

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

О.А. Русанов, В.В. Кочергин, А.А. Буханцев, В.В. Брексон

Представлена расчетная методика, позволяющая на этапе проектирования и доводки осуществлять рациональный выбор конструкции сварных соединений рам тележек локомотивов и вагонов моторвагонного подвижного состава. Первоначально методика предполагает исследование с помощью метода конечных элементов общего напряженного состояния рамы. С помощью метода граничных элементов детально изучены особенности трехмерного напряженного состояния в отдельном сварном соединении с учетом факторов геометрической концентрации напряжений. Рациональная конструкция соединения выбрана по результатам сравнительного анализа, при котором варьируются такие параметры как форма, размеры, расположение сварных швов, виды разделки под сварку, геометрия соединяемых деталей.

Ключевые слова: сварное соединение, рама, железнодорожный подвижной состав, метод конечных элементов, метод граничных элементов

CALCULATING ANALYSIS OF WELDED JOINTS OF BEARING STRUCTURES OF RAILWAY ROLLING STOCK

Rusanov O.A., Kochergin V.V., Bukhantsev A.A., Brekson V.V.

The paper presents a calculation method that allows to make rational choice of welded joints for locomotive bogie frames and railcars of railway rolling stock at the stages of design and finishing exercise. Initially, the method involves a study using the finite element method of the total stress state of the frame. Next, using the boundary element method the features of the three-dimensional stress state in a separate weld are studied in detail taking into account the geometric stress concentration factors. Rational design of compounds is selected on the basis of comparative analysis, in which such parameters as shape, size, location of welds, types of cutting weld, geometry of parts to be joined vary.

Keywords: welded joint, frame, railway rolling stock, finite element method, boundary element method

Введение

Рамы тележек локомотивов и вагонов моторвагонного подвижного состава содержат значительное количество сварных соединений и нагружены в эксплуатации совокупностью сил, среди которых и силы, переменные во времени. При обеспечении прочности таких несущих конструкций в первую очередь требуется учитывать возможность возникновения в них усталостных повреждений. Государственными стандартами ГОСТ Р 55495-2013,

ГОСТ Р 55496-2013, ГОСТ Р 55513-2013, ГОСТ Р 55514-2013 установлены требования к сопротивлению усталости рам тележек и промежуточных рам (балок, брусев) второй ступени рессорного подвешивания – отсутствие усталостных трещин после 10 млн циклов нагружения объекта испытаний на вибрационном стенде. Указанные сварные соединения могут содержать различного рода технологические дефекты сварки (трещины, подрезы, раковины, поры, несплавления, непровары), которые

являются источниками концентрации напряжений и потенциальными зонами зарождения и развития усталостных трещин. При конструировании сварного узла важным является выбор формы деталей, схемы расположения и размеров сварных швов, вида разделки под сварку для соединяемых деталей с тем, чтобы эффект концентрации напряжений в окрестности потенциальных дефектов был по возможности скомпенсирован снижением общего уровня максимальных напряжений в сварных узлах. Конструкторские решения, принятые на данном этапе, во многом определяют прочность будущего соединения.

В настоящее время требования прочности рам тележек локомотивов и вагонов электропоездов подтверждаются при проведении ходовых испытаний и испытаний на усталость [1, 2]. Расчетные методы анализа используются как вспомогательные инструменты конструктора [3]. При этом их значительные потенциальные возможности зачастую не раскрываются в полной мере из-за недостаточной методической проработки.

Целью данной работы являлось создание расчетной методики анализа напряженного состояния сварного соединения, применение которой позволит осуществлять рациональный выбор его структуры при проектировании и доводке конструкции.

Методика анализа напряженного состояния и выбора рациональной конструкции сварного соединения

Методика включает двухэтапное численное моделирование объекта исследования с помощью метода конечных элементов (МКЭ) и метода граничных элементов (МГЭ). В основу разработки положены рекомендации и правила проектирования мобильных машин [4], а также программное обеспечение МКЭ, МГЭ [5], которое применялось для решения ряда прикладных задач исследования концентрации напряжений и обеспечения прочности сварных конструкций [6–8].

Методика предназначена для сравнительного расчетного анализа вариантов сварных узлов и поиска среди них такого, в котором реализуются наименьшие уровни максимальных напряжений в зонах их концентрации при действии на раму одинаковых для всех вариантов нагрузок, соответствующих наиболее тяжелым режимам нагружения. Напряжения по данной

методике определяются в рамках статического анализа. Особое внимание уделяется зонам концентрации напряжений в сварных швах, которые моделируются достаточно подробно. Величины приложенных сил соответствуют амплитудным значениям циклической нагрузки и неблагоприятному сочетанию отдельных силовых факторов. Если за счет внесения изменений в конструкцию будет достигнуто снижение статических напряжений в сварном узле, то в эксплуатации амплитуды циклических напряжений для такой конструкции также будут снижены, что положительным образом скажется на способности рамы в целом выдерживать нагрузки без разрушения (улучшит ее прочностные характеристики).

При проведении сравнительного анализа варьируются параметры сварных швов (их форма, размеры, расположение, виды разделки под сварку). Может изменяться и геометрия соединяемых деталей. В конструкцию могут быть введены новые дополнительные детали. Допускается учет отдельных выбранных дефектов сварки (источников концентрации напряжений), однако в этом случае их параметры для всех вариантов сварного соединения остаются неизменными, что обеспечивает возможность при сопоставлении вариантов оценить влияние только фактора конструктивного исполнения.

В рамках данной методики на первом этапе с помощью МКЭ определяется общее напряженно-деформированное состояние (НДС) объекта исследования. Режимы нагружения для данного расчета целесообразно установить соответствующими условиям проведения стендовых вибрационных испытаний, поскольку такие испытания согласно нормативным требованиям являются обязательными для подтверждения усталостной прочности рам.

При доводке конструкции, когда результаты испытаний уже известны, выполняется сопоставление расчетных и экспериментальных напряжений, проверяется и подтверждается адекватность разработанной модели.

При выполнении общего анализа целиком всей несущей конструкции довольно сложно расчетным путем оценить с достаточной точностью напряженное состояние в сварных швах с учетом реальной геометрии шва и потенциальных дефектов сварки. Габаритные размеры рам и размеры зон концентрации напряжений в сварных соединениях отличаются друг от друга настолько значительно, что

это сильно ограничивает (делает практически неосуществимой) возможность отражения данных концентраторов в составе общей модели рамы. Поэтому в разработанную методику введен расчетный этап, на котором для выделенного фрагмента рамы, содержащего исследуемое сварное соединение, с помощью МГЭ и с использованием (в качестве граничных условий) результатов общего анализа НДС рамы более подробно исследуется объемное напряженное состояние в зоне сварных швов с учетом факторов геометрической концентрации напряжений в окрестности специально смоделированных концентраторов.

