

УДК 621.791; 621.77.01

DOI: 10.22213/2413-1172-2022-1-62-76

Повышение качества изготовления рам кузовов локомотивов

Б. А. Гупалов, кандидат технических наук, Новоуральский технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Новоуральск, Россия

Изложен процесс изготовления рамы кузовов локомотивов, который является сложным поэтапным процессом сборки (сварки) элементов. Установлено, что внутренние напряжения вызывают сварочные деформации, при этом отклонение от прямолинейности боковин рам кузовов электровозов серии 2ЭС6, 2ЭС10, 2ЭС7 (производство ООО «Уральские локомотивы») может достигать до 25 мм при допуске в 5 мм. Результаты расчетов внутренних напряжений при линейных перемещениях в 25 мм боковин показал, что максимальные значения напряжений могут достигать до 45 МПа. Для повышения точностных параметров в технологию изготовления рамы кузова вводится операция правки местным нагревом.

Описаны основные характеристики существующей технологии правки на производстве местным нагревом (указаны места нагревов, температурные режимы и др.), показаны основные недостатки (низкий уровень механизации, отсутствие снятия остаточных напряжений в материалах). Выполнены исследования технических решений способов правки. Результаты показывают, что имеются широкие возможности замены термической правки на механизированную вибрационную обработку, которая снижает остаточные напряжения в материале изделий. Эффективность вибрационной обработки в значительной степени зависит от выбранных параметров режима: частоты, амплитуды, длительности воздействия колебаний, а также оптимальной схемы виброобработки рамы.

Предложена оригинальная схема правки рамы кузова электровозов в производственных условиях. Указано, что для минимизации усилий статического изгиба необходимо осуществлять подвешивание рамы в заневоленном состоянии и осуществлять перемещение вибраторов (-а) по длине рамы, разделив ее примерно на 3 равные части. Для отработки технологии правки предлагается использование оборудования PXI Platform с приложением LabVIEW. Стоимость операции правки можно уменьшить минимум на 20 %, что скажется на стоимости электровоза в целом.

Ключевые слова: рама кузова электровоза, внутренние напряжения, точностные параметры, правка местным нагревом, вибрационная правка, сварная конструкция.

Введение

Железнодорожный транспорт является ведущим элементом транспортной системы страны, что определяется его возможностью осуществлять круглогодичное регулярное движение, перевозить основную часть больших потоков грузов и обеспечивать мобильность трудовых ресурсов. От эффективного функционирования железнодорожного транспорта зависит социально-экономическое развитие отдельных отраслей экономики и регионов в целом, в том числе весьма отдаленных.

Одним из приоритетных направлений развития эффективности использования железнодорожного транспорта согласно стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. является обеспечение возрастающих объемов перевозок грузов в 1,5 раза. В этой связи планируется увеличение эксплуатационных характеристик разрабатываемых новых локомотивов:

– осевых нагрузок на 8...17 % (с 25 до 27...30 тс);

– конструкционной скорости локомотивов на 17 % (с 120 до 140 км/ч).

– наработки локомотива на отказ на 30...40 %.

Добиться столь высоких показателей невозможно при вчерашних подходах в разработке и изготовлении локомотивов нового поколения, в том числе электровозов.

Разработкой и выпуском электровозов для движения грузовых поездов занимаются крупные иностранные производители, такие как Siemens AG (Германия), Stadler Bussnang AG (Швейцария), Pesa (Польша), Alstom (Франция), а также отечественные предприятия, например, ООО «Уральские локомотивы» (УЛ) (г. Верхняя Пышма). Годовая производственная программа уральского предприятия составляет более 100 единиц техники, среди которой двух- и трехсекционные грузовые магистральные электровозы как постоянного тока серии 2ЭС6 «Синара», 2ЭС10 «Гранит», так и переменного тока серии 2ЭС7.

Основные эксплуатационные характеристики электровозов российского и иностранного производства представлены в таблице 1.

Одним из основных элементов электровоза является рама кузова, служащая прочным несущим основанием для электротехнического оборудования. Рама кузова представляет собой конструкцию прямоугольной формы, несущую все виды нагрузок. Она состоит из двух продольных балок (боковин), соединенных по концам двумя буферными брусками, промежуточных балок, опор кузова (надтележечных балок), основания крестообразной формы.

На рисунке 1 представлен пример рамы кузова иностранного и отечественного производства в привязке к типу электровоза.

Отечественные электровозы серии 2ЭС6, 2ЭС10, 2ЭС7 производства ООО «Уральские локомотивы» отличаются электротехническим и механическим оборудованием, но принципиально имеют единую базовую платформу в виде рамы кузова с небольшими изменениями в зависимости от вида электровоза (рис. 2). Масса рамы составляет около 16 т.

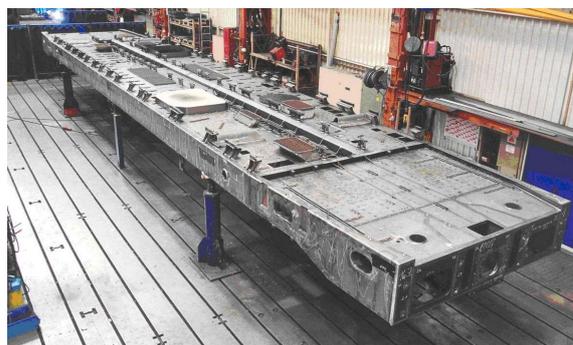
Таблица 1. Основные эксплуатационные характеристики электровозов российского и иностранного производства

Table 1. Main operational characteristics of electric locomotives of Russian and foreign production

Характеристики	Тип электровоза			
	2ЭС6	2ЭС10	2ЭС7	Vectron
Номинальное напряжение на токоприемнике, кВ	3 (DC)		25 (AC)	AC/DC
Тип тягового привода	коллекторный	асинхронный (тяговое оборудование Siemens)		
Нагрузка на ось, т	25			22,5
Мощность продолжительного режима, кВт	6000	8400		6400
Конструкционная скорость, км/ч	120			160
Сила тяги при конструкционной скорости, кН	н.д.	236	247	300
Изготовитель	ООО «Уральские локомотивы» (Россия)			Siemens AG (Германия)



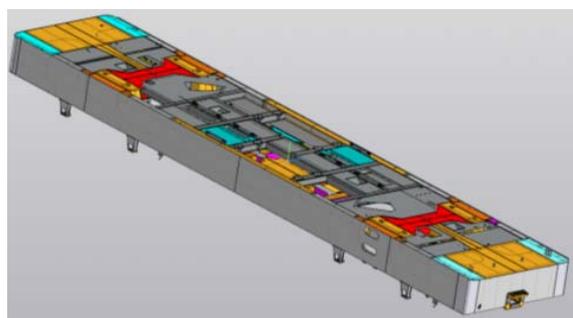
a



b



c



d

Рис. 1. Электровозы иностранного и отечественного производства: a – внешний вид односекционного электровоза Vectron (Германия); b – рама кузова электровоза Vectron; c – внешний вид двухсекционного электровоза 2ЭС7 (Россия); d – 3D-модель рамы кузова электровоза 2ЭС7

Fig. 1. Electric locomotives of foreign and domestic production: a - the appearance of a single-section electric locomotive Vectron (Germany); b - frame of the body of the electric locomotive Vectron; c - external view of the two-section electric locomotive 2ES7 (Russia); d - 3D model of the body frame of the electric locomotive 2ES7

