

# Влияние конструктивных решений на формирование кривой усталости боковых рам тележек грузовых вагонов

А. В. СУХОВ, В. А. РЕЙХАРТ, Т. Е. КОНЬКОВА

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

**Аннотация.** Сопротивление усталости — основной параметр качества литых деталей тележек грузовых вагонов. Показатель степени  $m$  кривых усталости используют в расчетах как для определения коэффициента запаса сопротивления усталости, так и для оценки надежности вагонных конструкций. В некоторых случаях величина этого показателя значительно превышает среднестатистический уровень для большинства испытанных партий боковых рам. Анализ характера разрушения и поверхностей изломов боковых рам позволил установить причины, обусловившие высокие значения  $m$ : нестабильность технологии изготовления, а также усиления отдельных зон деталей. Получение показателя  $|m| > 10$  может служить основанием для отрицательного заключения по результатам полных усталостных испытаний боковых рам.

**Ключевые слова:** боковые рамы; кривые усталости; экспериментальные результаты; зоны разрушения; литейные дефекты; усталостные трещины

**Введение.** Прочность литых деталей тележек грузовых вагонов оценивают, во-первых, путем проведения ходовых испытаний с определением запаса прочности [1, 2], во-вторых, на основании результатов усталостных испытаний на стендах [3, 4]. В первом случае необходимо измерять напряжения, что не всегда возможно, особенно в такой сложной конструкции, как боковая рама. Для боковых рам характерно наличие большого количества труднодоступных мест для установки тензодатчиков, а также зон с повышенной концентрацией напряжений (литейные дефекты, ребра различного назначения, острые кромки, разностенность и т. п.). При этом образование усталостных трещин и изломы по ним деталей могут происходить во многих «слабых» звеньях. Поэтому оценку прочности литых деталей дополняют их усталостными испытаниями на стендах [5]. Это позволяет, во-первых, оперативно оценивать, к примеру, эффективность внесения конструктивных изменений, во-вторых, проводить анализ поверхности изломов с идентификацией литейных дефектов и разработкой рекомендаций по их устранению [6].

При проведении полных усталостных испытаний определяют зависимости между прикладываемой нагрузкой и числом циклов до разрушения с

построением кривых усталости, рассчитывают параметры кривых усталости и условные пределы выносливости, а также коэффициенты запаса сопротивления усталости [7].

Для оценки достоверности полученных результатов используют параметры кривых усталости:  $m$  — показатель степени уравнения кривой усталости,  $\rho$  — коэффициент линейной корреляции экспериментальных данных.

Показатель  $m$  определяет угол наклона кривой усталости. С увеличением  $|m|$ , т. е. со снижением эффективного коэффициента концентрации напряжений, увеличивается  $n$ , что можно трактовать как повышение качества литья. Как показала практика испытаний, показатель  $|m|$  находится в широком диапазоне значений. При этом величина  $|m|$  в различной степени зависит от конструкции, технологии и качества изготовления деталей, а также от уровня механических свойств стали [8].

**Постановка задачи.** Для определения влияния технологических и конструкционных факторов на формирование кривых усталости и величину показателя  $m$  проведен анализ результатов полных усталостных испытаний боковых рам.

В представленном материале рассмотрены результаты полных усталостных испытаний боковых рам, изготовленных по различным технологиям. В отдельных случаях показатель  $m$  кривых усталости значительно превышает уровень  $m$  всего объема испытаний, достигая  $|m| = 25$ . Анализ характера разрушения и поверхностей изломов боковых рам позволил установить причины, обусловившие высокие значения  $|m|$ . Для иллюстрации изменяющейся вертикальности ( $|m| = 14 - 17 - 25$ ) на графиках (см. далее рис. 2, 5, 8) приведена сравнительная кривая усталости (3) при вероятности неразрушения 0,95 партии деталей с параметрами:  $(P_a)_{0,95} = 19,8$  тс;  $n = 2,1$ ;  $\rho = -0,85$ ;  $|m| = 7$ .