Рассматриваются различные варианты конструкции сварного соединения и выполняется их сравнительный анализ, в котором (при идентичных условиях нагружения, закрепления, способах моделирования фрагмента рамы и определенных концентраторов напряжений в сварных швах) оценивается влияние только одного фактора – конструктивного исполнения соединения. По результатам сравнения уровней напряжений формулируются рекомендации по выбору наилучшего варианта реализации сварного соединения.

Расчеты второго этапа базируются на следующих допущениях:

1. Гранично-элементные модели имитируют отдельный фрагмент рамы, содержащий рассматриваемое сварное соединение. В моделях отражена форма соединяемых деталей, геометрия сварных швов, учтены не связанные сваркой поверхности соприкосновения деталей, смоделированы зоны геометрической концентрации напряжений на внешней поверхности соединения (у границ швов) и внутренних поверхностях соединения (в корне швов).

2. Условия нагружения и закрепления отдельно моделируемого фрагмента рамы с подробным отражением сварного соединения максимально приближены к условиям нагружения данного фрагмента в составе рамы и выбраны по результатам анализа НДС рамы с использованием ее полной модели, выполненного на этапе общего расчетного анализа.

3. При расчетах в зонах сварных швов не учитываются: остаточные термические напряжения, напряжения после поверхностной обработки, неоднородность свойств металла в шве. Сварные швы не содержат несплоев, несплавлений. Форма швов соответствует конструкторской документации. Учтен фактор геометрической концентрации напряжений.

4. Расчеты НДС выполнены в упруго линейной постановке (в предположении линейной зависимости между компонентами напряжений и деформаций, без учета возможности возникновения пластических деформаций и перераспределения вследствие этого напряжений). Полученные в результате расчетов значения напряжений могут превосходить предел текучести материала, и в этом случае они имеют условный характер. Значения напряжений служат только для сопоставления вариантов конструкции друг с другом в качестве критерия.

Описание объекта исследования

Изложенная методика проиллюстрирована на примере разработки мер по совершенствованию конструкции соединения кронштейнов крепления буксовых поводков на раме тележки электровоза. Рама представляет несущую конструкцию (рис. 1), имеющую в своем составе две продольные балки – боковины 1, соединенные между собой средней балкой 2 и концевой балкой 3. Балки выполнены из стальных листов (сталь 09Г2С), имеют прямоугольное поперечное сечение замкнутого профиля. На боковинах, поперечной и концевой балках с помощью сварных соединений установлены кронштейны крепления узлов системы рессорного подвешивания электровоза, тормозной системы, тяговых двигателей и другого оборудования. Рама воспринимает нагрузки от веса размещенных на ней агрегатов, веса кузова, а также нагрузки, возникающие при эксплуатации. На кронштейн буксовых поводков 5 со стороны колесных пар (через поводки и клиновые соединения) действуют продольные силы, имеющие значительную динамическую составляющую. Буксовые поводки (по оси которых передаются указанные силы) представляют собой продольные тяги, имеющие связь с кронштейном 5 с помощью клинового соединения, для которого на щеках 6 кронштейна предусмотрены специальные клиновые пазы. Результирующая продольная сила со стороны поводка на кронштейн распределена по поверхности 14 такого паза. Щеки 6 кронштейна выполнены из стали 10Г2С1, остальные его детали – из стали 09Г2С. Корень лобового сварного шва 13 данного кронштейна, а также передняя кромка 8 данного шва потенциально являются зонами концентрации напряжений, в которых могут возникать и развиваться усталостные трещины.

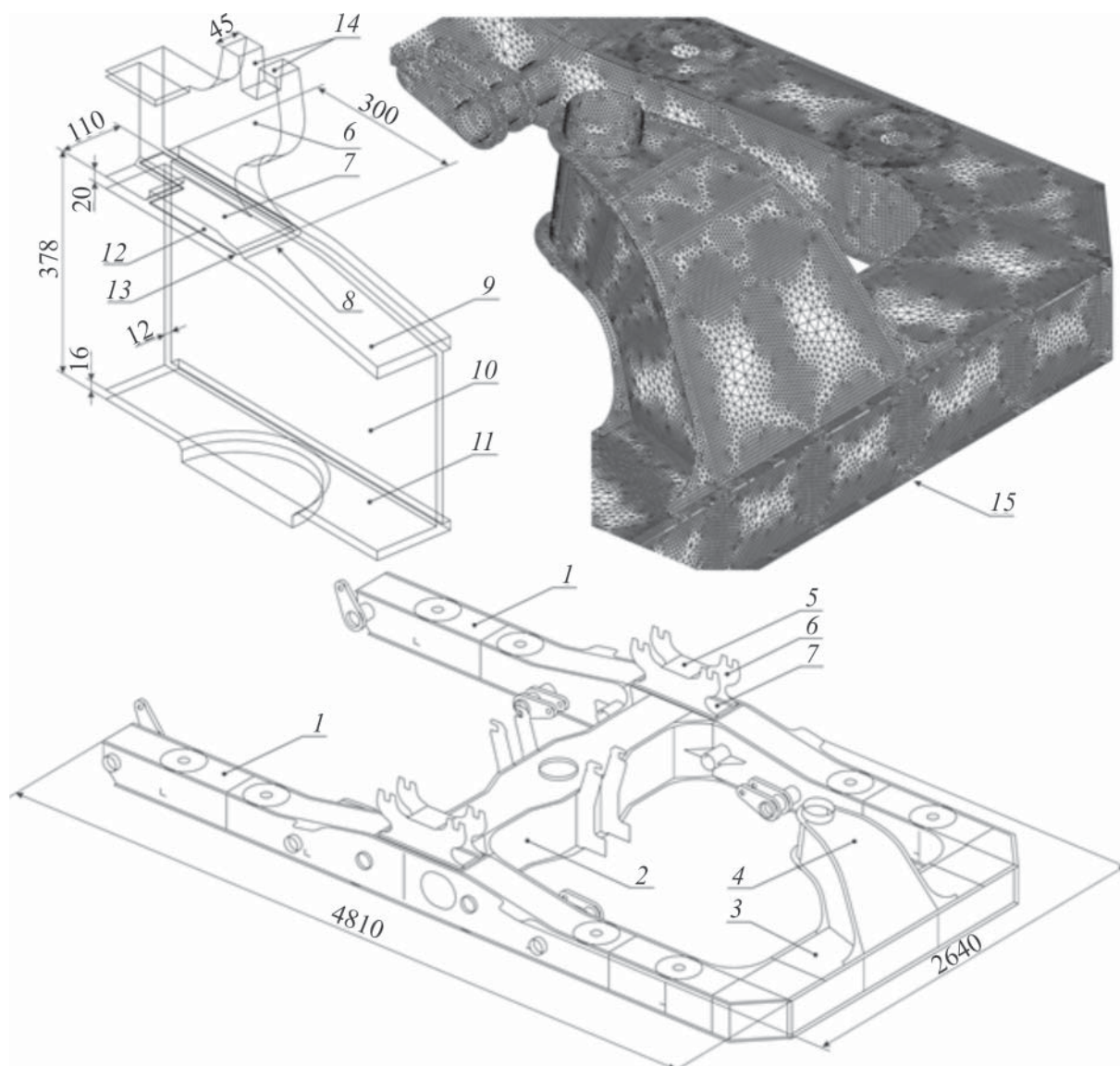


Рис. 1. Рама тележки электровоза:

1 – боковины рамы; 2 – средняя балка; 3 – концевая балка; 4 – кронштейн продольной тяги; 5 – кронштейн буксовых поводков (под клиновое соединение); 6 – щека кронштейна буксовых поводков; 7 – лист между щеками (для укрепления кронштейна); 8 – передняя кромка (граница) лобового сварного шва кронштейна; 9 – нижний лист боковины рамы; 10 – боковой лист; 11 – верхний лист боковины рамы; 12 – опорные поверхности деталей кронштейна и нижнего листа боковины рамы, не связанные сваркой; 13 – корень лобового сварного шва кронштейна; 14 – поверхность паза клинового соединения; 15 – часть конечно-элементной сетки модели рамы

Исследование по МКЭ общего напряженного состояния рамы

С помощью МКЭ определено общее НДС рамы, и для подтверждения адекватности разработанной модели расчетные напряжения сопоставлены с результатами испытаний. Расчетные режимы нагружения рамы установлены по опыту ОАО «ВНИИЖТ» в соответствии с принятыми методиками проведения испытаний подобных конструкций.

Расчетная схема рамы, отражающая условия ее испытаний и иллюстрирующая учтенные при моделировании нагрузки и схему закрепления, представлена на рис. 2. Использованы следующие обозначения: P – вертикальная сила на пружину буксового узла; Q – рамная сила (горизонтальная поперечная сила на оси колесной пары), приходящаяся на буксу; D – вертикальные силы со стороны тягового привода; T – продольная тяга.

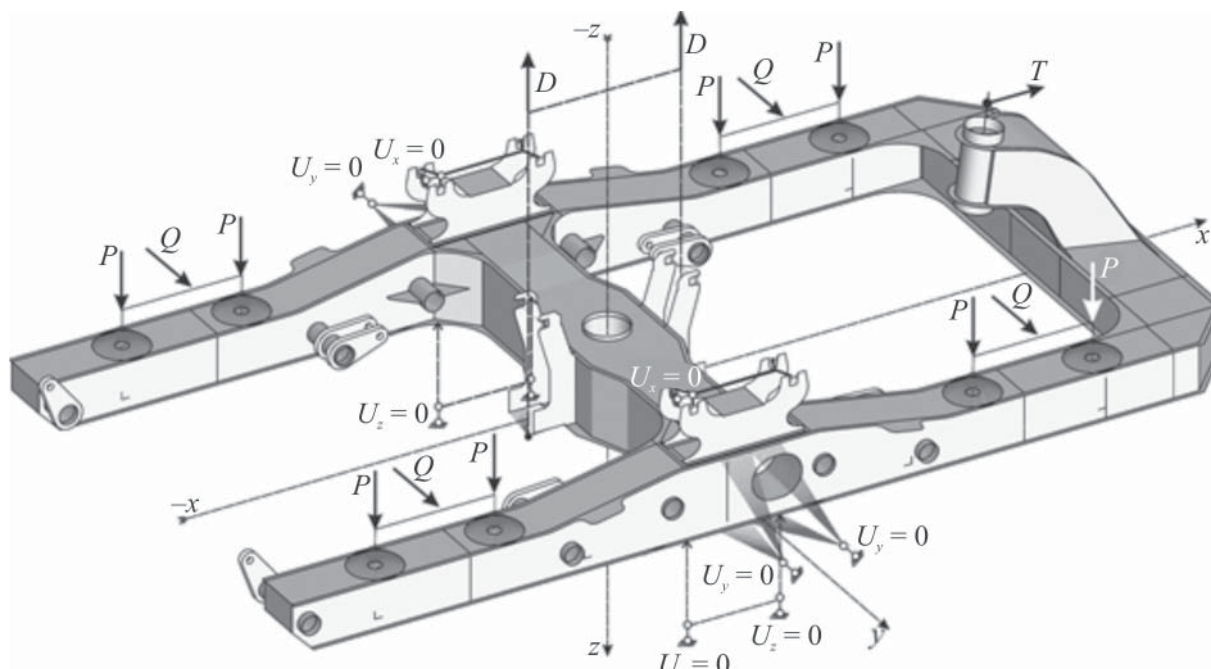


Рис. 2. Расчетная схема рамы

В расчете используется следующая система координат: начало координат расположено на оси шкворневого узла в плоскости верхних листов балок рамы; ось x – продольная ось рамы; ось y – поперечная (боковая) ось рамы; ось z – вертикальная ось рамы (совпадающая с осью шкворневого узла); U_x , U_y , U_z – перемещения в направлении координатных осей x , y , z соответственно.

В рамках представленной расчетной схемы продольные силы со стороны колесных пар на кронштейны буксовых поводков отражены как реакции по закреплению рамы в направлении оси x через клиновые соединения данных кронштейнов.

Значения действующих на раму сил в отдельных рассмотренных расчетных режимах

(в соответствии с условиями проведения испытаний) приведены в табл. 1.

Исследование общего НДС рамы выполнено с помощью модели МКЭ, которая для отражения тонкостенных элементов конструкции использует треугольные элементы тонкой оболочки, основанные на гипотезах Кирхгоффа. На рисунке 1 (позиция 15) показана часть оболочечной модели, позволяющая составить представление об использованной сетке конечных элементов. Дополнительно (к элементам оболочки) в модель введены вспомогательные балочные элементы, предназначенные для равномерного распределения по узлам действующих на раму сил и обеспечивающие заданные условия закрепления. В совокупности модель МКЭ содержит 1603692 степени свободы. Конечные

Таблица 1

Значения сил, действующих на раму в расчетных режимах нарушения

№ режима нагружения	Вертикальная сила на пружину буксового узла, P , кН	Рамная сила на буксу, Q , кН	Вертикальные силы от тягового привода, D , кН	Продольная тяга, T , кН
1	62,15	–	–	–
2	62,15	30	–	–
3	62,15	30	48,9	–
4	62,15	30	48,9	135

элементы оболочки совмещены со срединной поверхностью моделируемых тонкостенных деталей рамы. При генерации сетки размеры конечных элементов выбираются алгоритмом разбивки автоматически по заданному параметру длины стороны элемента 8 мм на границах контуров, которые в совокупности образуют геометрическую модель рамы. Внутри каждого контура размеры элементов могут быть значительно больше размеров на границе контура (управляемая особенность алгоритма).