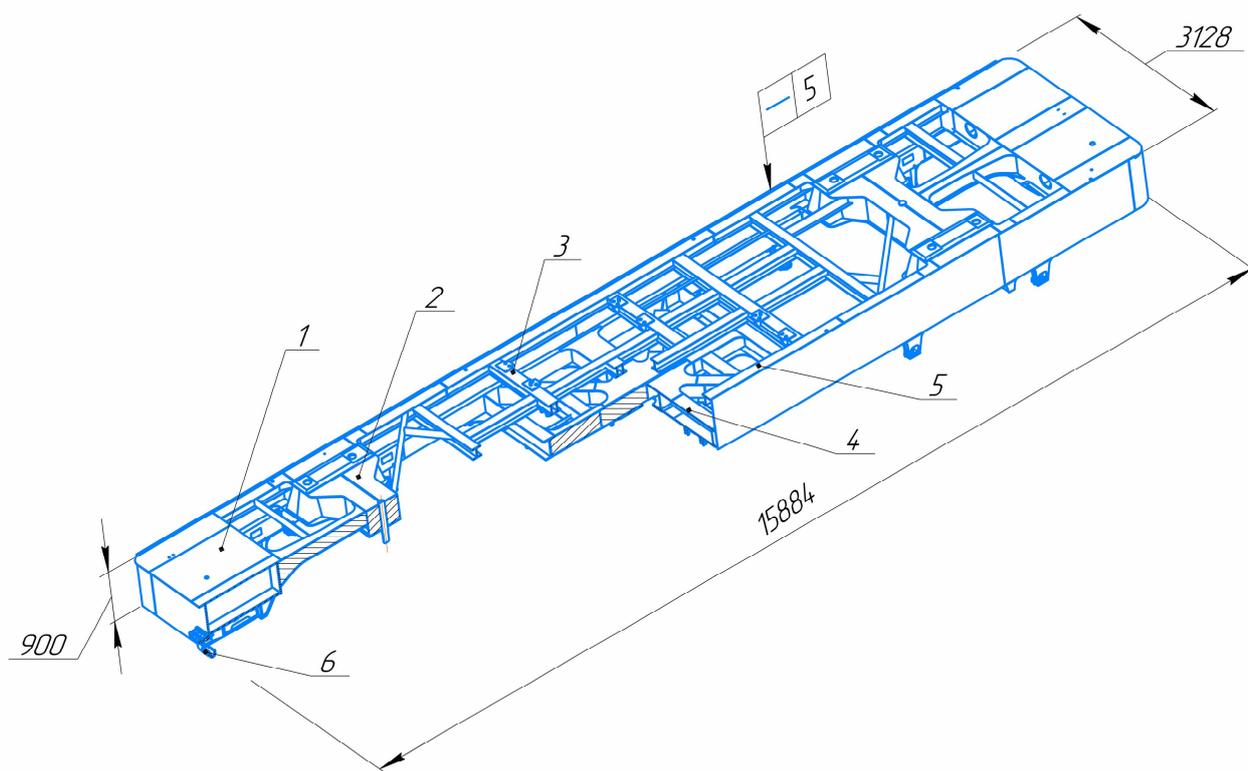


Рис. 2. Рама кузова электровозов 2ЭС10, 2ЭС6, 2ЭС7 (аксонометрическая проекция с вырезом $\frac{1}{4}$ части): 1 – буферные брусья; 2 – надтележечные брусья; 3 – кронштейн (рама); 4 – основание; 5 – продольные боковые балки, обшитые листом (боковины); 6 – ударные розетки автосцепных устройств

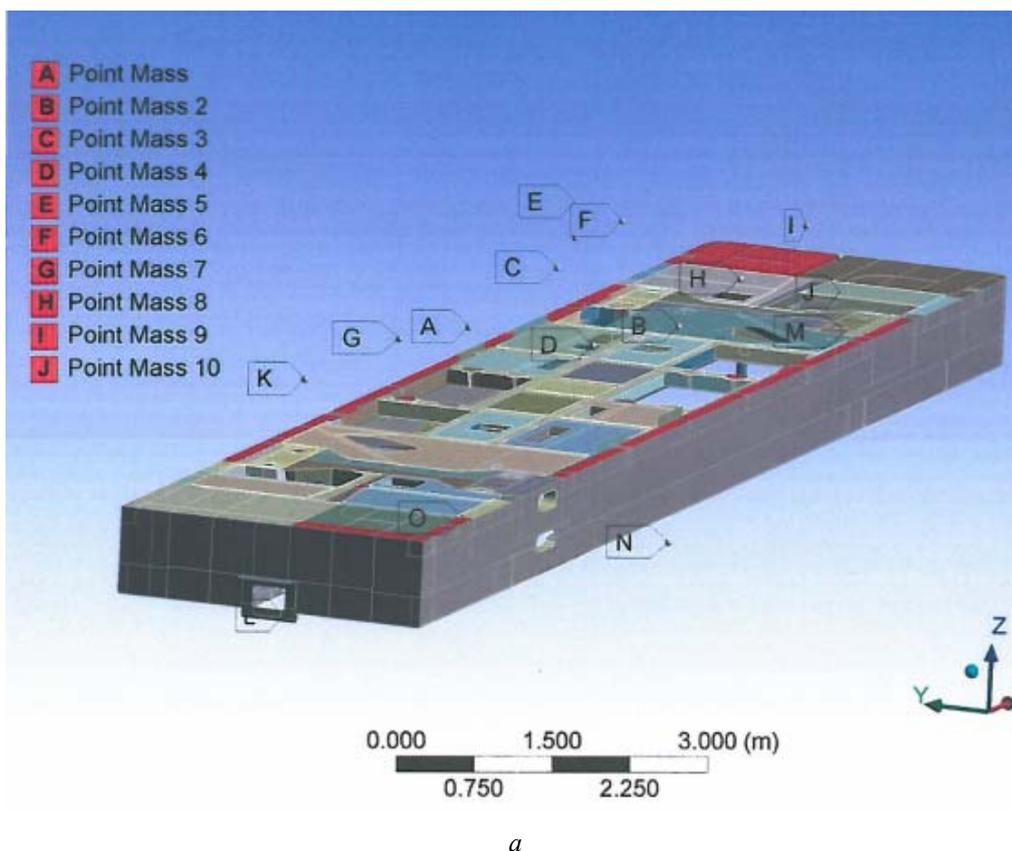
Fig. 2. Body frame of electric locomotives 2ES10, 2ES6, 2ES7(axonometric projection with $\frac{1}{4}$ cutout): 1 - buffer bars; 2 - overcarriage bars; 3 - bracket (frame); 4 - base; 5 - longitudinal side beams sheathed with a sheet (sidewalls); 6 - shock sockets for couplers

Расчеты с использованием подробных трехмерных конечно-элементных моделей, выполненные NX, показывают, что конструкция рамы кузова обладает достаточной прочностью под допускаемым напряжением материала (рис. 3). Расчеты рамы кузова выполнялись в соответствии с ГОСТ Р 55513–2013 и другой нормативной документацией, предполагающей нагружение продольными силами растяжения и сжатия по оси автосцепок 2,5 МН, а также силами, действующими на кузов при разгоне до конструкционной скорости 120 км/ч. При этом учитываются силы от тяжести от оборудования.

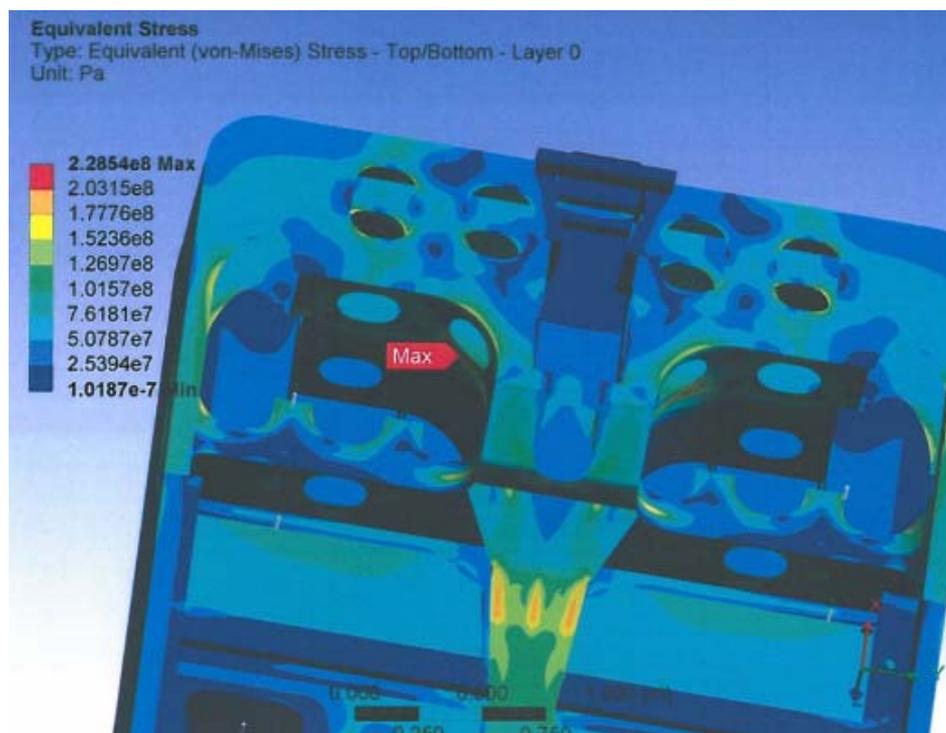
Тем не менее ясно, что при эксплуатации электровоза рама кузова испытывает значительные продольные повторно-статические и ударные нагрузки с относительно малым числом циклов нагружения. В результате длительной работы конструкции под действием знакопеременных циклических нагрузок происходит деградация прочностных свойств металла, снижа-