Статистической обработке были подвергнуты результаты испытаний 30 партий боковых рам (по 9 штук в каждой), изготовленных в 2004–2013 гг. Боковые рамы имели различные, в том числе и усиленные, конструкции, предназначенные для эксплуатации в

Таблица 1

Распределение величин разностенности вертикальных стенок боковых рам

Table 1

Distribution of values of variation in wall thickness of the vertical walls of the side frames

| Интервал разностенности, мм | 0–3,0 | 3,1–6,0 | 6,1–9,0 | 9,1–12,0 | 12,1–15,0 |
|-----------------------------|-------|---------|---------|----------|-----------|
| Доля рам в интервале, %     | 61    | 24      | 5       | 5        | 5         |

тележках с максимальными расчетными статическими нагрузками от колесной пары на рельсы 23,5 и 25 тс (модели 18-100 и ее аналоги, 18-578, 18-9810, 26. В503, 18-9836, 18-9855).

Схема нагружения боковых рам соответствовала методике «Надрессорные балки и боковые рамы литые двухосных тележек грузовых вагонов колеи 1520 мм. Методики испытаний на усталость» (ОАО «ВНИИЖТ» — ОАО «НИИ вагоностроения» 2010 г. 14 с.). Амплитуду динамической нагрузки назначали для каждой боковой рамы отдельно в соответствии с рекомендациями методики. Нагрузки равномерно распределяли в интервале от минимального (базовое значение) до максимального значений.

**Анализ зон разрушения боковых рам.** Визуальный осмотр более 230 разрушившихся при испытаниях боковых рам позволил определить основные места разрушений, а также дефекты в очагах зарождения первичных усталостных трещин. Статистический анализ зон разрушения испытанных деталей показал, что 46,6% всех испытанных деталей разрушилось по углу рессорного проема, 27,6% — по середине рессорного проема, 14,2% — по внутреннему углу буксового проема, 11,6% — по наклонному поясу.

Как видно из приведенных данных, наибольшее количество деталей (более 70%) разрушилось в зонах повышенного риска отказов — по внутреннему углу буксового проема, по наклонному поясу и по углу рессорного проема (зоны А и Б по ОСТ 32.183 — 2001 «Тележки двухосные грузовые вагонов колеи 1520 мм. Детали литые. Рама боковая и балка надрессорная. Технические условия»).

Установлено, что более чем в 75% случаев усталостные трещины зарождались на дефектах литейного происхождения. Очагами зарождения усталостных трещин являлись дефекты, связанные как с нарушением технологии изготовления (дефекты поверхности, засор, спай, газовые раковины, поры, свищи), так и с присущими каждой конкретной технологии недостатками (усадочные и газоусадочные раковины, пористость, рыхлоты, горячие трещины, непровар холодильников). Получено следующее распределение дефектов в очагах зарождения усталостных трещин: засор — 18,3%, усадочные дефекты (раковины, рыхлоты, пористость) — 16,3%, дефекты газового происхождения (раковины, поры, свищи) — 15,3%, дефекты поверхности — 11,4%, горячие трещины — 6,9%,

газоусадочные дефекты — 4%, непровар холодильников — 3,5%, спай — 1%. В большинстве случаев эти дефекты являлись поверхностными или имели выход на поверхность детали. В 23,3% случаев изломов боковых рам видимых дефектов в зонах разрушения не зафиксировано. Дальнейшее изучение зон разрушения этих боковых рам позволило установить фактор, способствующий зарождению усталостных трещин при отсутствии видимых литейных дефектов, — разностенность вертикальных стенок. Разностенность создает условия для локализации напряжений — возникновения в определенной зоне (сечении) их пиковых значений.

Конструкторская документация (КД) устанавливает допускаемую при изготовлении величину разностенности стенок литой детали согласно классу размерной точности. Анализ толщин вертикальных стенок в зонах разрушения боковых рам показал наличие значительного разброса величины разностенности (табл. 1).

Из данных табл. 1 видно, что в 61% случаев разностенность вертикальных стенок составляет не более 3,0 мм, что соответствует величинам, допускаемым ГОСТ Р 53464 — 2009 «Отливки металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку» для 11 класса размерной точности. Однако в 24% случаев разностенность вертикальных стенок составила от 3,1 до 6,0 мм. Нижняя граница интервала является допускаемой ГОСТ Р 53464 — 2009 величиной, а верхняя — указывает на возможные нарушения технологии изготовления деталей (смещение, деформация, перекося или всплытие стержня). Также следует отметить, что в 15% случаев разностенность вертикальных стенок превышает 6,0 мм, что значительно, почти в 2 раза, больше допускаемой КД.