Расчетные значения напряжений сопоставлены с экспериментальными. В испытаниях для определения напряжений в раме установлено 80 тензорезисторов (датчиков). Регистрация показаний датчиков осуществлялась с помощью тензоусилителя типа MGC+. Сравнение с расчетом выполнено по 22 из них (схема размещения датчиков показана на рис. 3).

Выделены две группы указанных датчиков. К первой отнесены датчики 1–12 (с базой 20 мм), расположенные на удалении от зон значительной концентрации напряжений и фиксирующие в основном общие деформации конструкции.

Ко второй группе отнесены датчики (с базой 10 мм), расположенные в зоне значительной концентрации напряжений, где напряжения резко изменяются в пределах малых

по протяженности зон. Датчики 13–20 из этой группы находятся в зоне сварных швов крепления кронштейнов буксовых поводков, датчики 21–22 расположены в зонах изменения формы листов кронштейна продольной тяги. Датчики установлены в зонах преимущественно одноосного напряженного состояния – по краю листовых деталей балок и над стенками. В подобных случаях и с учетом особенностей нагружения рамы применение отдельных датчиков вместо тензометрических розеток является обоснованным. Определенные при этом значения напряжений с достаточной для практических целей точностью соответствуют значениям интенсивности напряжений.

Результаты сравнения расчетных и экспериментальных напряжений приведены в табл. 2. Экспериментальные и расчетные значения напряжений в основном коррелируют между собой. Максимумы напряжений по большинству датчиков, относящихся к первой группе, отличаются не более чем на 20%.

Расчетные и экспериментальные результаты по датчикам второй группы согласуются в меньшей степени. Это объясняется существенной неоднородностью НДС в зонах измерений, осреднением по базе датчика замеренных значений деформаций.

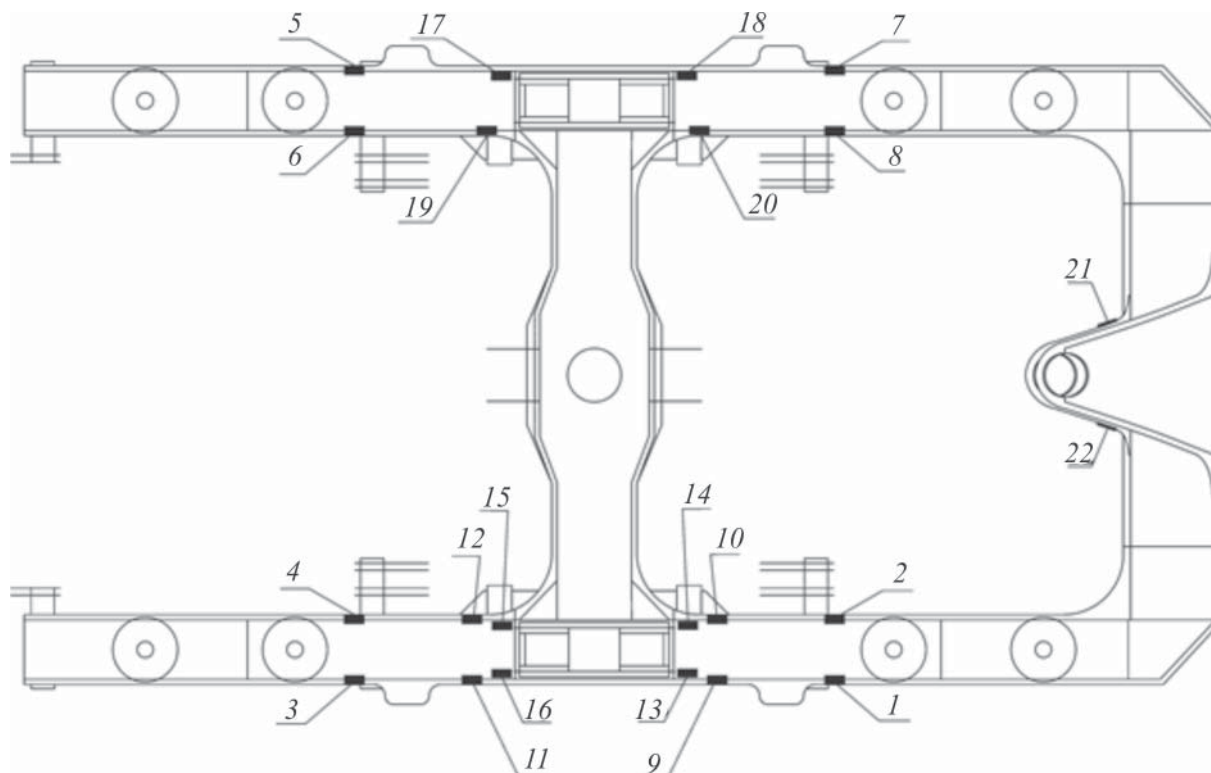


Рис. 3. Схема размещения датчиков на раме тележки

Таблица 2

Сравнение экспериментальных и расчетных значений напряжений (МПа) в местах установки датчиков на раме

	Режим нагружения							
	1		2		3		4	
	Испытания	Расчет	Испытания	Расчет	Испытания	Расчет	Испытания	Расчет
1	43,0	50,4	38,7	47,1	39,3	47,1	87,5	94,4
2	31,9	49,0	38,2	53,8	39,0	53,8	87,6	105,5
3	44,0	50,0	28,0	34,4	28,5	34,8	37,6	34,9
4	39,8	49,6	57,2	65,1	56,7	64,7	64,4	64,6
5	39,6	50,0	60,8	65,7	62,1	66,1	73,0	66,2
6	41,1	49,6	21,3	34,3	21,0	34,0	26,5	33,9
7	48,0	50,4	51,3	53,7	51,6	53,8	99,8	101,1
8	38,3	49,0	36,0	44,3	36,3	44,4	89,3	96,1
9	45,5	59,4	33,1	44,6	33,3	42,9	56,7	69,6
10	52,2	64,5	66,9	81,1	67,7	81,9	93,3	109,7
11	50,0	56,9	31,3	34,1	31,6	33,5	35,9	34,0
12	53,6	62,9	73,2	85,0	72,4	85,2	74,7	84,9
13	41,9	62,5	27,7	42,0	29,0	40,5	51,2	66,4
14	48,2	62,0	60,2	80,9	62,9	82,8	83,1	105,2
15	55,9	59,4	72,3	84,8	73,9	86,5	76,4	87,5
16	54,3	57,7	34,9	32,8	36,6	33,2	42,6	35,8
17	46,3	57,7	69,8	83,6	72,7	84,2	81,0	86,4
18	50,6	62,5	73,3	83,3	75,1	81,7	99,8	107,8
19	57,8	63,6	23,1	39,0	23,1	39,4	24,3	39,5
20	58,7	69,9	31,2	48,3	30,9	49,3	52,5	76,1
21	–	–	–	–	–	–	30,9	39,6
22	–	–	–	–	–	–	34,4	39,2

Отмечено, что в большинстве точек, где проведено сопоставление напряжений, расчетные значения напряжений несколько превышают экспериментальные, что может объясняться как осреднением замеренных деформаций по базе датчика, так и определенной идеализацией расчетной схемы, которая не в полной мере соответствует реальным условиям проведения эксперимента. Поскольку предложенная методика предусматривает проведение сравнительного расчетного анализа, данную систематическую погрешность возможно учесть и рассматривать как допустимую.