ется их сопротивление усталости, что может привести к разрушению элементов конструкции [1–3]. Поэтому при длительной работе возможны разрушения элементов конструкции рамы кузова. Так, согласно руководству по эксплуатации на электровозы при ТР-900 (текущий ремонт при пробеге электровоза при достижении 900 т-км) наиболее вероятные места появления трещин в элементах рамы кузова по результатам расчетов эквивалентных работах возможны в элементах буферного бруса и лучевых балок центральной опоры рамы кузова. Причины подобного поведения конструкции закладываются на этапе проектирования [4, 5] и обусловлены технологией изготовления рамы кузова.

Таким образом, целью статьи является исследование влияния существующей технологии изготовления сварных рам кузовов на формирование внутренних напряжений материала сборных элементов, в частности боковин, а также анализ существующих и перспективных подходов к устранению появления коробления.



a



b

Рис. 3. Результаты расчетов прочности рамы кузова в статической постановке:
a – конечно-элементная модель; b – карта эквивалентных напряжений

Fig. 3. The results of strength calculations of the body frame in a static formulation:
a - finite element model; b - map of equivalent stresses

Технология изготовления рамы кузова электровоза

Несущие элементы кузова изготавливаются из профилей низколегированной стали 09Г2С различной толщины и размеров. Например, жесткость рамы помимо основных элементов обеспечивают продольные, поперечные элементы высотой до 170 мм и настил толщиной 6 мм. Буферный брус сварен из листовой стали и усилен накладками. Балки для передачи силы тяги и торможения сварены из стальных листов толщиной 10...12 мм. Боковины рамы кузова сварены из полос 900×12 мм, швеллера высотой 300 мм с осью, расположенной приблизительно по оси автосцепки (рис. 4).

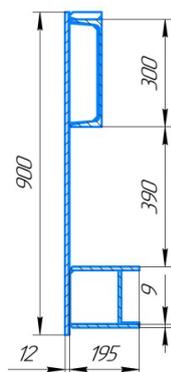


Рис. 4. Разрез боковины рамы кузова с обозначением основных геометрических размеров

Fig. 4. Section of the sidewall of the body frame with the designation of the main geometric dimensions

Технологическое обеспечение качества и надежности изделий производится поэтапно и базируется на инженерных методах реализации. Сборка рамы кузова электровозов в целом – сложный технологический процесс, требующий от рабочих соблюдения режимов сварки и технических требований чертежа. Сборка кузова осуществляется полуавтоматической сваркой в среде защитного газа Ar (82 %) + CO₂ (18 %) с применением современного оборудования. На сварочных полуавтоматах применяется сварочная стальная проволока 1,2 мм. Параметры сварки: ток до 300 А, скорость подачи проволоки 150...650 м/ч, расход защитного газа (аргона) 300...600 л/ч, напряжение 38...44 В, скорость сварки 12...20 м/ч.

Сборку рамы кузова электровозов 2ЭС6, 2ЭС10, 2ЭС7, выпускаемых УЛ, осуществляют следующим образом. Предварительно формируют основные сборочные единицы. Далее формируют из сборочных единиц на специальной плите, поверенной метрологами, каркас ра-

мы. Для этого в специальное сборочное приспособление поочередно устанавливают строго по осевой линии, выдерживая размеры чертежа, основание, далее согласно направляющих приспособления – нетележечные брусья и буферные брусья. Осуществляют прижим сборочных единиц. Укладывают на опоры приспособления между надтележечными и буферными брусьями изделия в виде листов, балок, ребер для усиления. Согласно чертежу сваркой прихватывают их к данным элементам согласно схеме наложения прихваточных швов длиной 40...60 мм. Далее устанавливают в приспособление боковины. Доводят их до упоров. Проверяют, что балки боковин входят внутрь балок основания. Согласно чертежу устанавливают кронштейны в сборе на каркас рамы и приваривают их к балкам. Прихватывают сварочными швами изделия в виде трубопроводов для подачи песка, ложементы и др. Освобождают каркас рамы от прижимов плитового приспособления. На каркас рамы устанавливают приспособление для поворота рамы в кантователе ОВН-20-01 и фиксируют. Производят финишную сварку каркаса рамы кузова, поворачивая раму в кантователе, для удобного положения наложения сварных швов. Далее освобождают каркас из кантователя и зачаливают на тумбы. Осуществляют правку каркаса рамы кузова. Производят проверку размеров и выполнение технических требований по прилагаемому чертежу. Очищают от брызг и окалины сварочные швы, срубают концы сварочной проволоки. Зашивают раму верхними листами. После этого раму окрашивают и передают на технический контроль.

Технология сборки рамы кузова электровозов 2ЭС6, 2ЭС10, 2ЭС7 является типовой для рамы кузова локомотивов (на примере патента РФ № 133485) в части сборки крупных сборочных единиц, прихватывая сварными швами предварительно, а затем окончательно используя различные виды приспособлений. Однако по уровню автоматизации и роботизации технологические процессы могут отличаться. Так, например, на Новочеркасском электровозостроительном заводе (НЭВЗ) для сварки боковин рам кузовов всех выпускаемых моделей электровозов используют автоматизированную линию ООО «Научно-производственная фирма «Техвагонмаш» (Украина). Это позволяет не только увеличить производительность, но и свести к минимуму деформации после сварки. Кроме того, в работах «Анализ применения шва в прорез для сварки буферного бруса рамы кузова электровоза» (Шевченко А. А., Павлов В. С.,

Ассауленко С. С.) и «Анализ и проектирование сборочной оснастки для роботизированного комплекса сварки буферного бруса рамы кузова электровоза» (Шевченко А. А., Павлов В. С., Грицына А. Н.) указывается, что на НЭВЗе поставлена задача по переходу на роботизированный комплекс сборки и сварки буферных брусьев с использованием адаптивных роботов. Результаты экспериментов автору работы не известны. В целом можно заключить, что производители не раскрывают подробную информацию по технологии изготовления рам кузовов современных моделей электровозов.

Благодаря работе инженерных и рабочих коллективов ряд основных вопросов, связанных с обеспечением высокого качества изготовления изделий, успешно решаются. Однако существуют проблемы, которые изучены еще недостаточно, хотя и являются весьма актуальными. Одной из них является проблема обеспечения точности формы сварной конструкции рамы кузова электровозов УЛ, а именно допуска по прямолинейности 5 мм (см. рис. 2) при длине рамы около 16000 мм. Практика показывает, что данное отклонение может составлять до 25...30 мм, т. е. причина в неравномерном нагреве изделий в процессе сварки, что приводит к неравномерному распределению температурных полей в материале изделия, что приводит к неравномерности распределения внутренних напряжений в материале. В итоге в готовых изделиях формируются поля остаточных напряжений, которые, в свою очередь, оказывают силовое воздействие на конструкцию, в той или иной степени меняют ее размеры и форму в соответствии с законами уравновешенности внутренних сил в замкнутых системах при сохранении условия минимума упругой потенциальной энергии. Деформации, возникшие при сварке, снижают прочность изделия вследствие изменения его расчетной схемы. При работе конструкции, имеющей деформацию отдельных элементов, могут возникнуть, например, не учтенные при расчете моменты, вследствие чего действительные напряжения превысят допустимые, или ресурс их работы будет снижен. Поэтому, как отмечается выше, при длительной эксплуатации электровозов могут возникать разрушения элементов рамы кузова.

