

УДК 629.4.023.11:621.791.05

Д-р техн. наук О. А. РУСАНОВ, кандидаты техн. наук В. В. КОЧЕРГИН, А. А. БУХАНЦЕВ,
инж. В. В. БРЕКСОН

Применение методов конечных и граничных элементов для выбора рациональной конструкции сварных кронштейнов рам тележек локомотивов и железнодорожных вагонов

Аннотация. Предложено осуществлять выбор рациональной конструкции сварных кронштейнов рам тележек локомотивов и вагонов по результатам сравнительного вариантного расчетного анализа трехмерного распределения напряжений в сварных соединениях. Первоначально с помощью метода конечных элементов исследуется общее напряженное состояние целиком всей рамы тележки. Далее с помощью метода граничных элементов детально изучается трехмерное распределение напряжений в отдельно взятом сварном кронштейне с учетом факторов геометрической концентрации напряжений и потенциальных дефектов сварки. Приведен пример использования методики для совершенствования сварного кронштейна буксовых поводков рамы тележки электровоза.

Ключевые слова: локомотив; железнодорожный вагон; рама тележки; сварное соединение; метод конечных элементов; метод граничных элементов

Введение. Кронштейны сварных рам тележек локомотивов и вагонов моторвагонного подвижного состава могут подвергаться в эксплуатации действию интенсивных циклически меняющихся нагрузок. Задача обеспечения усталостной прочности таких кронштейнов является в высокой степени актуальной. Требования к сопротивлению усталости рам тележек установлены стандартами ГОСТ Р 55495 – 2013, ГОСТ Р 55496 – 2013, ГОСТ Р 55513 – 2013, ГОСТ Р 55514 – 2013. Для подтверждения прочности рам проводят ходовые и стендовые вибрационные испытания [1, 2]. Расчетные методы анализа используются как вспомогательные инструменты конструктора [3]. Их потенциальные возможности зачастую не раскрываются в полной мере.

В результате проведения стендовых вибрационных испытаний после 10 млн циклов нагружения у рамы должны отсутствовать трещины усталости. Вероятность их появления повышается в сварных соединениях, содержащих технологические дефекты сварки (подрезы, раковины, поры, непровары и др.), являющиеся источниками концентрации напряжений. За счет совершенствования технологии можно улучшить качество сварных соединений и сократить количество дефектов сварки, но исключить их полностью

в условиях серийного производства практически невозможно. Прочность сварного узла зависит не только от технологических факторов, но и от конструкторских решений на этапе проектирования. Рациональный выбор таких параметров, как форма соединяемых деталей, схема расположения сварных швов, размеры сварных швов, виды разделки под сварку соединяемых деталей, позволяет снизить общий уровень напряженного состояния в сварных швах и, соответственно, уменьшить влияние эффекта концентрации напряжений в окрестности дефектов сварки. Проведение сравнительного расчетного анализа вариантов конструкции позволяет существенно улучшить ее качество, ускорить процесс проектирования.

Стендовые вибрационные и ходовые испытания рам тележек локомотивов и вагонов электропоездов (для определения показателей прочности) являются трудоемкими и дорогостоящими. К испытаниям объект должен быть спроектирован и изготовлен. По окончании составляется заключение о соответствии или несоответствии установленным требованиям всего изделия целиком. Однако в ходе испытаний могут быть выявлены отдельные узлы, нуждающиеся в доработке и усилении. Направления такой доработки не всегда бывают очевидны, и в этом случае для совершенствования конструкции (так же как и на этапе проектирования) эффективно может быть задействован потенциал расчетных методов анализа. Их внедрение требует определенной методической проработки.

В статье изложены основные положения расчетной методики анализа напряженного состояния сварных кронштейнов рам тележек локомотивов и вагонов. Применение методики при проектировании и доводке позволяет выбрать рациональные варианты конструкции кронштейнов с наименьшими уровнями напряжений в сварных соединениях.

Методика анализа напряженного состояния и выбора рациональной конструкции сварного соединения. Предложенная методика предусматривает два этапа численного моделирования. На первом этапе с помощью

метода конечных элементов (МКЭ) выполняется исследование общего напряженного состояния целиком всей рамы тележки. На втором этапе с помощью метода граничных элементов (МГЭ) детально изучаются особенности трехмерного напряженного состояния в отдельно взятом сварном кронштейне с учетом факторов геометрической концентрации напряжений в зонах потенциальных дефектов сварки. В основу разработки положены рекомендации и правила проектирования мобильных машин [4], программное обеспечение МКЭ, МГЭ [5], опыт решения прикладных задач [6].

Методика предназначена для сравнительного расчетного анализа различных исполнений сварных кронштейнов и поиска среди них варианта с наименьшими уровнями напряжений. Силы, воздействующие на раму, во всех расчетных случаях принимаются одинаковыми и соответствующими наиболее тяжелым режимам нагружения. Расчеты выполняются в линейной квазистатической постановке. Величины сил соответствуют амплитудным значениям циклической нагрузки в эксплуатации или испытаниях. Внешние силовые факторы рассматриваются по отдельности, а также в наиболее неблагоприятных комбинациях. В качестве режимов нагружения предпочтительными являются режимы, соответствующие условиям проведения стендовых вибрационных испытаний, поскольку такие испытания являются обязательными для подтверждения усталостной прочности рам. Если результаты испытаний уже известны, модели для повышения степени адекватности могут быть по ним откорректированы.