Из сопоставления результатов испытаний и расчета следует, что разработанная конечно-элементная модель рамы тележки может быть признана адекватной, а полученные с ее помощью расчетные данные возможно использовать на следующем этапе для подробного трехмерного

моделирования напряженно-деформированного состояния сварного соединения кронштейна буксовых поводков.

Исследование по МГЭ сварного соединения кронштейна

В соответствии с разработанной методикой детальное исследование трехмерного распределения напряжений в зоне сварного соединения кронштейна буксовых поводков (см. рис. 1, поз. 5) с боковиной рамы выполнено с использованием МГЭ.

Рассмотрены различные варианты конструктивного исполнения этого соединения в сравнении с исходным, соответствующим конструкторской документации. Целью анализа являлся поиск варианта с наиболее низкими значениями напряжений в корне лобового сварного шва и на его передней границе (рис. 4). Радиус

скругления $R = 0,25$ мм у корня сварного шва в зазоре между соприкасающимися поверхностями свариваемых деталей определяет фактор геометрической концентрации напряжений и является одинаковым во всех вариантах моделирования сварного соединения. Также одинаковыми во всех вариантах являются параметры аппроксимации поверхности граничными элементами в зонах концентрации напряжений. Данное условие необходимо для корректного сравнения напряжений.

Условие многовариантности расчетного анализа предъявляло требование максимального упрощения процедуры исследования каждого отдельного варианта, что учтено при разработке расчетной схемы кронштейна. Расчетная схема предназначена в основном для сравнения уровней напряжений в сварных соединениях, отличающихся друг от друга по конструкции, и не предназначена (согласно допущению 3) для определения абсолютных значений напряжений, возникающих в реальных сварных швах. Наименее напряженный вариант соединения, выявленный по результатам сравнительного анализа при идентичных условиях моделирования, указывает направление для разработки и практической реализации мер по совершенствованию кронштейна.

Расчетная схема для моделирования кронштейна буксовых поводков показана на рис. 5,а. Она представляет (согласно допущению 1) часть боковины рамы, содержащую четверть рассматриваемого сварного соединения. В моделях отражена форма соединяемых деталей, геометрия сварных швов, учтены не связанные сваркой

опорные поверхности деталей, смоделированы зоны геометрической концентрации напряжений на внешней поверхности соединения (у границ шва) и внутренних поверхностях соединения (у корня шва).

Распределенные нагрузки q_1, q_2, q_3 имитируют поперечный изгиб боковины рамы. Здесь q_1 – распределенная нагрузка по поперечному сечению нижнего листа боковины (имеет две составляющие q_{1x}, q_{1z} , $q_1 = \sqrt{q_{1x}^2 + q_{1z}^2}$); q_2 – распределенная нагрузка по поперечному сечению верхнего листа боковины; q_3 – распределенная нагрузка по поперечному сечению вертикального листа боковины. Они выбраны по результатам расчетных исследований общего НДС рамы на предыдущем этапе при режиме нагружения 4 (соответствующем условиям проведения испытаний).

Для проведения сравнительного анализа определены следующие значения нагрузок: $q_{1x} = -59,6$ МПа; $q_{1z} = 10,9$ МПа; $q_2 = 61,8$ МПа; $q_3 = 7,09$ МПа.

Для решения задачи определения НДС в рамках трехмерной теории упругости применены разработанные алгоритмы МГЭ и программное обеспечение [5], которое реализует прямую формулировку МГЭ [9, 10].

МГЭ предполагает дискретизацию на граничные элементы только поверхности рассматриваемого объекта, позволяет учитывать его симметрию, допускает исследование моделей с бесконечными границами. Число неизвестных в задаче МГЭ меньше по сравнению с МКЭ при той же степени дискретизации объекта, так как

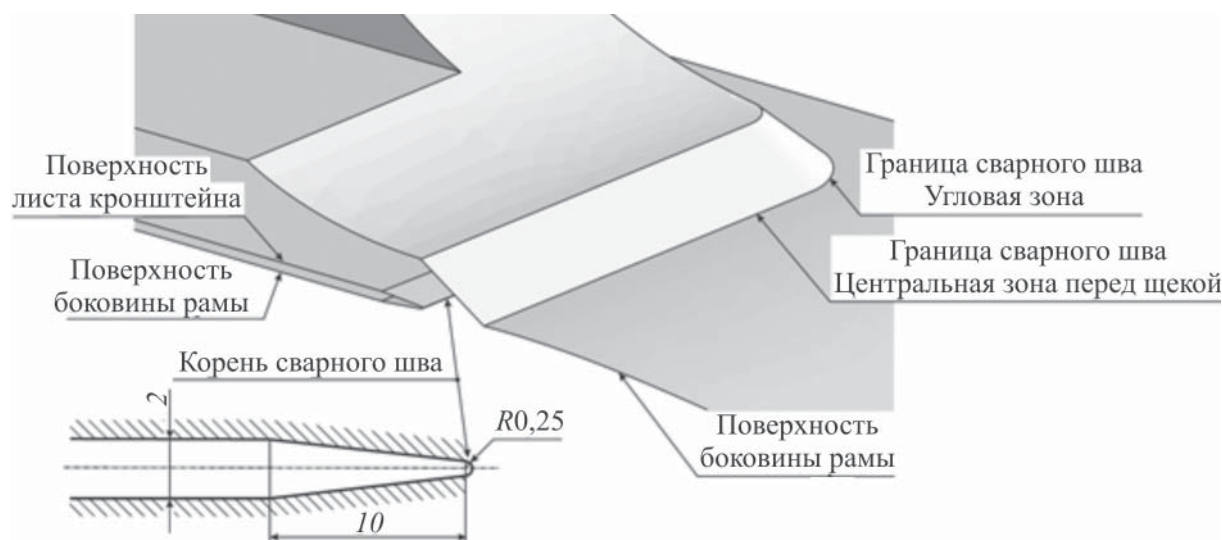


Рис. 4. Форма зазора у корня сварного шва (размеры в мм)