Таким образом, при изготовлении рам кузовов должно уделяться большое внимание предотвращению или устранению не только сварочных деформаций, но и напряжений как таковых.

Оценка внутренних напряжений боковины рамы кузова

Проведен расчет внутренних напряжений боковины рамы при максимальных перемещениях до 25 мм. Боковина рамы кузова взята для анализа как наиболее критичный элемент правильности формы, к которой предъявляется требование допуска по прямолинейности 5 мм. Более того, чем больше прогиб, тем больше внутренние напряжения. Предварительно перед началом расчета модель боковины рамы кузова была упрощена, а именно убраны концентраторы напряжений. Расчет выполнялся в программе АРМ Structure 3D-версия 14.0.

Расчетная схема боковины рамы кузова представлена в виде балки, лежащей на двух опорах. Нагружение расчетной конечно-элементной модели происходило по швеллеру 300 мм (рис. 5) распределенной нагрузкой с различным усилием для достижения максимального прогиба боковины 25 мм. Предполагается, что свариваемые элементы несущей конструкции кузова соединены жестко. Все основные несущие балки представляются балочными элементами. Боковина рамы разбивалась на конечные элементы в виде 10-узловых тетраэдров. Размер конечных элементов принят равным 100 мм. Дополнительно проводился анализ на повторяемость результатов расчета при уменьшении сетки до 70 и 50 мм (сеточная сходимость). Результаты расчетов представлены в виде карт суммарных линейных перемещений (рис. 6) и эквивалентных напряжений по Мизесу (рис. 7).

Исследования расчетной модели занесены в таблицу 2, где показан уровень внутренних напряжений при максимальных и минимальных уровнях прогиба Δ , а по физической сути – прямолинейности.

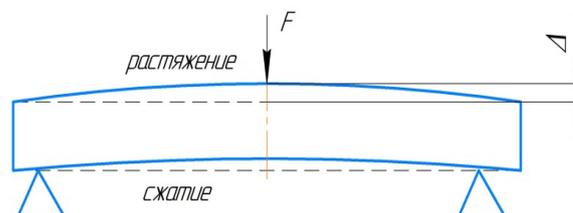


Рис. 5. Расчетная схема боковины рамы кузова: Δ – линейное перемещение; сплошной линия – исходное состояние $F = 100$ кН; штриховая линия – правильная форма ($F = 0$, $\Delta = 0$)

Fig. 5. Calculation scheme of the sidewall of the body frame: Δ - linear displacement; solid line - initial state $F = 100$ kN; dashed line - regular shape ($F = 0$, $\Delta = 0$)

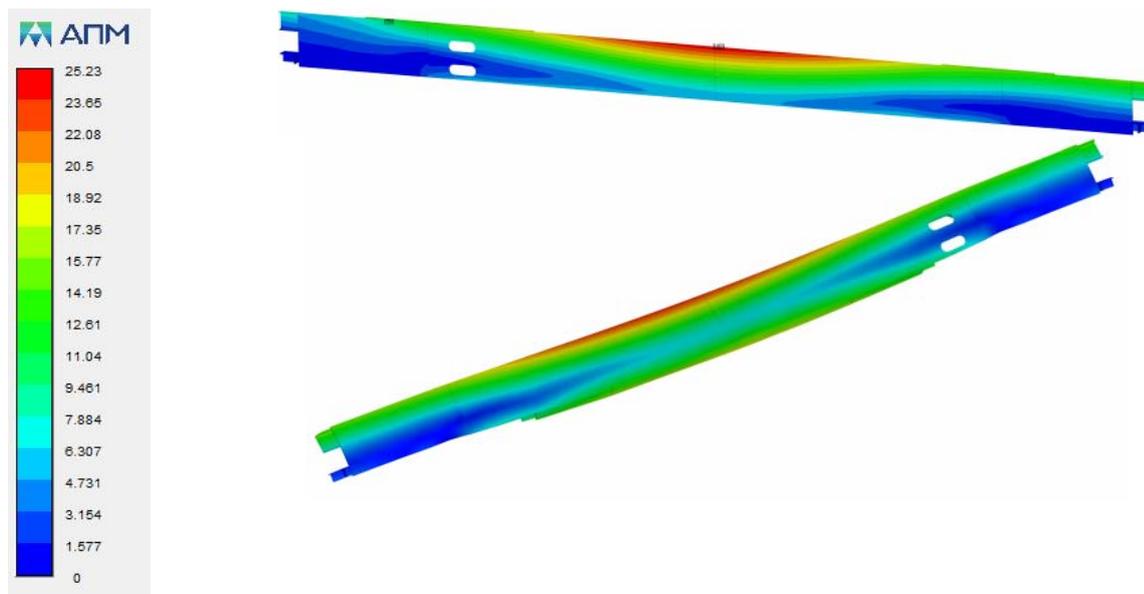


Рис. 6. Карта суммарных линейных перемещений Δ при нагружении усилием $F = 100$ кН

Fig. 6. Map of total linear displacements Δ under loading with force $F = 100$ kN

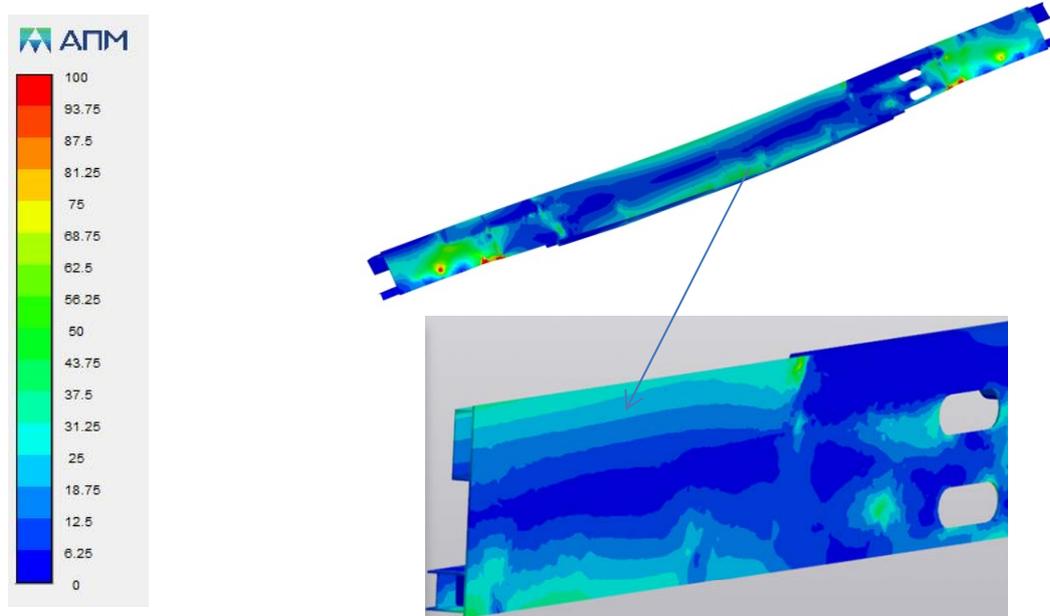


Рис. 7. Карта эквивалентных напряжений по Мизесу при нагружении усилием $F = 100$ кН

Fig. 7. Map of equivalent stresses according to Mises when loading with a force of $F = 100$ kN

Таблица 2. Данные зависимости напряжений в средней части боковины рамы

Table 2. Stress data in the middle part of the sidewall of the frame

Сила F , кН	Линейное перемещение Δ , мм	Максимальные внутренние напряжения σ , МПа
100	25	45
50	12	20
20	5	9
10	2,5	4,5

Результаты расчетов показывают, что максимальные внутренние напряжения при линейных перемещения элементов рамы до 25 мм возникают в средней части конструкции и составляют 45 МПа. Сравнения с допустимыми напряжениями ($\sigma_{-1} = 220$ МПа) для стали 09Г2С показывают, что внутренние напряжения меньше, однако их стоит учитывать при расчете на прочность новых типов рам электровозов, тем более в условиях ужесточения эксплуатационных характеристик новых видов электровозов, в том

числе прочностных характеристик при сохранении высокой жесткости конструкции.