Таким образом, проведенный анализ зон разрушения боковых рам после их усталостных испытаний показал, что они представляют собой совокупность деталей одного назначения, во многом отличающихся друг от друга. Отличия могут быть по конструктивному исполнению, по наличию или отсутствию поверхностных и внутренних дефектов различного происхождения, по величине разностенности вертикальных стенок.

**Усталостные испытания боковых рам.** Для большинства партий боковых рам показатель  $|m|$  находится в пределах от 4 до 10 со средним значением 7, для трех партий значения  $|m|$  были существенно выше. На рис. 1

приведена зависимость  $n = f(m)$ , где  $n$  — коэффициент запаса сопротивления усталости. Как видно из графика, до значения  $|m| = 10$  величина  $n$  монотонно повышается, достигая значения 2,1. Далее  $n$  практически

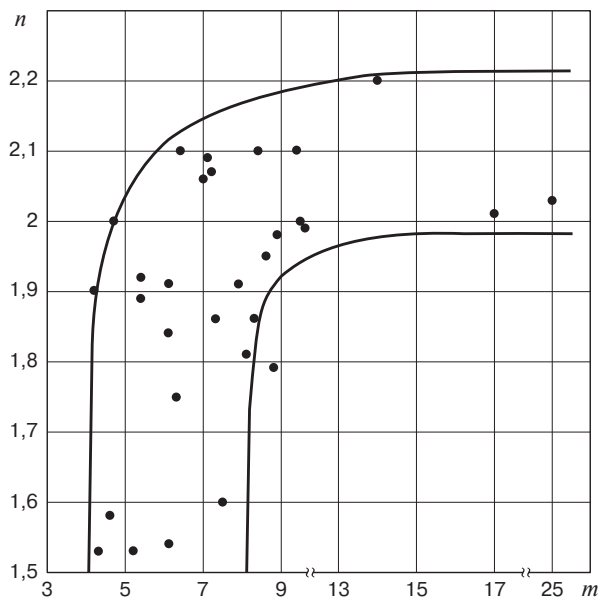


Рис. 1. Зависимость коэффициента запаса сопротивления усталости  $n$  от показателя  $m$

Fig. 1. Dependence of resistance fatigue safety factor  $n$  on index  $m$

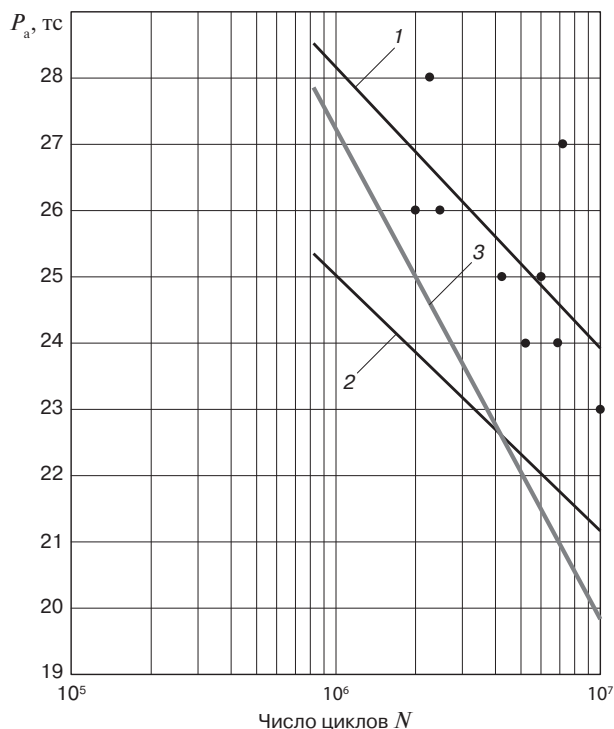


Рис. 2. Кривая усталости боковых рам партии 1:  
1 — при вероятности неразрушения 50%; 2 — при вероятности неразрушения 95%; 3 — сравнительная кривая  
Fig. 2. Fatigue curve of the side frames of batch 1:  
1 — at a probability of 50% of non-destruction; 2 — at 95% of non-destruction; 3 — comparative curve

