

А. В. СУЛТАН, к.т.н., доцент, ДИИТ (Украина);
Б. Н. ТОВТ, ДИИТ (Украина)

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ ЭЛЕКТРОВОЗА ДС3 МЕТОДОМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

У статті розглянута проблема міцності на втому бічної балки рами візка електровоза ДС3, пов'язана з підвищеними експлуатаційними навантаженнями в демпферах першого ступеня підвішування.

В статье рассмотрена проблема усталостной прочности боковой балки рамы тележки электровоза ДС3, связанная с повышенными эксплуатационными нагрузками в демпферах первой ступени подвешивания.

The problem of fatigue durability of side beam of bogie frame of electric locomotive of DC3 related to the increased operating loadings in the dampers of first stage of suspension is considered in the article.

Развитие техники ставит новые задачи в области исследования работоспособности машин и их элементов. Повышение их надёжности и долговечности, являясь важнейшим фактором, определяющим рост конкурентоспособности изделий, связано с достоверным определением «опасных мест» конструкции. Наиболее эффективным широко используемым современным средством достижения рационально спроектированной с точки зрения прочности конструкции является использование метода конечных элементов (МКЭ).

Во время эксплуатации электровозов ДС3 неоднократно наблюдался срыв крепежа (головок болтов) кронштейна демпфера первой ступени подвешивания. Помимо этого на электровозе ДС3-003 наблюдалось образование усталостной трещины на боковой балке рамы тележки в районе кронштейном.

Таким образом, была поставлена задача оценки напряжённо-деформированного состояния (НДС) элемента рамы тележки в районе кронштейна, точнее его усталостной прочности. Стоит отметить, что при проведении прочностных испытаний этого электровоза в 2002 году эта проблема, само собой, ещё не стояла, предугадана она не была и соответственно результатов измерения усилий и напряжений в районе кронштейна при натурных испытаниях на данный момент нет. Актуальности этой проблеме добавляет и тот факт, что подобное явление наблюдается на рамах тележек электропоездов других типов.

Также ставилась научно-исследовательская задача оптимизации конструкции рамы в месте крепления кронштейна.

МКЭ позволяет значительно уменьшить затраты при разработке новых изделий, так как позволяет сократить объёмы или даже полностью отказаться от дорогостоящих испытаний. Кроме того, с помощью МКЭ можно в сравнительно короткие сроки оценить характеристики разных вариантов конструкций и выбрать оптимальную.

Для создания твердотельной модели использовалась САД-система SolidWorks 2007. Применялся метод геометрического моделирования. Суть метода состоит в описании геометрических границ модели, назначении средств контроля размера и требуемой формы элементов. Была использована именно объёмная трёхмерная (твердотельная) расчётная модель по той причине, что сама реальная конструкция суть массивная структура, существующая в трёхмерном пространстве. В двухмерном виде её отобразить было невозможно. На рис. 1 представлена модель элемента боковой балки рамы тележки с накладкой, к которой непосредственно крепится кронштейн демпфера первой ступени подвешивания электровоза ДС3. На рис. 2 приведен вид спереди того же элемента рамы тележки.

Как видно, из приведенных рисунков также моделировались сварные швы с целью максимально точной передачи реальной работы конструкции. Модель создана в реальных размерах по соответствующей конструкторской документации. Заданный материал модели – сталь 09Г2С.

Моделирование статической пространственной задачи теории упругости производилось в КЭ-пакете COSMOSWorks 2006. В КЭ-сетке (рис. 3) применялись только линейные

пространственные тетраэдральные элементы. Эти элементы имеют четыре узла в вершинах. Подобного рода конфигурация обеспечивает линейное изменение перемещений в пределах объёма элемента. Таким образом, деформации, являющиеся линейной комбинацией производ-

ных перемещений по координатам, являются постоянными в элементе. Напряжения также суть константы. Степени свободы в узлах – перемещения u , v , w в направлении осей исходной системы координат.