На этапе анализа общего напряженно-деформированного состояния (НДС) всей рамы целиком весьма сложно расчетным путем оценить с достаточной точностью напряжения в отдельных сварных швах с учетом реальной геометрии шва и потенциальных дефектов сварки. Габаритные размеры рам отличаются от размеров зон концентрации напряжений в сварных соединениях весьма значительно, что сильно затрудняет возможность отражения подобных концентраторов в составе общей модели рамы. Поэтому в методику введен следующий расчетный этап, в рамках которого для отдельно выбранного сварного кронштейна с помощью МГЭ более подробно исследуются особенности объемного распределения напряжений в зоне сварного соединения. При этом появляется возможность учета факторов геометрической концентрации напряжений в окрестности определенного вида дефектов, специально смоделированных для сопоставления напряжений. Граничные условия в расчетах отдельного кронштейна по МГЭ уточняются по результатам анализа общего НДС рамы.

Для того чтобы эффект концентрации напряжений был отражен по возможности более точно, сварные швы моделируются достаточно подробно. Допускается

учет отдельных выбранных дефектов сварки (источник концентрации напряжений).

По описанной схеме с помощью МГЭ выполняется расчет напряжений у различных вариантов сварного кронштейна. При проведении сравнительного анализа варьируются параметры сварных швов (их форма, размеры, расположение, виды разделки под сварку). Может изменяться геометрия соединяемых деталей. В конструкцию могут быть введены новые дополнительные детали.

Если за счет внесения изменений будет достигнуто снижение статических напряжений в сварном узле, то в эксплуатации для такой конструкции амплитуды циклических напряжений также будут снижены, что положительным образом скажется на способности рамы в целом сопротивляться данным нагрузкам (улучшит ее прочностные характеристики). Выявленные варианты с пониженными напряжениями рекомендуются для проработки мер по совершенствованию конструкции.

Расчеты второго этапа базируются на следующих допущениях:

1. Модель МГЭ имитирует отдельный фрагмент рамы, содержащий рассматриваемый кронштейн. В модели отражена форма кронштейна, геометрия сварных швов, учтены не связанные сваркой поверхности соприкосновения соединяемых деталей, смоделированы зоны геометрической концентрации напряжений на внешней поверхности соединения (у границ швов) и внутренних поверхностях соединения (в корне швов).
2. Условия нагружения фрагмента рамы (моделируемого отдельно) максимально приближены к условиям нагружения данного фрагмента в составе рамы и выбраны по результатам общего анализа НДС рамы с использованием ее полной модели.
3. При расчетах в зонах сварных швов не учтены остаточные термические напряжения, напряжения после поверхностной обработки, неоднородность свойств металла в шве. Сварные швы не содержат непроваров, несплавлений. Форма швов соответствует конструкторской документации. Учтен фактор геометрической концентрации напряжений в окрестности определенного вида дефектов сварки, специально введенных в расчетную схему.
4. Расчеты НДС выполнены в 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 в качестве критерия для сопоставления вариантов конструкции друг с другом.

5. При выполнении сравнительного анализа для каждого расчетного варианта устанавливаются идентичными условия нагружения, закрепления, способы моделирования кронштейна, сварных швов, концентраторов напряжений. Оценивается влияние на уровни напряжений только одного фактора — конструктивного исполнения рассматриваемого узла.

Описание объекта исследования.

Применение изложенной методики проиллюстрировано на примере разработки мер по совершенствованию сварных кронштейнов крепления буксовых поводков на раме тележки электровоза (рис. 1). Рама имеет в своем составе две боковины 1, среднюю балку 2, концевую балку 3. Все балки — замкнутого прямоугольного поперечного сечения, выполнены из листов стали 09Г2С. К балкам крепятся кронштейны узлов системы рессорного подвешивания электровоза, тормозной системы, тяговых двигателей и другого оборудования. Рама воспринимает нагрузки от веса кузова, установленных на ней агрегатов, эксплуатационные нагрузки. На кронштейн буксовых поводков 5 со стороны колесных пар (через поводки и клиновые соединения) действуют продольные силы, имеющие значительную динамическую составляющую. Буксовые поводки связаны с кронштейном 5 через клиновые соединения, для чего на щеках 6 кронштейна предусмотрены клиновые пазы 14, по поверхности которых распределена результирующая продольная сила со стороны поводка на кронштейн. Детали кронштейна выполнены из сталей 09Г2С, 10Г2С1.

Корень лобового сварного шва 13 кронштейна и передняя кромка 8 данного шва потенциально являются зонами концентрации напряжений. Разработанная методика применена для снижения уровней напряжений в данных зонах.