не изменяется в интервале 2,0 — 2,2 во всем диапазоне значений показателя  $m$ . Такой характер зависимости обусловлен предусмотренной в действующей методике натурных испытаний постоянной средней нагрузкой цикла  $P_m = \frac{P_{\max} + P_{\min}}{2}$ . Это ограничивает повышение

максимальных нагрузок  $P_{\max}$  и, следовательно, получение высоких значений  $n$  в случае испытаний конструкций нового поколения для 25 — 27 тс/ось, т. е. при невозможности изломать детали в соответствии с методикой испытаний. На наш взгляд, усталостные испытания литых деталей необходимо проводить при постоянном коэффициенте асимметрии цикла нагружения  $K_{ac} = 0,15$ . Отличительной особенностью испытаний трех партий боковых рам является получение высоких значений показателя  $m = 14, 17$  и 25 (по абсолютной величине). В табл. 2 приведены параметры кривых усталости, а также минимальные и максимальные массы ( $B$ ) деталей.

Как видно из табличных данных, характерными особенностями этих партий боковых рам являются, во-первых, высокие значения коэффициента запаса сопротивления усталости (нормированное значение  $n > 1,8$ ). Во-вторых, низкие значения параметра  $\rho$ , свидетельствующие о большом разбросе экспериментальных данных (нормированное значение  $|\rho| \geq 0,666$ ). Рассмотрим результаты усталостных испытаний боковых рам каждой партии более подробно.

**Партия 1.** Боковые рамы представлены базовым вариантом. На рис. 2 показана в полулогарифмических координатах кривая усталости деталей ( $P_a$  — амплитудная нагрузка). Как видно из графика, результат на  $P_a = 27$  тс существенно превышает результаты испытаний при более низких нагрузках (число циклов до излома  $N_{изл} = 7\,161\,000$ ), что противоречит физическому смыслу кривой усталости, когда со снижением  $P_a$  увеличивается циклическая долговечность. Расчет, проведенный без учета этого результата, показал, что в этом случае  $|m| = 11$ ,  $\rho = -0,89$ ; это достаточно близко к значениям показателей  $m$  и  $\rho$  всего объема испытаний боковых рам ( $|m|_{ср} = 7$ ,  $\rho_{ср} = -0,83$ ). Разрушение детали произошло по углу рессорного проема. Очагом зарождения

Таблица 2

Параметры кривых усталости

Table 2

Parameters of fatigue curves

| Партия | $ m $ | $ \rho $ | $n$ | $B$ , кг |     |          |
|--------|-------|----------|-----|----------|-----|----------|
|        |       |          |     | min      | max | $\Delta$ |
| 1      | 14    | 0,668    | 2,2 | 396      | 406 | 10       |
| 2      | 17    | 0,670    | 2,0 | 405      | 421 | 16       |
| 3      | 25    | 0,378    | 2,0 | 412      | 426 | 14       |

усталостной трещины послужила незначительная усадочная рыхлота в тепловом узле. В зоне разрушения другие дефекты отсутствуют.

На величину  $m$  и  $\rho$  также могли оказать влияние два низких результата на  $P_a = 26$  тс. Расчет, проведенный при увеличении числа циклов нагружения каждого результата на 1,5 млн циклов, показал, что в этом случае  $m = -8$ ,  $\rho = -0,94$ . Эти показатели находятся в диапазоне параметров всего объема испытаний деталей ( $m = -4 \div -10$ ;  $\rho = -0,73 \div -0,98$ ).

