [2]. На основании многолетних результатов теоретических и экспериментальных исследований в СССР были разработаны и введены в действие методические указания по вероятностному расчету на усталость сварных конструкций РД 50-694-90 [3]. Однако информации о применимости данного нормативного документа для расчета ав-

томобильных деталей на долговечность не обнаружено. Экспериментально же определять характеристики сопротивления усталости для каждой новой конструкции – процесс длительный и дорогостоящий.

Авторы поставили задачу изучить зарубежный опыт в этой области, в частности европейские нормы и стандарты [4–6]:

- Проектирование металлоконструкций. Общие правила и правила строительства – Eurocode 3, 1993;
- Свод правил для проектирования усталости и оценки металлоконструкций – BS 7608, 1993 / AMD 8337, 1995;
- Проектирование усталости сварных соединений и узлов. Рекомендации совместной рабочей группы – IIW XIII–XV. XIII-1539-96 / XV-845-96, 1996;
- Проектирование металлоконструкций – N-004, 1998;
- Морские сооружения. Руководство по проектированию, строительству и сертификации – HSE, 1995;
- Нефтяная и газовая промышленности. Морские конструкции. Стационарные металлоконструкции – ISO/CD 13819-2, 1999;
- Краны: принципы анализа напряжений стальной конструкции – DIN 15018-1, 1984;
- Стандарт железнодорожного транспорта – DS 952.

Согласно перечисленным выше нормативным документам расчет долговечности следует проводить для каждого отдельного элемента конструкции, подвергающегося переменным напряжениям. Любая часть конструкции, любое сварное соединение или другая форма концен-

трации напряжений являются потенциальными источниками зарождения усталостных трещин и должны оцениваться индивидуально.

Усталостное повреждение сварных соединений, о котором говорится в стандартах, подразумевает тот факт, что в основном зарождение трещин происходит не в толще сварного металла, а в «носке» (toe) или «корне» (root) шва (рис. 1).

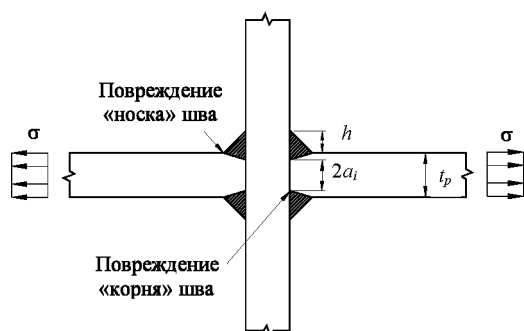


Рис. 1. Основные зоны усталостного повреждения сварного соединения

Для практического расчета долговечности в данных стандартах и рекомендациях сварные соединения подразделены на определенное количество групп конструктивных элементов, каждой из которых соответствует кривая усталости. Классификация сварных соединений построена в зависимости от ряда параметров:

- геометрической компоновки элемента;
- направления колебаний напряжений относительно элемента;
- метода изготовления и контроля качества элемента.

Кривые усталости для каждой группы элементов задаются соотношением между размахом напряжения и циклической долговечностью:

$$\begin{aligned} \lg N &= \lg a_0 - dS - m \lg \Delta\sigma = \\ &= \lg a - m \lg \Delta\sigma, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $N$  – долговечность в циклах;  $a_0$  – точка пересечения оси  $\lg N$  и средневероятной кривой усталости;  $d$  – множитель величины среднего квадратичного отклонения, на который смещается средневероятная кривая усталости;  $S$  – среднее квадратичное отклонение  $\lg N$ ;  $m$  – обратная величина наклона кривой в логарифмических координатах  $\lg \Delta\sigma - \lg N$ ;  $\Delta\sigma$  – размах

напряжения, МПа;  $a$  – точка пересечения оси  $\lg N$  и кривой усталости, используемой в целях расчетной оценки долговечности при соответствующей вероятности неразрушения соединения.

Нормированные усталостные кривые в стандартах приведены для базовых толщин металлических элементов: в Eurocode 3, N-004 и рекомендациях ПВ базовой является толщина 25 мм, в ISO 13819-2, BS 7608 и рекомендациях HSE – 16 мм. Для оценки ресурса деталей толщиной больше базовой с учетом масштабного коэффициента производится пересчет размахов напряжений по формуле

$$\Delta\sigma_t = \Delta\sigma \left( \frac{t}{t_0} \right)^q, \quad (2)$$

где  $\Delta\sigma_t$  – увеличенная величина размаха напряжения;  $\Delta\sigma$  – действительная величина размаха напряжения;  $t$  – толщина рассматриваемого элемента;  $t_0$  – базовая толщина элемента;  $q$  – экспонента коррекции толщины.

Экспонента коррекции толщины задается в диапазоне 0–0,3 либо в зависимости от применяемой кривой усталости.