Правка рам кузовов электровозов местным нагревом (существующая технология)

Для устранения коробления рам кузовов и придания правильной формы прямолинейности боковины путем снижения линейных параметров с 25 до 5 мм в технологии изготовления применяется заключительная операция правки местным нагревом. Правка местным нагревом широко распространена в производстве сварочных конструкций. Одним из основных преимуществ данных видов правки является ее универсальность и простота процесса, не требующего специального оборудования. Технология правки местным нагревом рамы кузова электровозов на предприятии ООО «Уральские локомотивы» выполняется в следующей последовательности:

1) изделие устанавливается на опоры (рис. 8, а);

2) замеряется деформация на изделии (прямолинейность боковины);

3) производится прихват 8–10 уголками длиной около 400 мм боковин и опор кузова;

4) выявляются деформации на конструкции (рис. 8, б);

5) на раму опускается статический груз весом около 5 т, создается упругая деформация растяжения-сжатия;

6) газовой горелкой производится нагрев нескольких мест по длине рамы до температуры 800...900 °С; нагрев осуществляется одновременно с наружной и внутренней стороны в 4–6 местах в зависимости от вида рамы электровоза (рис. 9, а, б).

7) вылеживание рамы (остывание элементов изделия);

8) контроль деформации; в случае удовлетворения результатами уголки подвергаются демонтажу, а места их установки зачищаются.

Общее время технологии правки местным нагревом 3...5 ч.



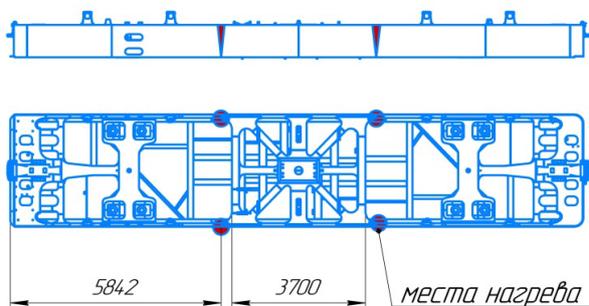
a



b

Рис. 8. Подготовительные операции для правки рамы кузова: а – опора для установки изделия; б – рама с приваренными уголками

Fig. 8. Preparatory operations for straightening the body frame: a - the support for installing the product; b - frame with welded corners



a



b

Рис. 9. Правка рамы местным нагревом: а – схема мест нагрева; б – боковина рамы с фиксацией места нагрева

Fig. 9. Editing the frame with local heating: a - scheme of places of heating; b - the sidewall of the frame with fixation of the place of heating

На производстве контроль качества правки осуществляется либо с помощью натянутой нити по всей длине рамы, либо нивелиром.

В целом проведенный анализ технологии правки местным нагревом сварных рам кузовов выявил ряд недостатков.

- Низкая производительность операции (время процесса правки около 5 ч), возможен обратный эффект при выполнении операции правки – обратный перегиб, поэтому необходимо присутствие на участке специалистов высокой квалификации.

- Нагрев участков металла производится до температуры выше 900 °С, что вызывает структурные изменения в материале и может сказаться на ухудшении качества элементов рамы при эксплуатационных нагрузках.

- Снятие напряжений в металле элементов не производится, а только их перераспределение по элементам конструкции, что может вызывать деградацию длительной прочности металла.

Анализ технических решений для управления напряженно-деформированным состоянием металла крупногабаритных изделий

Практика показывает, что существуют два принципиально разных подхода к управлению напряженно-деформированным состоянием металла изделий, изготовленных различным способом (литье, механообработка, сварка).

Первый способ – доработка существующей технологии сварки (сборки) рамы кузова. Так, при использовании этого направления необходим строгий контроль над режимами сварки и последовательностью наложения шва по его длине, управление скоростью нагрева и охлаждения металла и др. В работах известных ученых – В. А. Винокурова, М. В. Сагелевича, М. В. Шахматова, Ю. А. Маслова, Я. Д. Вишнякова и др. [8] – указано, что можно применять предварительный подогрев элементов перед сваркой, а также использовать специальные сборочные приспособления (клиновые, центровочные и др.) для исключения скрепления узлов и деталей прихватками с недопущением введения в расчетную схему дополнительных термических напряжений. Однако решение данных вопросов требует дополнительных больших трудозатрат и экспериментов с режимами, схемами сборки, что в итоге может и не дать нужного результата.

Второй способ – введение в технологию изготовления изделия операции правки. Известно множество примеров правки изделий [9], в том числе и маложестких [10–18], когда сохранение

точных параметров формы и размеров трудно достичь в течение длительного времени. В этой связи перспективными представляются малоэнергоёмкие способы на основе вибрационного старения, иначе – динамической вибрационной правки, которые позволяют обеспечить как снятие остаточных напряжений в материале по всей конструкции одновременно, так и добиться высокой размерной стабильности деталей и узлов машин. Их сущность – создание в металлоконструкции после окончательной сборки или в процессе изготовления переменных напряжений определенной величины с помощью специальных вибровозбудителей (вибраторов). Переменные напряжения суммируются с остаточными, при этом возникает явление вибропластичности. В результате в материале могут происходить сдвиги кристаллической решетки, которые сопровождаются перераспределением напряжений. Напряжения в пределах зерен и по границам уменьшаются. Считается, что процесс вибрационного старения является ускоренным естественным старением, когда металлические изделия испытывают воздействие слабого термического цикла и хаотических вибраций от случайных источников.

Так, согласно результатам проведенных испытаний (рис. 10) [19] низкочастотной вибрационной обработки сварных конструкций судов длиной до 30 м максимальное снижение остаточных напряжений доходило до 60 %. Отмечено также, что при виброобработке на 2-3 резонансных частотах снижение остаточных напряжений более равномерное, чем при одной частоте обработки. При этом ясно, что для более эффективного снижения снятия напряжений в длинномерных конструкциях виброобработку необходимо осуществлять в нескольких точках конструкции по ее длине соответственно.

Известны и другие подобного рода способы правки металлоконструкций (патент на изобретение РФ № 2612463; А.с. 1538949 СССР), когда определяется начальный прогиб (Δl) изделия (рис. 11, *a-c*).

Далее производят изгиб в направлении, противоположном начальному прогибу, путем прижима образца к плоскости с наложением дополнительной нагрузкой или без таковой на величину начального прогиба или высчитывают данный прогиб по зависимости, например, формуле (1), и подвергают изделие вибрации с резонансной частотой. Далее подвергают изделие вибрационным нагрузкам. Затем повторно измеряют уже остаточный прогиб.

$$f(P_1) = \frac{2f_n f_{ост} - f_{ост}^2}{f_n}, \quad (1)$$

где f_n – начальный прогиб изделия; $f_{ост}$ – остаточный прогиб изделия.

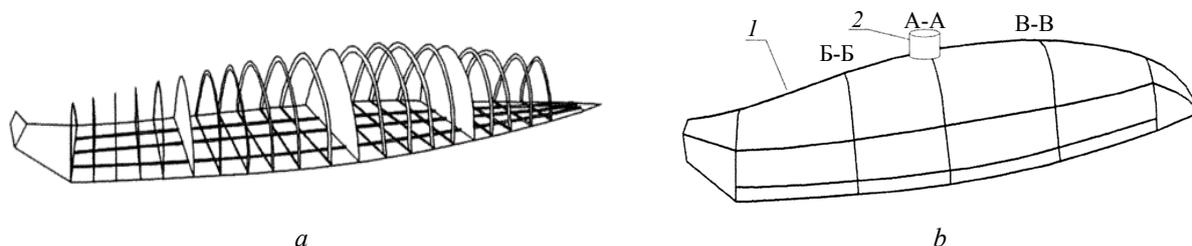


Рис. 10. Снятие напряжений по способу вибростабилизации: 1 – корпус судна; 2 – вибровозбудитель
 Fig. 10. Stress relief by vibration stabilization method: 1 - shiphull; 2 - vibration exciter