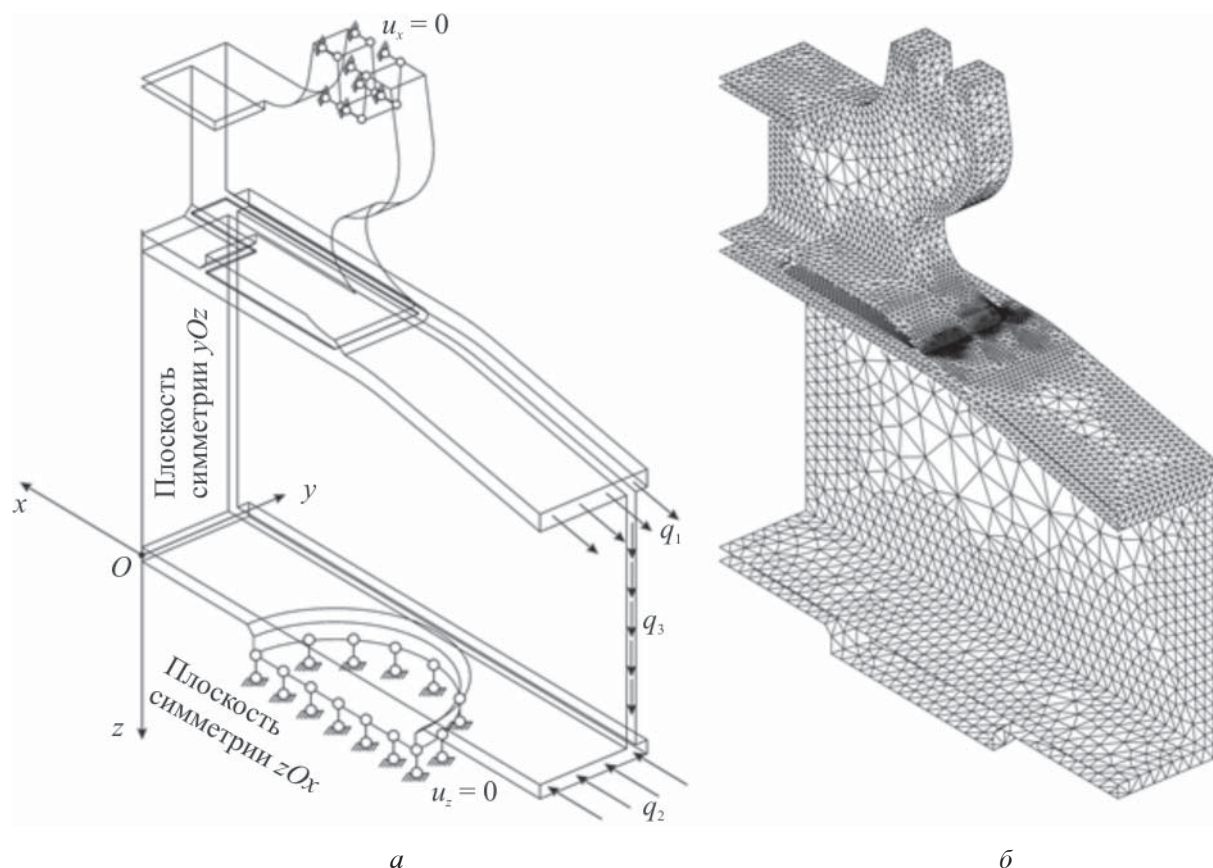


Рис. 5. Расчетная схема (а) и модель МГЭ (б) кронштейнов буксовых поводков

неизвестные сосредоточены только на границе области. Упрощается подготовка сетки граничных элементов, аппроксимирующих только поверхность объемного тела (в МКЭ создание качественной объемной сетки с резким сгущением элементов – весьма сложная задача). К недостаткам МГЭ (в рассматриваемой формулировке) следует отнести необходимость решения системы линейных алгебраических уравнений с несимметричными полностью заполненными матрицами в отличие от симметричных разреженных матриц в МКЭ. Наличие альтернативных подходов в расчетном анализе (МКЭ и МГЭ) предоставляет дополнительную возможность контроля результатов.

Модель МГЭ исходного варианта сварного соединения кронштейна буксовых поводков показана на рис. 5,б. Модель использует треугольные граничные элементы с линейным в пределах элемента распределением перемещений. В зонах концентрации напряжений для улучшения сходимости решения выполнено значительное сгущение сетки элементов. Варианты модели содержат до 45 тысяч степеней свободы.

Проработка вариантов конструкции сварного соединения кронштейна

Рассмотрены отдельные базовые изменения (вариации) конструкции кронштейна буксовых поводков и определены некоторые сочетания этих изменений в качестве расчетных вариантов для исследования напряженного состояния. Базовые изменения данного кронштейна показаны на рис. 6. К ним отнесены: 1 – изменение формы щеки; 2 – формирование связи между щекой, листом и нижним листом боковины за счет изменения конфигурации сварного шва по линии сопряжения данных деталей (в исходной конструкции предусматривался сварной шов, связывающий лист и щеку между собой и не связывающий эти детали с нижним листом боковины); 3 – увеличение толщины щеки; 4 – отсутствие листа между щеками; 5 – увеличение катетов фланговых швов; 6 – увеличение вертикального катета лобового шва; 7 – применение листа с постоянной толщиной (уменьшенной по сравнению с исходной); 8 – применение разделки под сварку для щеки и листа.