Для анализа возможности применения приведенных выше нормативных документов при проектировании несущих конструкций карьерного самосвала использованы результаты исследований стандартных сварных образцов из применяемых на предприятии сталей. Плоские образцы для испытаний на растяжение-сжатие изготавливались из листового проката толщиной 16 мм марок сталей 10ХСНД и 12ХГН2МА. Соединение элементов образцов производилось на сварочном полуавтомате в среде углекислого газа сварочной проволокой св08Г2С. При сварке образцов их половины выставлялись в одной плоскости и заневоливались встык на горизонтальной поверхности стола. Стыковой сварной шов находился в рабочей зоне образца поперек направления приложения нагрузки. После сварки фрезеровалась шейка образца до размера 70 мм. Данные образцы соответствуют по классификации, приведенной в указанных стандартах, классу стыковых двусторонних поперечно нагруженных швов, выполненных ручной или автоматической сваркой.

Испытания проводились на стандартной машине SCHENCK PC 1.0D четырех серий сварных образцов: из сталей 10ХСНД и 12ХГН2МА с разделкой кромок фрезерованием или резкой газовой горелкой. Взятые из стандартов рекомендуемые кривые усталости для 95%-й вероятности неразрушения сведены в табл. 1.

Таблица 1

**Рекомендуемые кривые усталости для стыкового поперечного соединения, сваренного с двух сторон ручной либо автоматической сваркой**

Нормативный документ	Обозначение и уравнения кривой усталости
Eurocode 3	«90»: $\lg N = 12,151 - 3 \lg \Delta \sigma$ ; $\lg N = 15,786 - 5 \lg \Delta \sigma$
BS 7608	«D»: $\lg N = 12,182 - 3 \lg \Delta \sigma$ ; $\lg N = 15,636 - 5 \lg \Delta \sigma$
IIW Recommendations	«100»: $\lg N = 12,301 - 3 \lg \Delta \sigma$ ; $\lg N = 16,036 - 5 \lg \Delta \sigma$
NORSOK N-004	«D»: $\lg N = 11,764 - 3 \lg \Delta \sigma$ ; $\lg N = 15,606 - 5 \lg \Delta \sigma$
HSE GNs	«1.0P»: $\lg N = 12,182 - 3 \lg \Delta \sigma$ ; $\lg N = 15,637 - 5 \lg \Delta \sigma$
ISO/CD 13819-2	«D»: $\lg N = 12,182 - 3 \lg \Delta \sigma$ ; $\lg N = 15,637 - 5 \lg \Delta \sigma$

Описание экспериментальных данных проведено с использованием степенного уравнения [3]:

$$N = a_1 \sigma_a^{-m} \quad \text{или} \quad \lg N = a - m \lg \sigma_a. \quad (3)$$

Так как исследуемые образцы относятся к одному классу (по стандартной классификации), данные испытаний всех серий образцов объединялись и статистически обрабатывались по методике, изложенной в [7]. По результатам регрессионного анализа коэффициент наклона экспериментальной средневероятной кривой усталости для объединенной выборки  $m = 3,57$ . Кривая усталости для 95%-й вероятности неразрушения построена смещением линии регрессии на два средних квадратичных отклонения величины  $\lg N$  (рис. 2). Из анализа рис. 2 видно, что расчетные и эмпирические данные практически совпадают, следовательно, для заводской практики можно выбрать любой из шести европейских стандартов.

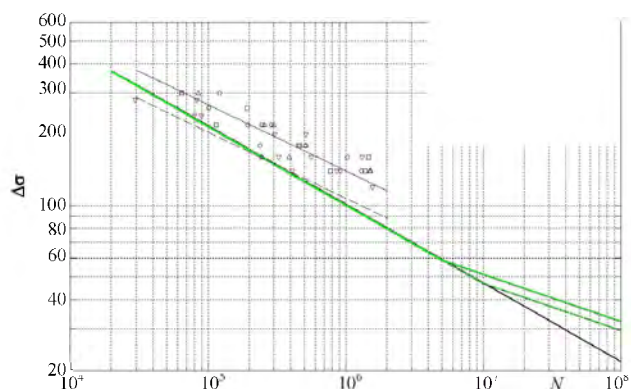


Рис. 2. Сравнение результатов испытаний с рекомендуемыми европейскими стандартами кривыми усталости: — «E» ISO; --- «E» Norsok; ···· «1.14P» HSE GNs; ···· «80» Eurocode3; — «80» IIW; - - - «E» BS7608; сварные образцы: ○ – 10ХСНД, Δ – 10ХСНД+12ХГН2МА, □ – 12ХГН2МА 1, ▽ – 2ХГН2МА 2; — — — экспериментальная кривая 50%-й вероятности неразрушения; - - - - экспериментальная кривая 95%-й вероятности неразрушения

Такая же процедура сравнения результатов проведенных испытаний с рекомендуемыми кривыми усталости выполнена по РД 50-964-90 (рис. 3).