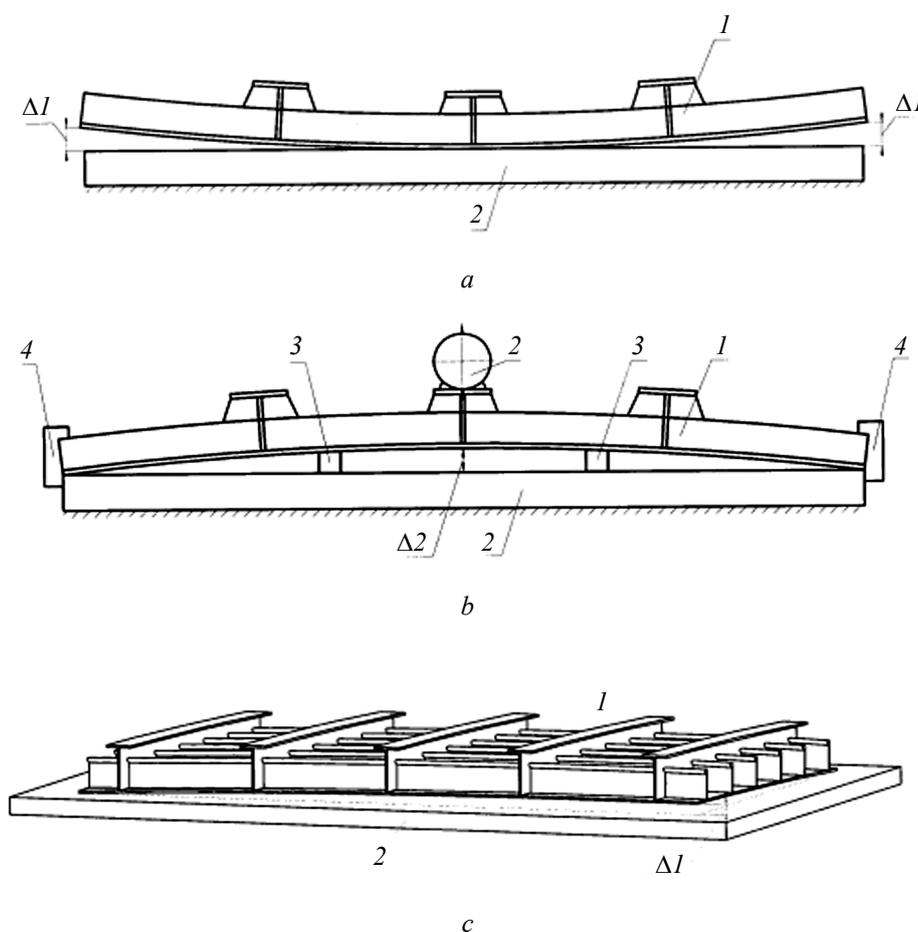


Рис. 11. Способ виброправки сварных рам (патент № 2612463): 1 – металлоконструкция; 2 – стенд (плита); 3 – опоры; 4 – крепления; 5 – вибратор; а – исходное состояние рамы, где Δl – начальный прогиб; б – обратный прогиб рамы на величину Δl; с – правильная форма рамы (Δl ≈ 0 мм)

Fig. 11 Method of vibration adjustment of welded frames (patent No. 2612463): 1 - metal structure; 2 - stand (plate); 3 - supports; 4 - fastenings; 5 - vibrator; а - the initial state of the frame, where Δl is the initial deflection; б - the reverse deflection of the frame by Δl; с - correct frame shape (Δl ≈ 0 mm)

Следует также отметить, что в Новоуральском технологическом институте НИЯУ «МИФИ» продолжительное время ведутся работы по созданию технологий динамической правки маложестких деталей, которая при оп-

ределенной доработке может быть адаптирована для устранения сварочных деформаций в сварных рамах кузовов локомотивов. С работами сотрудников института можно ознакомиться в журналах «Вестник ИжГТУ имени

М. Т. Калашникова», «Вестник ЮрГУ», серия «Машиностроение» и др.

Вибрационная правка рам кузовов локомотивов (предлагаемая технология)

Анализ технических решений показывает, что существует потенциал и возможности для замены операции правки сварных рам кузовов местным нагревом. Цели замены технологии:

1. Повышение качества сварных рам кузов за счет устранения не только сварочных деформаций, но и понижения уровня напряжений на 60...70 % от первоначального. Данный факт приведет к увеличению длительной прочности элементов рамы кузова и скажется на надежности – уменьшение поломок и появление трещин.

2. Снижение трудозатрат на операцию за счет механизации процесса и регламентирования режимов правки. Время процесса правки уменьшится с 3...5 ч до не более чем 30 мин. Стоимость операции правки можно уменьшить минимум на 20 %, что скажется на стоимости электровоза в целом.

3. Повышение технического уровня производства, а значит, конкурентоспособности предприятия.

Суть технологии вибрационной правки сварной рамы кузова заключается в том, что предварительно измеряют геометрические отклонения изделия от допускаемых значений прямолинейности, устанавливают изделие на опоры или подвешивают на тросах (рис. 12) для создания обратного прогиба (заневоливания) для достижения напряжений изделия выше предела упругости.

Далее подвергают механическим колебаниям изделие с частотой нагружения от 0,5 до 1,5 собственной частоты колебаний рамы. Причем виброобработку можно вести на первых двух-трех резонансных частотах. Время наложения колебаний подбирается экспериментально из расчета $t_n = N/\omega$, где N – число циклов нагружения, соответствующее стадии циклической микротекучести ($N \leq 10^5$), ω – частота вынужденных колебаний.

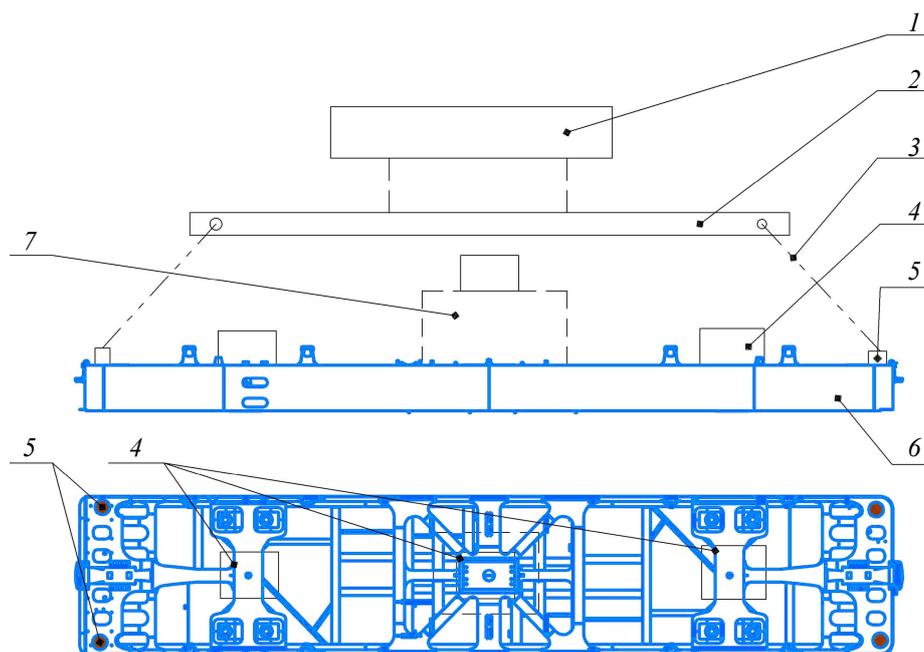


Рис. 12. Схема вибрационной правки изделий в производственных условиях: 1 – кран; 2 – траверса; 3 – трос; 4 – вибратор (места предполагаемой установки); 5 – крепежные элементы; 6 – рама кузова; 7 – статический груз

Fig. 12. Scheme of vibration straightening of products in production conditions: 1 - crane; 2 - traverse; 3 - cable; 4 - vibrator (places of the intended installation); 5 - fasteners; 6 - body frame; 7 - static load

Высота подвеса рамы может составлять 300...500 мм над уровнем пола. Уменьшение прямолинейности боковины кузова может осуществляться собственным весом рамы при ее заневоливании. Траверса (позиция 2 на рис. 12) может быть линейного или Н-образ-

ного исполнения, которые выпускаются серийно заводами-изготовителями грузоподъемностью до 32 т.