Из сочетания указанных базовых изменений (см. рис. 6) сформированы и исследованы

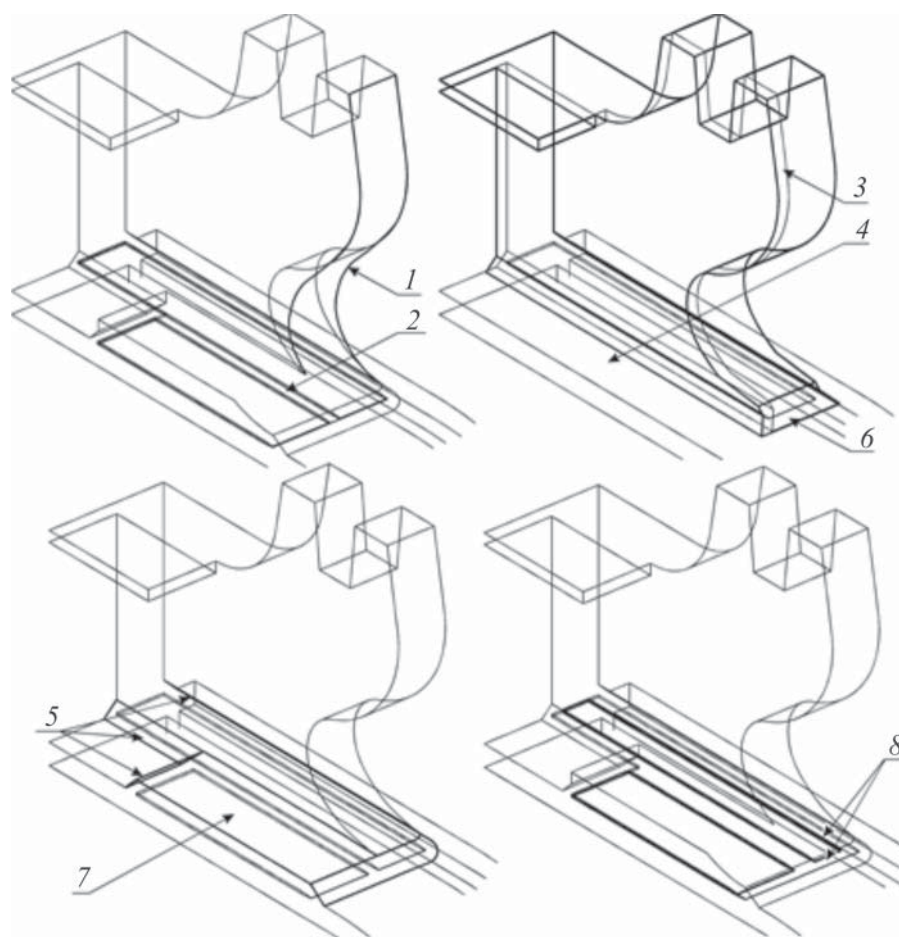


Рис. 6. Базовые изменения сварной конструкции кронштейна

варианты сварной конструкции кронштейна, приведенные в табл. 4.

В результате расчетов по МГЭ для указанных вариантов конструкции определены компоненты трехмерного напряженного состояния в сварном соединении и вычислены значения интенсивности напряжений σ_i . Максимальные значения σ_i приведены в табл. 5.

Во всех рассмотренных вариантах максимумы напряжений зафиксированы на границе лобового шва (непосредственно перед щекой или в ее угловой зоне), а также в корне лобового шва в зоне сопряжения опорных поверхностей щеки и листа с поверхностью нижнего листа боковины (см. рис. 4). По результатам исследования установлено следующее.

1. Полученные в исходном варианте конструкции упругим расчетом (без учета пластических свойств материала) величины напряжений 499 МПа в корне лобового шва и 229 МПа на его передней границе косвенно указывают на определенную вероятность усталостных повреждений в данной зоне при переменном характере воздействия. В действительности

(учитывая высокие пластические свойства применяемых сталей) образование первоначально небольших пластических зон в окрестности корня шва несколько изменит картину напряженного состояния, приведет к перераспределению напряжений и снижению их абсолютных значений. Принимая во внимание циклический характер нагрузки, целесообразно для снижения вероятности зарождения и развития усталостных трещин внести в конструкцию такие изменения, которые позволили бы уменьшить уровни напряжений в указанных зонах. Данная цель ставилась при последующем поиске модификаций.

2. Как показали результаты расчетов варианта 2, изменение формы щеки, связанное с усовершенствованием сопряжения этой детали и нижнего листа боковины рамы, не привело к снижению напряжений и не может рассматриваться в качестве меры по совершенствованию конструкции.

3. Исключение листа из конструкции дает эффект снижения напряжений в корне лобового шва до 407 МПа при исходной толщине щеки

Таблица 4

Варианты сварной конструкции кронштейна

№ варианта	Описание варианта / номера учтенных базовых изменений сварной конструкции (см. рис. 6)
1	Исходная конструкция
2	Измененная форма щеки сопряжения (размер по оси x увеличен на 50 мм) / 1
3	Исходный вариант кронштейна без листа. По линии соединения щеки и листа выполнен боковой сварной шов (катет 10 мм), связывающий щеку и нижний лист боковины. Вертикальный катет лобового сварного шва, связывающего щеку и нижний лист боковины, увеличен до 15 мм / 4, 6
4	Повторяет вариант 3 с увеличением толщины щеки до 55 мм / 3, 4, 6
5	Исходный вариант с уменьшенной на 6 мм шириной листа для обеспечения связи с нижним листом боковины рамы посредством сварного шва деталей щеки и листа по линии их соединения (ширина зазора 3 мм между щекой и листом) / 2
6	Исходный вариант с уменьшенной на 20 мм шириной листа для обеспечения связи с нижним листом боковины рамы посредством сварного шва деталей щеки и листа по линии их соединения (ширина зазора 10 мм между щекой и листом) / 2
7	Повторяет вариант 6 с увеличением катета лобового и фланговых сварных швов вокруг щеки до 12 мм и изменением толщины листа до 12 мм (толщина постоянная по всей длине листа) / 2, 5, 7
8	Повторяет вариант 7 с применением для щеки и передней части листа разделки под 45° и катетом 10 мм под сварные швы с нижним листом боковины / 2, 5, 7, 8
9	Исходный вариант с уменьшенной на 20 мм шириной листа, с применением для щеки и передней части листа разделки под 45° и катетом 10 мм под сварные швы с нижним листом боковины / 2, 5, 8

Таблица 5

**Максимальные значения σ_t (МПа) в сварном соединении кронштейнов
крепления буксовых поводков с нижним листом боковины рамы**

№ варианта	Корень лобового шва		Граница лобового шва перед щекой	
	Зона перед щекой	Зона перед листом	Центральная зона	Угловая зона
1	499	484	226	229
2	547	521	232	238
3	407	—	272	—
4	425	—	270	—
5	382	309	217	224
6	371	283	216	223
7	380	209	243	266
8	279	174	233	253
9	273	223	205	214

(45 мм, вариант 3) и до 425 МПа при увеличенной толщине щеки (55 мм, вариант 4). Одновременно со снижением напряжений в корне лобового шва повышаются напряжения по его границе – до 272 МПа. Варианты 3, 4 показывают эффективность введения дополнительной связи (в исходном варианте отсутствовала) посредством сварного шва между щекой, листом и нижним листом боковины. В последующих вариантах проработаны различные способы реализации этой возможности.

4. В вариантах 5, 6 дополнительная связь между щекой и нижним листом боковины образуется за счет сварного шва, укладываемого в образовавшийся зазор между щекой и листом (ширину листа предложено уменьшить на 6 мм для варианта 5 и на 20 мм – для варианта 6). При этом напряжения в корне шва снижены до 382 МПа для варианта 5 и до 371 МПа – для варианта 6. Одновременно с этим немного снижаются напряжения по границе лобового шва перед щекой.

5. В вариантах 7, 8 исследовано влияние на величины напряжений толщины листа и высоты катета швов вокруг щеки. Толщина листа выбрана постоянной и равной 12 мм (в исходном варианте она меняется от 20 мм до 10 мм). Катеты швов увеличены с 10 мм до 12 мм. В последнем варианте для щеки применена разделка под углом 45° с катетом 10 мм под сварной шов по периметру опорной поверхности щеки, увеличивающая слой металла, связывающего щеку и нижний лист боковины рамы. Напряжения в корне шва составили 380 МПа для варианта 7 и 279 МПа для варианта 8.