Излом одной детали ( $N_{изл} = 2\,090\,000$  циклов) произошел по углу рессорного проема в результате зарождения и развития трех усталостных трещин (рис. 3). Первичная трещина зародилась от острой кромки на усиливающем ребре в нижнем углу рессорного проема. Вторичная трещина — на усадочной рыхлоте в тепловом узле в верхней полуформе. Третья трещина зародилась на поверхности сливного отверстия в результате изменения напряженного состояния боковой рамы из-за развития первых двух трещин. Излом другой детали ( $N_{изл} = 2\,493\,000$  циклов) произошел по середине (центральному сечению) нижнего пояса. В очаге разрушения зафиксирована песчаная раковина большой, на  $3/4$  толщины горизонтальной стенки, величины, что однозначно следует трактовать как существенное ослабление сечения (рис. 4). В изломах присутствуют усадочные дефекты на вертикальной стенке нижнего пояса, на горизонтальном поясе, выполняющем опорную площадку для пружин рессорного подвешивания, в тепловом узле.

Таким образом, анализ результатов усталостных испытаний боковых рам партии 1 позволил установить, что на формирование кривой усталости оказали существенное влияние результаты испытаний трех боковых рам: излом на  $P_a = 27$  тс с высокой наработкой ( $N_{изл} = 7\,161\,000$  циклов) детали при отсутствии литейных дефектов, а также изломы на  $P_a = 26$  тс с низкими значениями  $N_{изл} = 2\,009\,000$  и  $2\,493\,000$  циклов деталей при наличии различных и многочисленных литейных дефектов.

Эти результаты свидетельствуют о нестабильности технологии изготовления боковых рам партии 1, имевшей место в данном случае в период ее освоения на предприятии.

**Партия 2.** Боковые рамы, в отличие от базового варианта, усилены в зоне внутреннего угла буксового проема за счет наличия дополнительного внутреннего горизонтального ребра, а также увеличения высоты вертикальных стенок в 1,2 раза и толщины всех стенок с 20 до 25 мм (в 1,25 раза). Кроме того, в нижнем углу рессорного проема присутствует технологический напуск. Последний, увеличивая площадь поперечного сечения, нарушает его симметричность, что приводит к изменению напряженного состояния данной зоны. На рис. 5 показана кривая усталости деталей

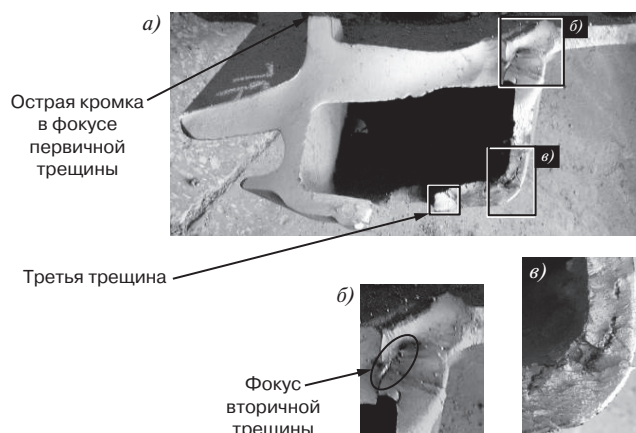


Рис. 3. Разрушение боковой рамы партии 1 по углу рессорного проема при  $P_a = 26$  тс ( $N_{изл} = 2\,090\,000$  циклов): а — общий вид зоны разрушения; б — усадочная рыхлота в тепловом узле в фокусе вторичной усталостной трещины; в — усадочная рыхлота в зоне развития вторичной усталостной трещины  
Fig. 3. Destruction of the side frame of batch 1 by angle of spring opening at  $P_a = 26$  tf ( $N_{изл} = 2\,090\,000$  cycles): а — general view of the zone of destruction; б — shrinkage porosity in the thermal unit at the focus of secondary fatigue crack; в — shrinkage porosity in the development of the secondary zone of fatigue crack

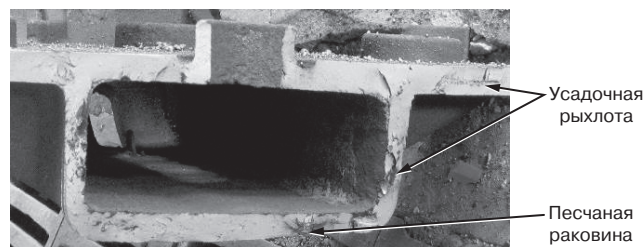


Рис. 4. Песчаная раковина в фокусе излома по середине нижнего пояса боковой рамы партии 1 при  $P_a = 26$  тс ( $N_{изл} = 2\,439\,000$  циклов)  
Fig. 4. Sand holes in focus of fracture in the middle of the bottom zone of the side frame of batch 1 at  $P_a = 26$  tf ( $N_{изл} = 2\,439\,000$  cycles)