Исследование по МКЭ общего напряженного состояния рамы. С

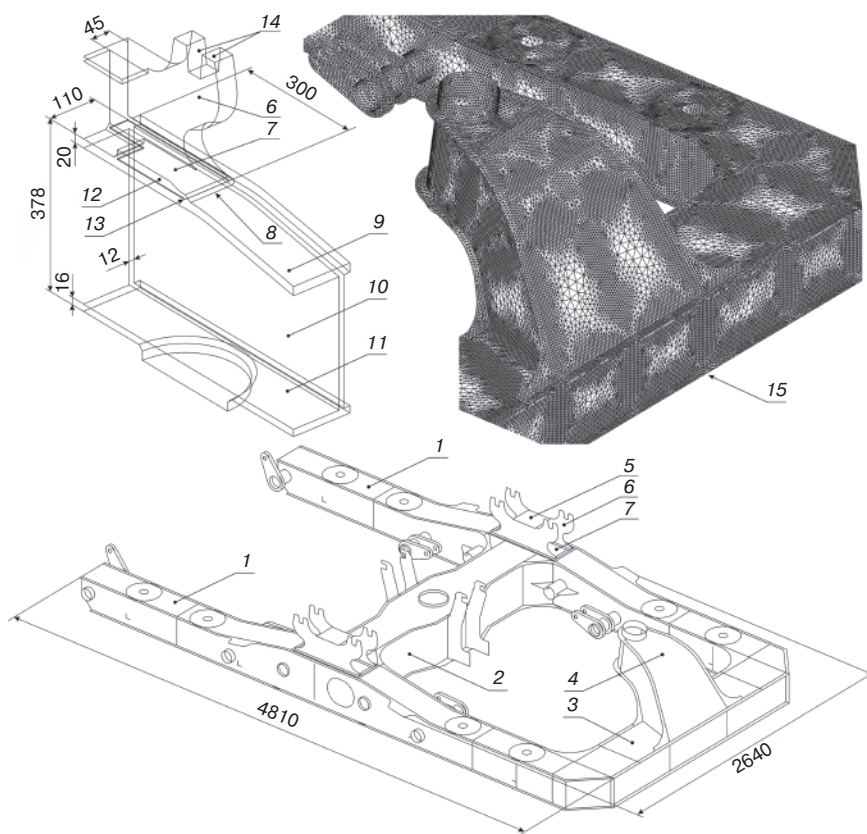


Рис. 1. Рама тележки электровоза (в перевернутом положении):

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

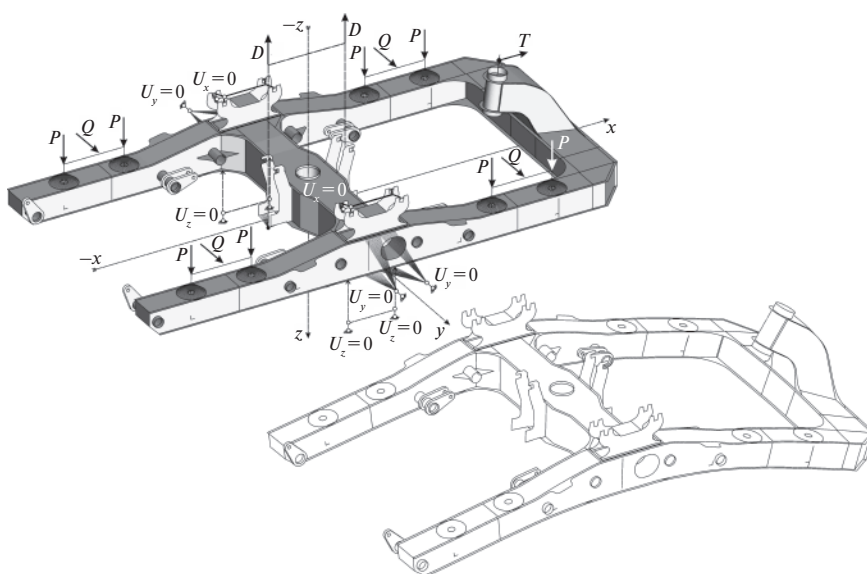


Рис. 2. Расчетная схема рамы; рама в деформированном состоянии (режим 4)

Таблица 1

Значения сил, действующих на раму в расчетных режимах нагружения

№ режима нагружения	Вертикальная сила P , действующая на пружину буксового узла, кН	Рамная сила Q , действующая на буксу, кН	Вертикальные силы D от тягового привода, 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

помощью МКЭ определено общее НДС рамы. Для подтверждения адекватности модели результаты расчета сопоставлены с результатами испытаний. Расчетные режимы нагружения рамы соответствуют условиям проведения стендовых вибрационных испытаний.

Расчетная схема рамы представлена на рис. 2. Используются обозначения: P —вертикальная сила на

пружину буксового узла; Q —рамная сила (горизонтальная поперечная сила на оси колесной пары), проходящая на буксу; D —вертикальные силы со стороны тягового привода; T —продольная тяга. Начало системы координат расположено на оси шкворневого узла в плоскости верхних листов балок рамы; ось x —продольная ось рамы; ось y —поперечная

Таблица 2

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

Обозначение датчика	Значения напряжений, МПа							
	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

(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 режимах нагружения приведены в табл. 1.