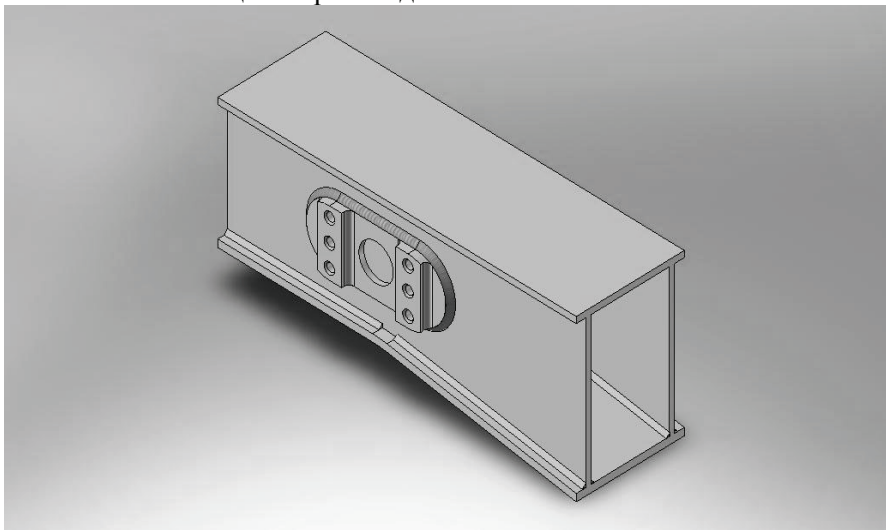


Рис. 1. Модель элемента рамы тележки (изометрическое изображение)

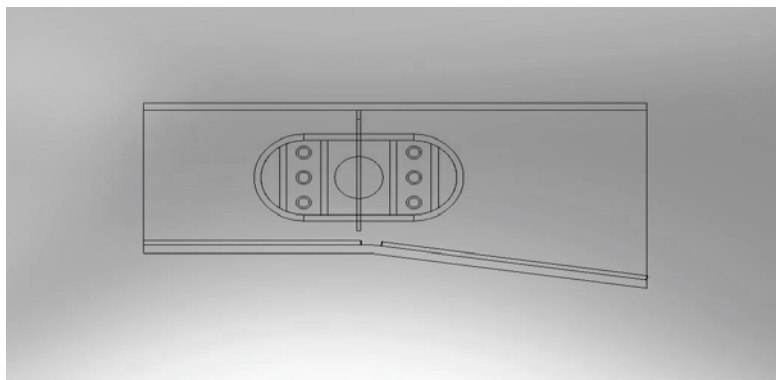


Рис. 2. Модель элемента рамы тележки (вид спереди)

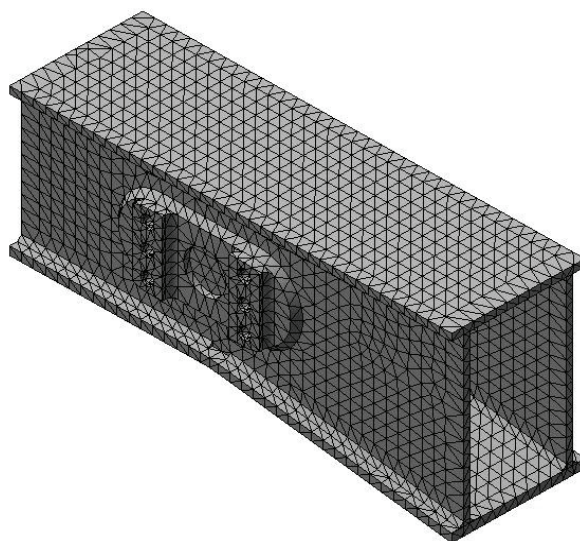


Рис. 3. КЭ-сетка (изометрия)

При расчете использовался критерий максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу (von Mises). Этот критерий также называется критерием формоизменения. Он определяет момент исчерпания несущей способности сравнением величины эквивалентного напряжения с пределом текучести материала. Эквивалентное напряжение $\sigma_{von\ Mises}$ в некоторой точке рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{von\ Mises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}},$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - главные напряжения. При этом эквивалентное напряжение не зависит от ориентации площадки, на которой оно действует, то есть является инвариантным.