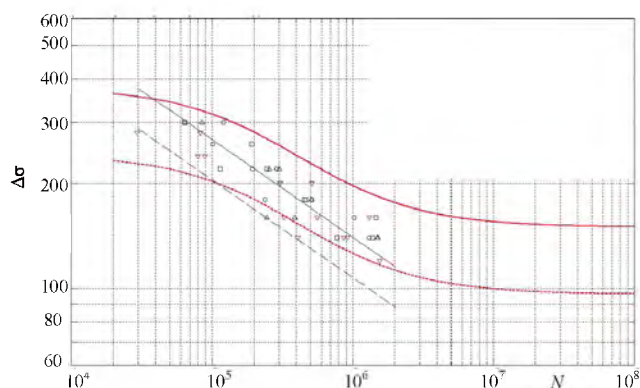


Рис. 3. Сравнение результатов испытаний с рекомендуемыми РД 50-964-90 кривыми усталости: — кривая усталости 50%-й вероятности для группы 36 (РД 50-694-90); - - - кривая усталости 95%-й вероятности неразрушения для группы 36 (РД 50-694-90); сварные образцы: ○ – 10ХСНД, Δ – 10ХСНД+12ХГН2МА, □ – 12ХГН2МА (1), ▽ – 2ХГН2МА (2); — — — линия регрессии экспериментальных данных (50%-й вероятности); - - - - линия 95%-й вероятности неразрушения по экспериментальным данным

Как видно из рис. 3, экспериментальные данные наилучшим образом аппроксимируются прямой линией в логарифмических координатах. Расчетная кривая усталости имеет более пологий наклон по сравнению с эмпирической

линией, расхождение в результатах оценки долговечности может быть существенным.

Следует отметить, что кривые усталости по РД 50-694-90 значительно отличаются от рекомендуемых по европейским стандартам из-за различного вида уравнений и подхода к учету рассеивания усталостных характеристик. Наибольшие расхождения наблюдаются после 2 млн циклов.

На основании проведенных исследований можно сделать следующее заключение. Европейские стандарты и рекомендации по проектированию сварных конструкций содержат универсальные нормы прочности, определяющие приемлемую по точности методику вычисления предельного состояния конструкции в зависимости от характера нагрузки и требуемого уровня безопасности. Рекомендуемые названными нормативными документами кривые усталости для одинаковых классов сварных соединений незначительно отличаются друг от друга в диапазоне наработки до 5 млн циклов.

#### ВЫВОД

Таким образом, общность усталостных характеристик сварных соединений для разных

сталей позволяет воспользоваться рекомендациями по расчету сварных конструкций, выработанными мировой практикой, и, следовательно, сократить расходы и время на отработку несущих конструкций карьерных самосвалов и других машин.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Карьерные самосвалы** особо большой грузоподъемности. Проектирование, технологии, маркетинг / П. Л. Мариев [и др.]. – Минск: Интегралполиграф, 2008. – 320 с.
2. **Поведение** стали при циклических нагрузках / пер. с нем. В. Н. Геминова; под ред. В. Даля. – М.: Металлургия, 1983. – 568 с.
3. **Методические указания.** Надежность в технике. Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций. РД 50-694-90. – М., 1991. – 83 с.
4. **Comparison of fatigue provisions in codes and standards / Offshore technology report 2001/083, HSE books.** – United Kingdom, 2002.
5. **Dannbauer, H.** Fatigue Analysis of Welding Seams and Spot Joints in Automotive Structures / H. Dannbauer, C. Gaier, K. Hofwimmer. – Austria, 2005.
6. **NORSOK Standard.** Design of Steel Structures. N-004. Rev. 1. – Norway, 1998.
7. **Гельман, В. Я.** Решение математических задач средствами EXCEL: практикум / В. Я. Гельман. – СПб.: Питер, 2003. – 240 с.

Поступила 26.06.2009

УДК 658.53:681.518.54

## НОРМЫ ВРЕМЕНИ НА ПРОЦЕСС ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ С ИСТЕКШИМ СРОКОМ СЛУЖБЫ

*ЧЕПИК Ю. Г.*

*Белорусский государственный университет транспорта (г. Гомель)*

По достижении назначенного ресурса (срока службы) эксплуатации или количества циклов нагружения, установленного в конструкторской и эксплуатационной документации, нормативных правовых актах (НПА), дальнейшая эксплуатация технического устройства, оборудования и сооружения без проведения работ по продлению назначенного ресурса (срока службы) безопасной эксплуатации не допускается.

Назначенный ресурс (срок службы) безопасной эксплуатации или критерии предельного состояния элементов вновь разрабатываемых технических устройств, оборудования и сооружений устанавливаются на основе расчетов и указываются в проектно-конструкторской документации.

Техническому диагностированию, прогнозированию технического состояния и установ-