Разработанная модель МКЭ рамы отражает тонкостенную конструкцию с помощью треугольных элементов тонкой оболочки, основанных на гипотезах Кирхгоффа. Представление об используемой конечно-элементной сетке можно получить из рис. 1 (поз. 15), на котором показана часть модели. Конечные элементы оболочки совмещены со срединной поверхностью тонкостенных деталей. Размеры элементов выбираются алгоритмом генерации автоматически. Длина стороны элемента на границах областей составляет 8 мм. Дополнительно (к элементам оболочки) в модель введены балочные элементы, предназначенные для распределения по узлам действующих на раму сил и обеспечения условий закрепления. В совокупности модель МКЭ содержит 1 603 692 степени свободы. Для расчетных режимов нагружения из табл. 1 определено НДС рамы. Значения напряжений приведены в табл. 2. Деформированное состояние рамы в режиме 4 показано на рис. 2.

Расчетные напряжения сопоставлены с экспериментальными. При испытаниях на раме установлено 80 тензорезисторов (датчиков). Сравнение с расчетом выполнено по 22 из них (схема размещения показана на рис. 3). Выделены две группы датчиков. К первой отнесены датчики (с базой 20 мм), имеющие номера 1–12, расположенные на удалении от зон значительной концентрации напряжений, фиксирующие в основном общие деформации конструкции.

Ко второй группе отнесены датчики (с базой 10 мм), расположенные в зоне значительной концентрации напряжений, где напряжения резко меняются в пределах малых по протяженности зон. Датчики с номерами 13–20 из этой группы находятся в зоне сварных швов крепления кронштейнов буксовых поводков, датчики с номерами 21–22 — 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 является обоснованным применение отдельных датчиков вместо тензометрических розеток. Замеренные при этом значения напряжений с достаточной для практических целей точностью соответствуют значениям интенсивности напряжений.

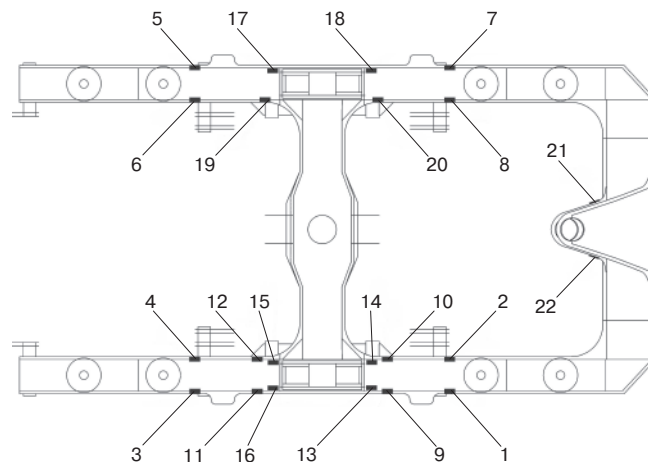


Рис. 3. Схема размещения датчиков для сравнения с расчетом

Результаты сравнения 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 резкой неоднородностью напряженно-деформированного состояния в зонах измерений, осреднением по базе датчика замеренных значений деформаций.

Отмечено, что в большинстве точек, где проведено сопоставление напряжений, расчетные значения напряжений несколько превышают экспериментальные, что может объясняться как осреднением замеренных значений по базе датчика, так и идеальным характером самой расчетной схемы, которая не абсолютно точно воспроизводит реальные условия 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 (рис. 1, поз. 5) с боковиной рамы выполнено с использованием МГЭ.

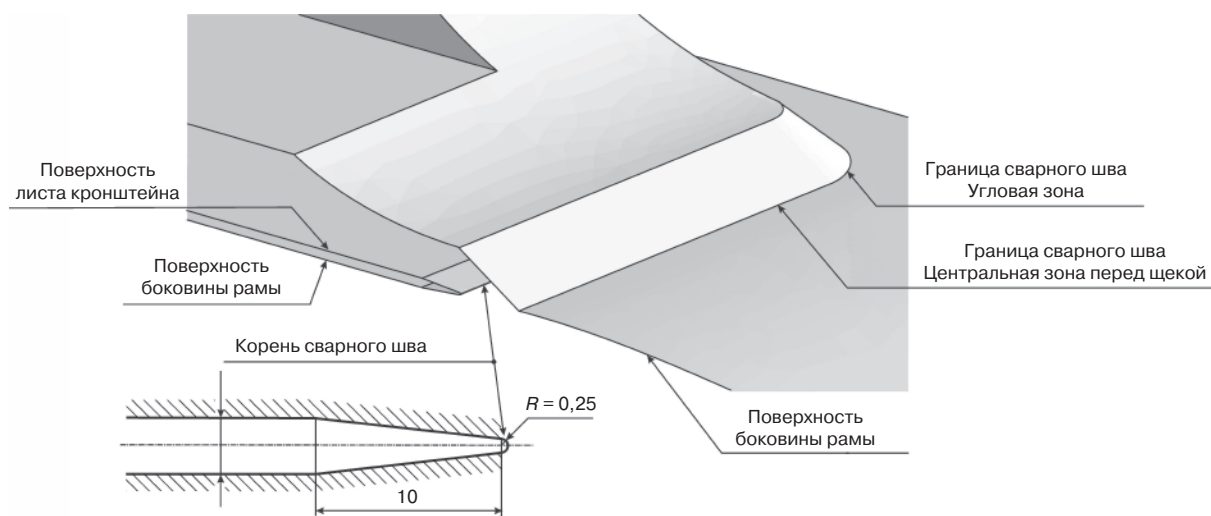


Рис. 4. Форма зазора у корня сварного шва (размеры — в мм)