Остановимся на важнейшем вопросе, вопросе граничных условий и нагружения. Так как конструкция рамы тележки цельносварная, по крайним поперечным сечениям рассматриваемого элемента производилось защемление (полное ограничение, как перемещений, так и углов поворота во всех трёх направлениях). Как показали результаты замеров усилий, возникающих в демпферах первой ступени подвешивания электровоза ДСЗ, максимальное значение составило 20 кН. Учитывая геометрические размеры кронштейна и величину усилия в демпфере, в местах креплё кронштейна к накладке (четырьмя болтами), прикладывались четыре силы по 5 кН в отрицательном направлении вертикальной оси Z, а также две силы по 25 кН в положительном направлении оси Y к нижним отверстиям и столько же к верхним,

но в отрицательном направлении оси Y. Граничные условия и приложенные нагрузки показаны на рис. 4.

Для решения задачи применялся итерационный компактный алгоритм решения системы уравнений, описывающих задачу FFEPlus.

Теперь можем перейти к рассмотрению полученных диаграмм напряжений, перемещений, деформаций. Естественно, наиболее содержательной для нас будет диаграмма напряжений.

Как видно из рис. 5, максимальные напряжения 91 МПа возникают в месте приварки крепежной накладки кронштейна к боковой балке, как раз неподалёку от крепежных болтов. Эти результаты хорошо согласуются с тем, что происходит в реальной конструкции, усталостные трещины возникают именно в районе тех мест, которые даёт нам прочностной расчет.

Главным результатом этой работы является изложенная ниже модернизация рамы тележки в исследуемом районе рамы тележки.

Устранение проблемы усталостной прочности рам тележек электровоза ДСЗ предлагается произвести путем добавления ещё одного ребра жёсткости и изменением их месторасположения, как показано на рис. 6.

Диаграмма напряжений в модернизированной раме тележки приведена на рис. 7. Расчет проводился при тех же граничных условиях и схеме нагружения, что и для исходного варианта конструкции. Из рисунка видно, что максимальные напряжения для варианта с модернизацией составили 50 МПа.