Структурная схема процесса виброправки рам кузовов может быть представлена в следующем виде (рис. 13).

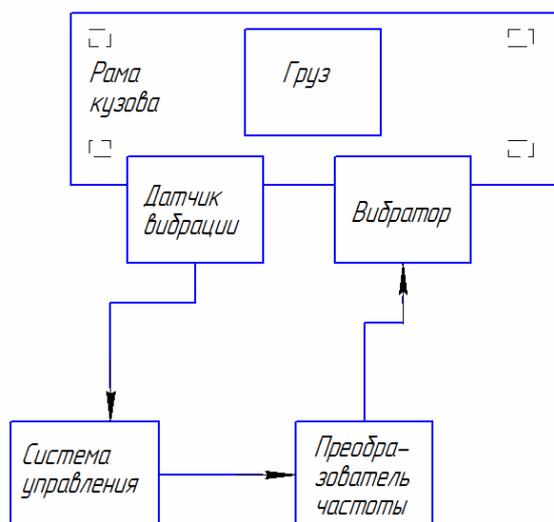


Рис. 13. Структурная схема процесса виброправки

Fig. 13. Structural diagram of the vibratory straightening process

Вибрирование сварной конструкции осуществляется, как правило, на частотах до 200 Гц в течение 20...30 мин в зависимости от массы и пространственной конфигурации конструкции. Перед обработкой оператор закрепляет с помощью струбцин вибратор на рамы, а также датчик вибрации. Далее производится запуск вибраторов. В это время в систему управления поступает информация с датчика вибрации о циклических колебаниях конструкции. Затем происходит обработка информации и определение ряда резонансных частот конструкции. В зависимости от массы конструкции, частоты нагружения, а также произведенного замера отклонения от прямолинейности система определяет оптимальные режимы правки. Информация о режимах предоставляется оператору (время, частота и др.). Оператор производит выставление необходимых параметров процесса и осуществляет их мониторинг. После правки оператору следует осуществить замеры отклонений от прямолинейности боковин каркаса рамы кузова.

Система управления может быть представлена на этапе отработки технологии правки многозадачной измерительной станцией PXI Platform компании NI (США). PXI – это модульная платформа, предназначенная для создания многофункциональных и высокопроизводительных контрольно-измерительных систем. В основе PXI-платформы лежат стандартные компьютерные технологии: шина PCI/PCI Express, процессор и периферийные устройства. Архитектурно PXI состоит из шасси, в которое

устанавливаются модульные приборы, контроллеры или интерфейсы для удаленного управления платформой. Приложения для платформы PXI могут создаваться в различных средах разработки, таких как LabVIEW, с графическим языком программирования, что позволяет создавать виртуальные приборы практически под любые инженерные задачи. Подобного рода система PXIplatform с LabVIEW представлена в работах [20–22] для осуществление управления режимами правки изделий.

Выводы

1 Минимизация сварочных деформаций, а также обеспечение размерной стабильности при изготовлении рам кузовов является важной задачей, актуальность решения которой возрастает по мере ужесточения требований к эксплуатационным характеристикам локомотивов, а значит, и конструкторско-технологических требований к сварным рамам кузовов. Опыт изготовления изделий на предприятии УЛ показывает, что отклонение от прямолинейности боковин рам кузовов электровозов серии 2ЭС6, 2ЭС10, 2ЭС7 может достигать до 25 мм при допуске 5 мм.

2. Результаты расчетов внутренних напряжений при линейных перемещениях 25 мм боковин показал, что максимальные значения напряжений могут достигать до 45 МПа. Данные напряжения меньше допустимых, но их следует учитывать в расчетных схемах и при длительной эксплуатации изделий, когда остаточные напряжения в материале суммируются с напряжениями от внешней нагрузки, что может привести к разрушению элементов рам кузовов раньше срока.

3. На производстве электровозов, технология изготовления рам кузовов электровозов УЛ включает в себя операцию правки местным нагревом, которая имеет ряд недостатков. В то же время анализ технических решений и опыт автора в области правки показывает, что имеются широкие возможности для проведения вибрационной обработки (правки).

4. Эффективность вибрационной обработки в значительной степени зависит от выбранных параметров режима – частоты, амплитуды, длительности воздействия колебаний, а также оптимальной схемы виброобработки рамы. Для минимизации усилий статического изгиба необходимо осуществлять подвешивание рамы в зафиксированном состоянии и осуществлять перемещение вибраторов (-а) по длине рамы, разделив ее примерно на 3 равные части. Виброправку рамы кузова массой 15...17 т для снижения

энергоёмкости процесса необходимо осуществлять на околорезонансных частотах $0,5 \dots 1,5$ от собственной частоты. Для отработки технологии правки допустимо использование оборудования PXI Platform с приложением LabVIEW.

5. Стоимость операции правки можно уменьшить минимум на 20 % за счет механизации и сокращения трудозатрат (времени на операцию), что скажется на стоимости электровоза в целом.

Библиографические ссылки

1. Щербицкая Т. В., Калиева С. Т., Иванов В. В. Оценка надежности подвижного состава железнодорожного транспорта // Наука и образование транспорту. 2019. № 1. С. 119–120.

2. Безопасная эксплуатация локомотивов по ресурсу их базовых частей / Э. С. Оганьян, Г. М. Волохов, А. С. Гасюк, Д. М. Фазлиахметов, Е. В. Муравлев // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 6. С. 54–58. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-6-54-58.

3. Оганьян Э. С., Волохов Г. М., Гасюк А. С. Прогнозирование ресурса несущих конструкций локомотивов по условиям эксплуатации // Известия Транссиба. 2019. № 2 (38). С. 47–54.

4. Гучинский Р. В. Оптимизация конструкции кузова вагона электропоезда по значению частоты собственных колебаний // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80, № 3. С. 152–159. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-3-152-159>.

5. Гучинский Р. В., Петин С. В. Предварительный расчет частоты собственных изгибных колебаний кузовов вагонов электропоездов // Вестник института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2019. № 2 (46). С. 50–57.

6. Сотников Д. Н., Котловцева Е. Ю., Корнеев П. С. Основные приспособления и оборудование для автоматизированной сборки – сварки баков // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 12-1 (90). С. 96–103. DOI: 10.23670/IRJ.2019.90.12.020.

7. Теоретико-практический базис правки деформированных вагоноконструкций термическим влиянием / А. В. Фомин, А. А. Логвиненко, А. В. Бурлуцкий, А. Н. Фомина // Наука и прогресс транспорту. 2018. № 6 (78). С. 155–164. DOI: 10.15802/stp2018/154830.

8. Киселев Е. С., Благовский О. В. Управление формированием остаточных напряжений при изготовлении ответственных деталей : монография. Санкт-Петербург : Лань, 2020. 140 с. ISBN 978-5-8114-2740-6.

9. Стрельников И. В., Пономарев К. Е. К вопросу применения вибрационной обработки сварных конструкций космических аппаратов для повышения точности и размерной стабильности. Обзор // Вестник НПО имени С. А. Лавочкина. 2017. № 4 (38). С. 89–95.

10. Лебедев В. А., Белозеров М. А. Применение вибрационной стабилизирующей обработки для повышения качества деталей летательных аппаратов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2020. Т. 7, № 3-4. С. 39–43.

11. Набиуллин У. М. Вибрационная обработка сварных конструкций // Наука и образование: проблемы и стратегии развития. 2019. № 1 (5). С. 90–93.

12. Wang Y., Kramer M. S. Stress relief of mechanically roughened cylinder bores for reduced cracking tendency. Pat. No. US 9863030 B2. 2018.

13. Antonyuk V. E. Dynamic stabilization in the production of low-rigid parts. Minsk, Belarusian science Publ., 2017, 191 p. ISBN 978-985-08-2174-4

14. Jaroszewicz J., Lukaszewicz K., Antonyuk V. Design of vibrostabilisation stand for reducing residual stresses in disk used in the construction of multi-plate clutches and brakes. *Acta mecanica et automatica*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 37-44.

15. Бобровский А. В., Драчев О. И. Новая технология осевой горячей правки валов растяжением // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2019. № 9 (232). С. 11–15.