Рассмотрены различные варианты конструктивного исполнения этого соединения в сравнении с исходным. Целью 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 (см. рис. 4) у корня сварного шва в зазоре между соприкасающимися поверхностями свариваемых деталей определяет фактор геометрической концентрации напряжений, является одинаковым во всех вариантах моделирования. Одинаковыми являются также параметры аппроксимации поверхности граничными элементами в зонах концентрации напряжений. Данное условие необходимо для корректного сравнения напряжений.

Условие многовариантности предъявляло требование максимального упрощения процедуры рассмотрения

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.

Расчетная схема для моделирования кронштейна показана на рис. 5. Она представляет часть боковины рамы с четвертью рассматриваемого сварного соединения. В моделях МГЭ 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. Они выбраны по результатам исследований общего НДС рамы при режиме нагружения 4. 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. Для проведения сравнительного анализа установлены следующие значения нагрузок: $q_{1x} = -59,6$ МПа; $q_{1z} = 10,9$ МПа; $q_2 = 61,8$ МПа; $q_3 = 7,09$ МПа.

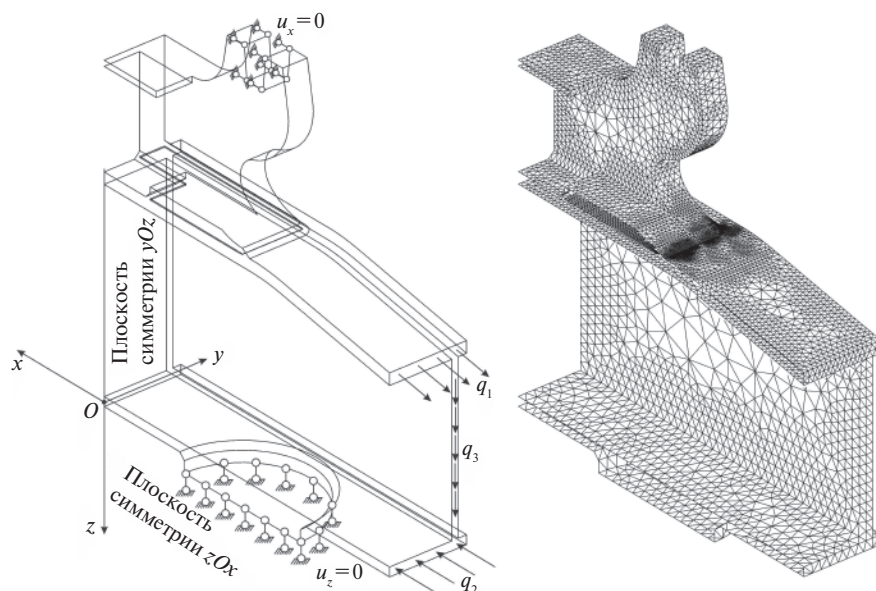


Рис. 5. Расчетная схема и модель МГЭ кронштейнов буксовых поводков

Таблица 4

Варианты сварной конструкции кронштейна

№ варианта	Описание варианта / номера одновременно учтенных базовых изменений конструкции (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

При определении объемного НДС сварного кронштейна применено разработанное программное обеспечение [5], в котором реализован прямой вариант МГЭ [7, 8]. Метод предполагает аппроксимацию граничными элементами только поверхности объекта. При схожей степени дискретизации число неизвестных в задаче МГЭ меньше по сравнению с МКЭ. В МГЭ упрощается подготовка сетки элементов. Напротив, в МКЭ создание качественной объемной сетки с резким сгущением элементов в зонах концентрации — весьма сложная задача. К недостаткам МГЭ (в рассматриваемой формулировке) следует отнести необходимость решения системы линейных алгебраических уравнений с несимметричными, заполненными матрицами в отличие от симметричных разреженных матриц в МКЭ.

Модель МГЭ исходного варианта сварного соединения кронштейна буксовых поводков показана на рис. 5. Модель использует треугольные граничные элементы с линейным распределением перемещений. В зонах концентрации напряжений для улучшения сходимости выполнено значительное сгущение сетки элементов. Разработанные модели содержат до 45 000 степеней свободы.

Проработка вариантов конструкции сварного соединения кронштейна. Для исследования напряженного состояния кронштейна рассмотрен ряд расчетных вариантов в виде сочетаний из некоторого набора отдельных базовых изменений его конструкции. К базовым изменениям кронштейна отнесены (рис. 6): 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.