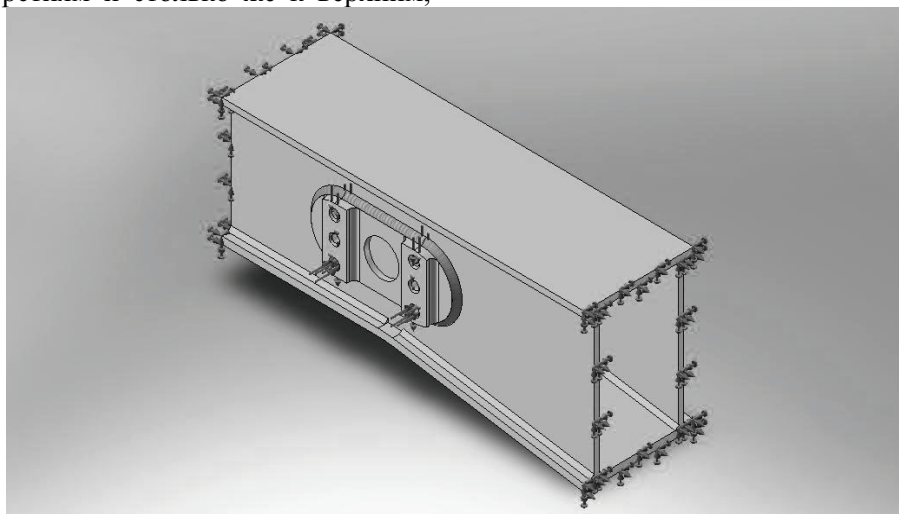


Рис. 4. Граничные условия и приложенные к модели нагрузки

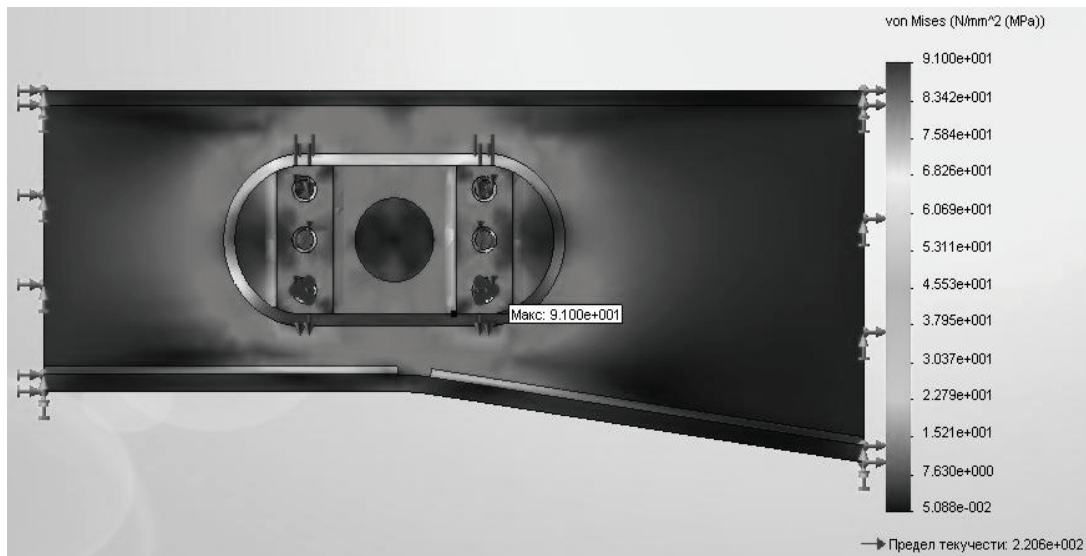


Рис. 5. Диаграмма напряжений

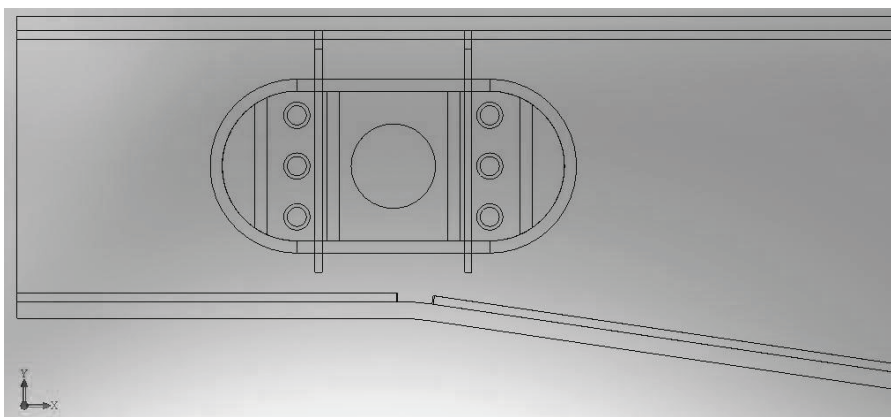


Рис. 6. Элемент рамы с предлагаемой модернизацией

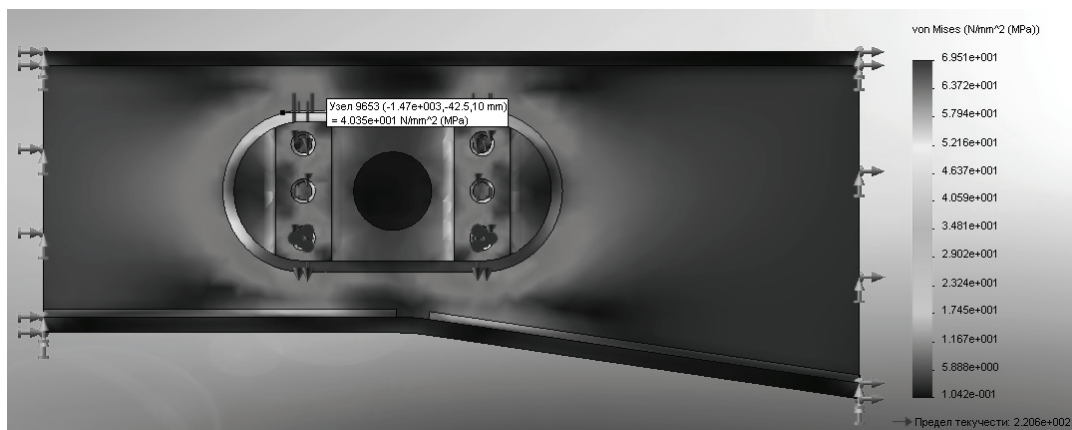


Рис. 7. Диаграмма напряжений

Согласно Нормам для расчёта и оценки несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог [3, стр.38] оценка сопротивления усталости несущих элементов может производиться по следующей методике (выбор произведён в зависимости от располагаемых данных).

Поскольку мы не располагаем гистограммой распределения амплитудных значений напряжений, характеризующей нагруженность элемента за назначенный срок службы, и кривой усталости материала у нас нет, то оценку сопротивления усталости проводим по следующей формуле:

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma} \cdot \sigma_V + \psi \cdot \sigma_m} \geq [n],$$

где σ_{-1} – среднее значение предела выносливости стандартного образца при симметричном цикле нагружения (для стали 09Г2С принималось равным 210 МПа); K_σ – коэффициент, характеризующий понижение предела выносливости конструкции по отношению к пределу выносливости стандартного образца; σ_V – амплитуда напряжений цикла (для исходной конструкции принималась равной 91 МПа, для модернизированной – 40 МПа); σ_m – среднее напряжение цикла; ψ – коэффициент, характеризующий влияние асимметрии цикла; $[n]$ – допустимый коэффициент запаса сопротивления усталости, для несущих элементов конструкции тягового подвижного состава, согласно [3], равен 2.

Значение коэффициента понижения предела выносливости определяем по формуле:

$$K_\sigma = \frac{K_1 \cdot K_2}{\gamma \cdot m} \cdot \beta_K,$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий влияние неоднородности материала детали (для проката $K_1=1.1$); K_2 – коэффициент, учитывающий влияние внутренних напряжений в детали ($K_2=1.0$); m – коэффициент, учитывающий состояние поверхности детали (для поверхности с окалиной $m=0.8$); γ – коэффициент, учитывающий влияние размерного фактора (для вертикального ребра с накладкой шириной 120 мм принимался равным

0.68); β_K – эффективный коэффициент концентрации напряжений в узлах сложного очертания, концентрация напряжений в которых определяется только их геометрией (так как конфигурация рассматриваемого узла довольно точно смоделировано расчетной схемой, принимался равным 1.0).

Согласно расчётам, произведенным по изложенной выше методике оценки сопротивления усталости, предложенная модернизация позволяет снизить уровень напряжений в раме тележки в районе кронштейна демпфера первой ступени подвешивания тележки более чем в два раза, а коэффициент запаса усталостной прочности повысить с 1.14 до 2.6, что превышает допустимое значение 2.0.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алямовский, А. А. SolidWorks / COSMOSWorks 2006-2007. Инженерный анализ методом конечных элементов [Текст] / А. А. Алямовский. – М.: ДМК, 2007. – 784 с.
2. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике и аппроксимация [Текст] / О. Зенкевич. – пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 536 с.
3. НОРМЫ для расчёта и оценки несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм [Текст]. – М.: ВНИИЖТ, 1998. – 145 с.

Поступила в редколлегию 29.07.2009