Итоговый вариант 9 приводит к уменьшению напряжений в корне шва (в центральной зоне) до 273 МПа, на границе шва (в угловой

зоне) – до 214 МПа. На рисунке 7 для этого варианта представлена эпюра распределения σ_x в наиболее напряженном поперечном сечении лобового сварного шва кронштейна.

На основании выполненных расчетов вариант 9 может быть принят за основу при проработке мер, направленных на совершенствование конструкции крепления кронштейнов буксовых поводков с целью улучшения его характеристик сопротивления усталости.

Заключение

Разработанная расчетная методика позволяет на этапе проектирования и доводки осуществлять рациональный выбор конструкции сварных соединений рам тележек локомотивов и вагонов моторвагонного подвижного состава. Этот выбор осуществляется по результатам сравнения уровней напряжений у различных вариантов сварного соединения при идентичных условиях нагружения, закрепления и способах моделирования, с учетом определенного вида концентраторов напряжений при исследовании влияния как основного фактора конструктивного исполнения соединения.

На примере сварного соединения кронштейна буксовых поводков рамы тележки электровагона продемонстрирована эффективность использования предложенной методики для совершенствования сварных соединений. Расчетный анализ показал, что при реализации предложенных мер в зоне лобовых сварных швов рассмотренного кронштейна уровни напряжений в корне шва и на его границе (передней кромке) по сравнению с исходным вариантом будут значительно снижены, что по предположению окажет положительное влияние на прочность конструкции рамы.

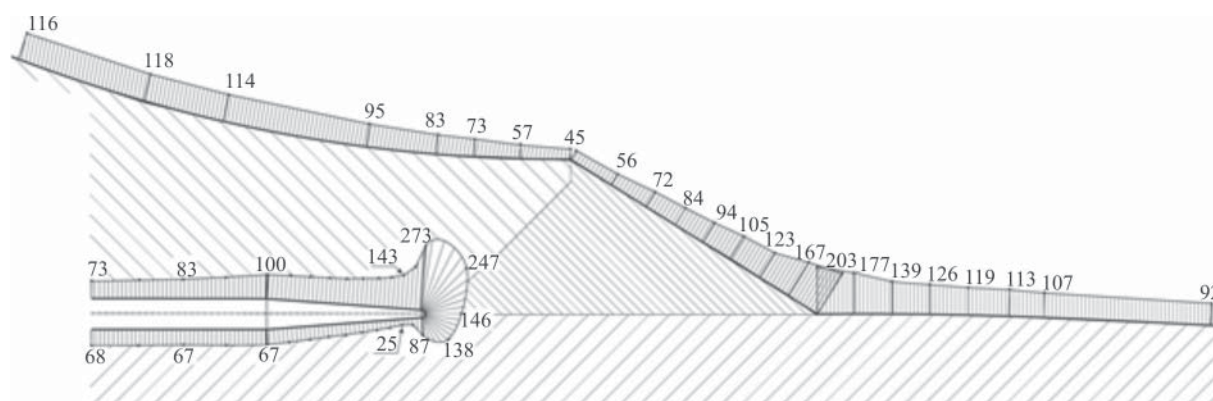


Рис. 7. Эпюра распределения σ_x (МПа) в наиболее напряженном поперечном сечении лобового сварного шва

Список литературы

1. Кочергин В.В. Исследования динамических и прочностных свойств экипажей тягового подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2005. № 2. С. 25–26.
2. Цкипуришвили В.Б., Кочергин В.В., Буханцев А.А., Аверин Н.А., Кутепов С.А. Динамико-прочностные испытания экипажной части // Вестник ВНИИЖТ. 2002. № 4. С. 39–41.
3. Косов В.С., Чаркин В.А., Добрынин Л.К., Мещерин Ю.В., Оганьян Э.С. и др. Тележка с осевой нагрузкой 25 тс для грузового вагона нового поколения // Железнодорожный транспорт. 2008. № 7. С. 50–55.
4. Дмитриченко С.С., Русанов О.А. Опыт расчетов на прочность, проектирования и доводки сварных металлоконструкций мобильных машин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2006. № 1. С. 8–13.
5. Русанов О.А. Анализ прочности конструкций машин с использованием современных численных методов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2002. № 2. С. 34–36.
6. Русанов О.А. Концентрация напряжений в тонкостенных конструкциях с дефектами в виде раковин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1999. № 10. С. 35–37.
7. Дмитриченко С.С., Русанов О.А. Влияние технологических дефектов сварки на прочность тракторных корпусных узлов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2001. № 7. С. 25–27.
8. Скопинский В.Н., Русанов О.А., Назаров Н.А. Определение напряжений в сферическом сосуде давления, укрепленного накладкой возле штуцерного узла // Машиностроение и инженерное образование. 2007. № 3. С. 23–33.
9. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. М.: Мир, 1987. – 524 с.
10. Бенерджи П., Баттерфилд Р. Метод граничных элементов в прикладных науках. М.: Мир, 1984. – 494 с.

Материал поступил в редакцию 16.12.14

**Русанов
Олег Александрович**

E-mail: newmalina@rambler.ru
Тел.: (495) 276-32-31

Доктор технических наук, профессор кафедры технической механики ФГБОУ ВПО Московский государственный индустриальный университет (ФГБОУ ВПО МГИУ). Сфера научных интересов: разработка и применение численных методов анализа прочности конструкций мобильных машин. Автор более 70 научных статей.

**КОЧЕРГИН
Виктор Васильевич**

E-mail: tdp.vniizht@mail.ru
Тел.: (495) 602-80-14

Кандидат технических наук, заведующий отделением «Транспортная механика» ОАО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ»). Сфера научных интересов: экспериментальные исследования динамики и прочности экипажей тягового подвижного состава, тяговый привод и буксовые узлы железнодорожного подвижного состава. Автор ряда научных статей и изобретений.

**БУХАНЦЕВ
Андрей
Александрович**

E-mail: tdp.vniizht@mail.ru
Тел.: (495) 602-81-63

Кандидат технических наук, заведующий лабораторией отделения «Транспортная механика» ОАО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ»). Сфера научных интересов: обеспечение прочности несущих конструкций железнодорожного подвижного состава, экспериментальные исследования динамики экипажей тягового подвижного состава. Автор ряда научных статей и изобретений.

**БРЕКСОН
Виталий Вильямович**

E-mail: vbrekson@mail.ru
Тел.: (343) 379-41-32

Начальник департамента конструкторских разработок и исследований ООО «Уральские локомотивы». Сфера научных интересов: разработка новых современных конструкций электровозов, электропоездов и постановка их на производство. Автор ряда научных статей и изобретений.