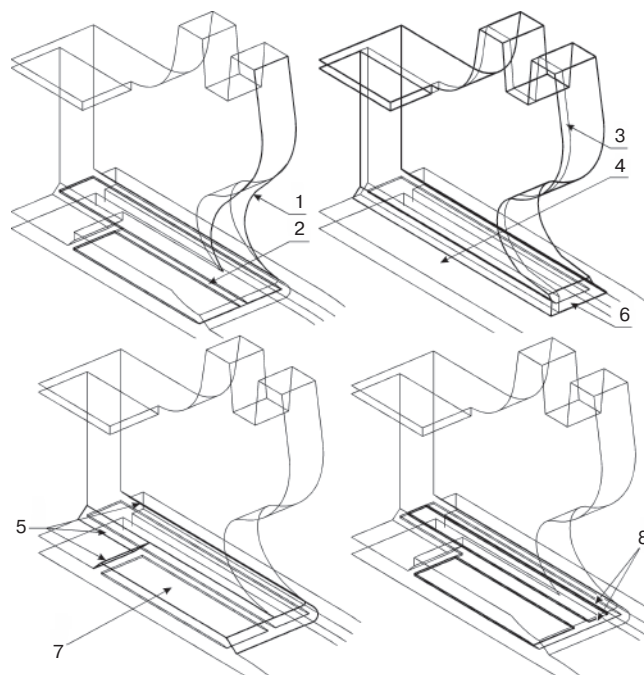


Рис. 6. Базовые изменения сварной конструкции кронштейна

Таблица 5

Максимальные значения σ_i в сварном соединении кронштейна

№ варианта	σ_i , МПа			
	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

Из сочетаний указанных базовых изменений (см. рис. 6) сформированы и исследованы следующие варианты сварной конструкции кронштейна (табл. 4).

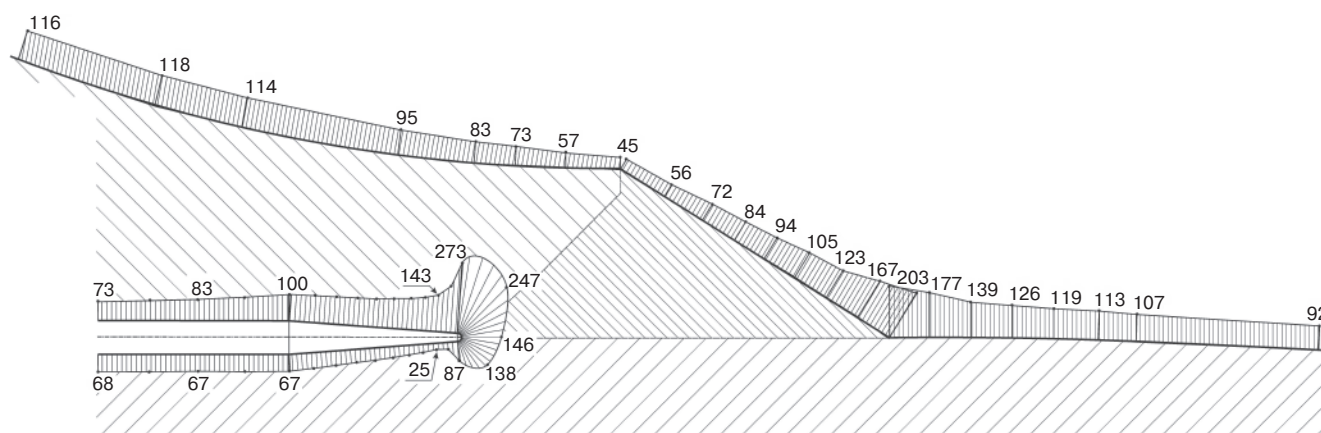
В результате расчетов по МГЭ для указанных вариантов конструкции определены компоненты трехмерного напряженного состояния в сварном соединении и вычислены значения интенсивности напряжений σ_i . Максимальные значения σ_i приведены в табл. 5. Во всех рассмотренных вариантах максимумы напряжений зафиксированы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

Полученные линейным расчетом (без учета пластических свойств материала) напряжения в исходной конструкции (в корне лобового шва и на его передней границе) имеют высокие значения. По сделанным допущениям их следует рассматривать как условные,

предназначенные только для сравнения при последующем поиске модификаций конструкции. Величина уменьшения напряжений в указанных зонах рассматривалась в качестве критерия эффективности тех или иных мер.

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 быть рекомендовано в качестве основы для проработки.

Исключение листа из конструкции дает эффект небольшого снижения напряжений в корне лобового шва при исходной толщине щеки (45 мм, вариант 3) и увеличенной толщине щеки (55 мм, вариант 4). Но одновременно с этим повышаются напряжения по границе шва. Варианты 3, 4 показывают эффективность введения дополнительной связи (в исходном варианте отсутствовала) посредством сварного шва между щекой, листом и нижним листом боковины. В

Рис. 7. Эпюра распределения σ_i (МПа) в наиболее напряженном поперечном сечении лобового сварного шва (вариант 9)

последующих вариантах проработаны различные способы реализации этой возможности. Дополнительная связь между щекой и нижним листом боковины (варианты 5, 6) образуется за счет сварного шва, укладываемого в 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 снижаются существенно. Одновременно немного снижаются напряжения по границе лобового шва перед щекой.