16. Зайдес С. А., Лэ Х. К. Оценка качества правки цилиндрических деталей поперечной обкаткой гладкими плитами // Вестник машиностроения. 2020. № 6. С. 72–76. DOI: 10.36652/0042-4633-2020-6-72-76.

17. Патент на изобретение РФ № 2610195. Способ стабилизации формы и размеров корпусов судов, построенных каркасным методом / А. А. Васильев, В. М. Левшаков, В. С. Михайлов. 2017.

18. Zhao X., Zhang N., Wang A. Modeling and Simulation Technology of High Frequency Vibratory Stress Relief Treatment for Complex Thin - Walled Workpiece. MATEC Web of Conferences – ICCEMS, 2018, vol. 206, pp. 1-6.

19. Korolev A. V., Balaev A. F., Korolev A. A. Experimental Study of the Effectiveness of the Vibromechanical Stabilization of Bearing Rings. *Solid State Phenomena*, 2018, vol. 284, pp. 1327-1331.

20. Zhao X., Zhang N., Wang A. Modeling and Simulation Technology of High Frequency Vibratory Stress Relief Treatment for Complex Thin - Walled Workpiece. MATEC Web of Conferences, 2018, vol. 206, p. 04001. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201820604001>.

References

1. Shcherbitskaya T.V., Kalieva S.T., Ivanov V.V. [Reliability assessment of railway rolling stock]. *Nauka i obrazovanie transportu*, 2019, no. 1, pp. 119-120 (in Russ.).

2. Oganyan E.S., Volokhov G.M., Gasyuk A.S., Fazliakhmetov D.M., Muravlev E.V. [Safe operation of locomotives according to the resource of their base parts]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2017, no. 6, pp. 54-58 (in Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2017-6-54-58.

3. Oganyan E.S., Volokhov G.M., Gasyuk A.S. [Prediction of the resource of supporting structures of loco-

motives according to operating conditions]. *Izvestiya Transsiba*, 2019, no. 2 (38), pp. 47-54 (in Russ.).

4. Guchinsky R.V. [Optimization of the body structure of an electric train car by the value of the frequency of natural vibrations]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT)*, 2021, vol. 80, no. 3, pp. 152-159 (in Russ.). DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-3-152-159>.

5. Guchinsky R.V., Petinov S.V. [Preliminary calculation of the frequency of natural bending vibrations of electric train car bodies]. *Vestnik instituta problem estestvennykh monopolii: Tekhnika zheleznykh dorog*, 2019, no. 2, pp. 50-57 (in Russ.).

6. Sotnikov D.N., Kotlovtseva E.Yu., Korneev P.S. [Basic fixtures and equipment for automated assembly - tank welding]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2019, no. 12-1, pp. 96-103 (in Russ.). DOI: 10.23670/IRJ.2019.90.12.020.

7. Fomin A.V., Logvinenko A.A., Burlutsky A.V., Fomina A.N. [Theoretical and practical basis for straightening deformed car structures by thermal influence]. *Nauka i progress transportu*, 2018, no. 6, pp. 155-164. DOI: 10.15802/stp2018/154830.

8. Kiselev E.S., Blagovskiy O.V. *Upravlenie formirovaniem ostatochnykh napryazhenii pri izgotovlenii otvetstvennykh detalei* [Control of the formation of residual stresses in the manufacture of critical parts]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2020, 140 p. ISBN 978-5-8114-2740-6.

9. Strelnikov I.V., Ponomarev K.E. [On the use of vibration treatment of spacecraft welded structures to improve accuracy and dimensional stability]. *Vestnik NPO imeni S. A. Lavochkina*, 2017, no. 4, pp. 89-95 (in Russ.).

10. Lebedev V.A., Belozarov M.A. [Application of vibration stabilizing treatment to improve the quality of aircraft parts]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii*, 2020, vol. 7, no. 3-4, pp. 39-43 (in Russ.).

11. Nabiullin U.M. [Vibration treatment of welded structures]. *Nauka i obrazovanie: problemy i strategii razvitiya*, 2019, no. 1, pp. 90-93 (in Russ.).

12. Wang Y., Kramer M. S. Stress relief of mechanically roughened cylinder bores for reduced cracking tendency. Pat. No. US 9863030 B2. 2018.

13. Antonyuk V. E. Dynamic stabilization in the production of low-rigid parts. Minsk, Belarusian science Publ., 2017, 191 p. ISBN 978-985-08-2174-4.

14. Jaroszewicz J., Lukaszewicz K., Antonyuk V. Design of vibrostabilisation stand for reducing residual-stresses in disk used in the construction of multi-plate clutches and brakes. *Acta mecanika et automatica*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 37-44.

15. Bobrovsky A.V., Drachev O.I. [New technology of axial hot straightening of shafts by tension]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019, no. 9, pp. 11-15 (in Russ.).

16. Zaides S.A., Le H.K. [Evaluation of the quality of straightening of cylindrical parts by transverse rolling with smooth plates]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2020, no. 6, pp. 72-76 (in Russ.). DOI: 10.36652/0042-4633-2020-6-72-76.

17. Vasiliev A.A., Levshakov V.M., Mikhailov V.S. [A method for stabilizing the shape and dimensions of ship hulls built by the frame method]. Patent for the invention of the Russian Federation No. 2610195. 2017 (in Russ.).

18. Zhao X., Zhang N., Wang A. Modeling and Simulation Technology of High Frequency Vibratory Stress Relief Treatment for Complex Thin - Walled Workpiece. MATEC Web of Conferences - ICCEMS, 2018, vol. 206, pp. 1-6.

19. Korolev A.V., Balaev A.F., Korolev A.A. Experimental Study of the Effectiveness of the Vibromechanical Stabilization of Bearing Rings. *Solid State Phenomena*, 2018, vol. 284, pp. 1327-1331.

20. Zhao X., Zhang N., Wang A. Modeling and Simulation Technology of High Frequency Vibratory Stress Relief Treatment for Complex Thin -Walled Workpiece. MATEC Web of Conferences, 2018, vol. 206, p. 04001. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201820604001>.

Improving the Quality of Manufacturing of Locomotive Body Frames

B.A. Gupalov, PhD in Engineering, Novouralsk Institute of Technology, branch of the National Research Nuclear University MEPhI, Novouralsk, Russia

The paper describes the process of manufacturing the frame of locomotive bodies, which is a complex step-by-step process of assembling (welding) elements. It has been established that internal stresses cause welding deformations, while the deviation from the straightness of the sidewalls of the electric locomotives body frames of 2ES6, 2ES10, 2ES7 series (manufactured by Ural Locomotives LLC) can reach up to 25 mm with a tolerance of 5 mm. The results of internal stress analysis for linear displacements of 25 mm sidewalls showed that the maximum stress values can reach up to 45 MPa. To improve the accuracy of parameters, the operation of straightening by local heating is introduced into the body frame manufacturing technology.

The paper describes the main characteristics of the existing straightening technology in production, shows the main disadvantages. Studies of technical solutions for straightening methods have been carried out. The results show that there are ample opportunities to replace thermal straightening with mechanized vibrational processing, which reduces residual stresses in the product material. The efficiency of vibration treatment largely depends on the selected mode parameters: frequency, amplitude, duration of vibration exposure, as well as the optimal frame vibration treatment scheme.

The paper proposes an original scheme for straightening the body frame of electric locomotives in production environment. It is indicated that in order to minimize the forces of static bending, it is necessary to suspend the frame under constraints and move the vibrator(-s) along the length of the frame, dividing it into approximately 3 equal parts. To work out the straightening technology, it is proposed to use PXI Platform equipment with the LabVIEW application. The cost of the straightening operation can be reduced by at least 20%, which will affect the cost of the electric locomotive as a whole.

Keywords: electric locomotive body frame, internal stresses, accuracy parameters, straightening by local heating, vibration straightening, welded structure.

Получено 08.02.2022

Образец цитирования

Гупалов Б. А. Повышение качества изготовления рам кузовов локомотивов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 1. С. 62–76. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-1-62-76.

For Citation

Gupalov B.A. [Improving the Quality of Manufacturing of Locomotive Body Frames]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2022, vol. 25, no. 1, pp. 62-76 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-1-62-76.