В вариантах 7, 8 исследовано влияние на величины напряжений параметра толщины листа и высоты катета швов вокруг щеки. Толщина листа выбрана постоянной и равной 12 мм (в исходном варианте она меняется от 20 до 10 мм). Катеты швов увеличены с 10 до 12 мм. В последнем варианте для щеки использована разделка под углом 45° с катетом 10 мм под сварной шов по периметру опорной поверхности щеки. Применение разделки оказало существенное влияние на напряжения.

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. Данный вариант может быть принят за основу при проработке мер по совершенствованию конструкции кронштейна. Для этого варианта на рис. 7 представлена эпюра распределения σ_i в наиболее напряженном поперечном сечении лобового сварного шва кронштейна.

Заключение. Предложено осуществлять выбор рациональной конструкции сварных кронштейнов рам тележек локомотивов и вагонов моторвагонного подвижного состава по результатам сравнительного вариантного анализа трехмерного напряженного состояния в сварных соединениях на основе разработанной двухэтапной расчетной методики. На первом этапе с помощью метода конечных элементов выполняется исследование общего напряженного состояния целиком всей рамы тележки. На втором этапе с помощью метода граничных элементов детально изучаются особенности трехмерного напряженного состояния в отдельно взятом сварном кронштейне с учетом факторов геометрической концентрации напряжений и потенциальных дефектов сварки. На примере сварного соединения кронштейна буксовых поводков рамы тележки электровоза продемонстрирована эффективность предложенной методики. За счет изменений в конструкции в наиболее нагруженной зоне кронштейна (в корне и на передней кромке лобового сварного шва) уровни напряжений по сравнению с исходным вариантом значительно снижены. Предложенная методика успешно применена при совершенствовании кронштейнов рам тележек локомотивов. Она может использоваться при разработке других сварных несущих конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочергин В.В. Исследования динамических и прочностных свойств экипажей тягового подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2005. № 2. С. 25–26.
2. Динамико-прочностные испытания экипажной части / В.Б. Ципуришвили [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2002. № 4. С. 39–41.
3. Тележка с осевой нагрузкой 25 тс для грузового вагона нового поколения / В.С. Косов [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2008. № 7. С. 55–58.
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. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. М.: Мир, 1987. 524 с.
8. Бенерджи П., Баттерфилд Р. Метод граничных элементов в прикладных науках. М.: Мир, 1984. 494 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

РУСАНОВ Олег Александрович,

профессор кафедры «Сопrotивление материалов», Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ).
107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38;
ведущий научный сотрудник лаборатории «Теоретические исследования и математическое обеспечение испытаний», ОАО «ВНИИЖТ».
129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10.
Тел.: (495) 602-80-61.
e-mail: newmalina@rambler.ru.

КОЧЕРГИН Виктор Васильевич,

заведующий отделением «Транспортная механика», ОАО «ВНИИЖТ».
129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10.
Тел.: (495) 602-80-14.
E-mail: tdp.vniizht@mail.ru

БУХАНЦЕВ Андрей Александрович,

заведующий лабораторией «Экспериментальные исследования динамики и прочности экипажей тягового подвижного состава», ОАО «ВНИИЖТ».
129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10.
Тел.: (495) 602-81-63.
E-mail: tdp.vniizht@mail.ru

БРЕКСОН Виталий Вильямович,

начальник департамента конструкторских разработок и исследований, ООО «Уральские локомотивы».
624090, Свердловская обл., Верхняя Пышма, Парковая ул., д. 36.
Тел.: (343) 379-41-32.
E-mail: vbrekson@mail.ru

Applying Finite-Element and Boundary-Element Methods to Select Rational Design Version of Weld-Fabricated Bogie Frame Brackets of Locomotives and Railway Cars

Oleg A. Rusanov, Dr. of Technical Science, Professor, Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI). 38, Bolshaya Semenovskaya str., 107023 Moscow, Russian Federation; Leading Research Worker, Laboratory "Theoretical research and mathematical support test", JSC Railway Research Institute (JSC VNIIZhT). 10, 3rd Mytischinskaya str., 129626 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (495) 602 8061. E-mail: newmalina@rambler.ru

Victor V. Kochergin, Candidate of Technical Science, Head of Department for Transport Mechanics, JSC Railway Research Institute (JSC VNIIZhT). 10, 3rd Mytischinskaya str., 129626 Moscow, Russian Federation Tel.: +7 (495) 602 8014. E-mail: tdp@vniizht.ru

Andrey A. Bukhantsev, Candidate of Technical Science, Chief of Laboratory for Experimental Researches of Traction Power Means' Undercarriages Dynamics and Strength, JSC Railway Research Institute (JSC VNIIZhT). 10, 3rd Mytischinskaya str., 129626 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (495) 602 8163. E-mail: tdp.vniizht@mail.ru

Vitaliy V. Brekson, Head of Department for Design Engineering and Analysis, Ural Locomotives Ltd. 36, Parkovaya str., Verkhnyaya Pyshma, Sverdlovskaya Oblast', Russian Federation. Tel.: +7 (343) 379 4132. E-mail: brekson@ulkm.ru

Abstract. There is proposed method to select rational design version of weld-fabricated bogie frame brackets of locomotives and railway cars. The selection is performed in accord with the outcomes of double-phase computation-based stress analysis in the welded joints. At the first stage general stressed state of a bogie frame as a whole is examined by applying finite-element method. At the second stage special features of 3D stress distribution within the individual bracket are studied in detail using boundary-element method with due regard for factors of geometric concentration of stresses within the potential welding defects zones. Loading conditions of bogie frame fragment with a bracket simulated on the individual basis are very close to those of its loading while within the frame. They are selected according to the results of stresses examination in the frame carried out with use of its comprehensive model.

Comparative analysis of bracket design versions is performed by varying form, dimensions and location of welded joints and type of edge preparation. Geometry of connected details may also be varied. The design version may be added with some details. In all the simulation cases there ought to be identical loading and fixing conditions as well as modeling techniques applied to brackets, welds and stress concentrators. There is assessed effect exerted on stresses by one factor only, specifically design version of an assembly under consideration.

Efficiency of the proposed method may be exemplified by selection of rational design version for weld-fabricated axle-box links bracket of electric locomotive bogie frame. The method is made use of in refining a design of weld-fabricated bogie frames of electric locomotives.

Keywords: locomotive; railway car; bogie frame; welded joint; finite-element method; boundary-element method

References

1. Kochergin V.V. *Issledovaniya dinamicheskikh i prochnostnykh svoystv ekipazhey tyagovogo podvizhnogo sostava* [Research of dynamic and strength properties of traction rolling stock]. Zheleznodorozhnyy transport, 2005, no. 2, pp. 25–26.

2. Tskipurishvili V.B., Kochergin V.V., Buhantsev A.A., Averin N.A., Kutepov S.A. *Dinamiko-prochnostnye ispytaniya ekipazhnoy chasti* [Dynamic and strength tests of running gear]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2002, no. 4, pp. 39–41.

3. Kosov V.S., Charkin V.A., Dobrynin L.K., Meshcherin Yu.V., Ogan'yan E. S., Oguenko V.N., Berezin V.V., Sorochkin E.M., Pannin Yu.A., Tkachenko V.N., Krasnyukov N.F., Shevchenko V.G., Stavrova E.K. *Telezhdka s osevoy nagruzkoy 25 ts dlya gruzovogo vagona novogo pokoleniya* [A bogie with an axial load of 25 ton for the freight car of a new generation]. Zheleznodorozhnyy transport, 2008, no. 7, pp. 55–58.

4. Dmitrichenko S.S., Rusanov O.A. *Opyt raschetov na prochnost', proektirovaniya i dovodki svarynykh metallokonstruktsiy mobil'nykh mashin* [Experience of strength calculations, design and finishing of welded metal mobile machines]. Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny, 2006, no. 1, pp. 8–13.

5. Rusanov O.A. *Analiz prochnosti konstruktsiy mashin s ispol'zovaniem sovremennykh chislennykh metodov* [Strength analysis of machine design using modern numerical methods]. Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny, 2002, no. 2, pp. 34–36.

6. Rusanov O.A. *Kontsentratsiya napryazheniy v tonkostennykh konstruktsiyakh s defektami v vide rakovin* [The stress concentration in thin-walled structures with defects in the form of pits]. Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny, 1999, no. 10, pp. 35–37.

7. Brebbia C.A., Telles J.C. F., Wrobel L.C. *Boundary element techniques: Theory and applications in engineering*. Berlin, Springer Publ., 1984. 464 p. (Russ. ed.: Brebbiya K., Telles Zh., Vroubel L. Metody granichnykh elementov. Moscow, Mir Publ., 1987. 524 p.)

8. Banerjee P.K., Butterfield R. *Boundary element methods in engineering science*. London, McGraw-Hill Publ., 1981. 452 p. (Russ. ed.: Benerdzhi P., Batterfild R. Metod granichnykh elementov v prikladnykh naukakh. Moscow, Mir Publ., 1984. 494 p.)

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Ромен Ю. С. Динамика железнодорожного экипажа в рельсовой колее. Методы расчета и испытаний. М.: ВМГ-Принт, 2014. 210 с.

Описываются основные этапы теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия подвижного состава и пути. Изложена методика составления алгоритма расчетов динамических процессов направления экипажа рельсовой колеей. Приведены результаты расчетов и испытаний новых и модернизированных типов вагонов, на базе которых производится установление скоростей движения. Показано влияние состояния пути и ходовых частей подвижного состава на энергетические параметры их взаи-

модействия и безопасность движения. Дается методика оценки состояния пути по динамическому воздействию на подвижной состав на основании измерения его геометрических параметров.

Книга предназначена для работников дорог, специалистов научных и проектных организаций, связанных с созданием и оценкой новых типов подвижного состава, может быть полезна преподавателям и студентам учебных заведений железнодорожного транспорта.

По вопросам предварительного заказа на приобретение книги обращайтесь в редакционно-издательский отдел ОАО «ВНИИЖТ», тел. (499) 260-43-20.