( $P_a$  — амплитудная нагрузка). Как видно из графика, результаты испытаний можно условно разделить на две группы, отличающиеся друг от друга уровнем испытательных нагрузок: первая группа на  $P_a = 25 \div 27$  тс, вторая группа — на  $P_a = 22 \div 24$  тс. Приведенные в табл. 2 характеристики относятся к общей совокупности, в отдельности для каждой группы (по четыре результата) составили:

- первая —  $\rho = -0,92$ ;  $m = -21$ ;  $n = 2,4$
- вторая —  $\rho = -0,93$ ;  $m = -17$ ;  $n = 2,1$ .

Наличие двух групп деталей с высоким  $\rho = -0,92$  свидетельствует о корректности деления партии 2 ( $\rho = -0,67$ ) на отдельные группы. В связи с этим был проведен анализ разрушения боковых рам в группах с целью установления характера разрушения деталей.

**Группа 1.** Излом боковой рамы на  $P_a = 23$  тс ( $N_{изл} = 9\,263\,000$  циклов) по углу рессорного проема с выходом на сливное отверстие. В фокусе — поверхностный засор в месте перехода усиливающего ребра в



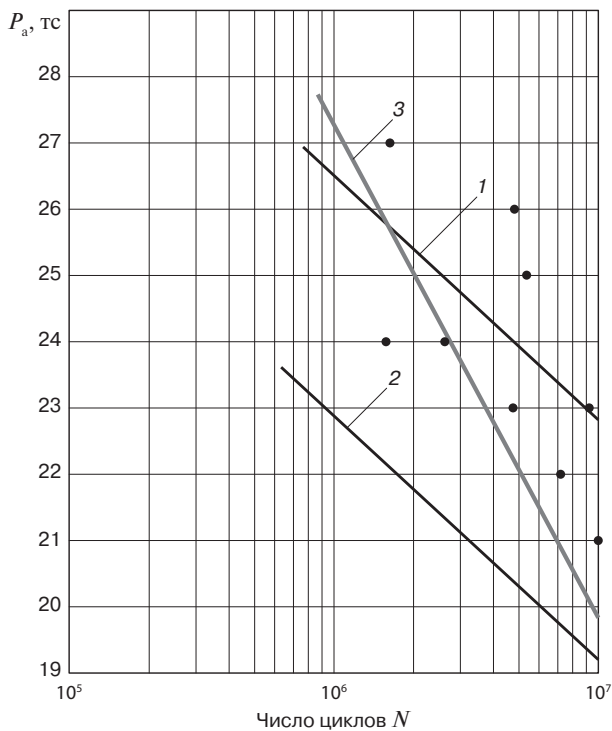


Рис. 5. Кривая усталости боковых рам партии 2:  
1 — при вероятности неразрушения 50%; 2 — при вероятности  
неразрушения 95%; 3 — сравнительная кривая  
Fig. 5. Fatigue curve of side frames of batch 2:  
1 — at 50% probability of non-destruction; 2 — at 95% probability of  
non-destruction; 3 — comparative curve

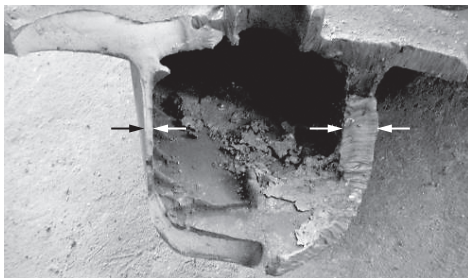


Рис. 6. Разнотолщинность вертикальных стенок нижнего пояса  
боковой рамы партии 2 (группа 1) при  $P_a = 27$  тс ( $N_{изл} = 1\,627\,000$   
циклов)

Fig. 6. Different thickness of the vertical walls of the lower zone of side  
frame of batch 2 (group 1) at  $P_a = 27$  tf ( $N_{изл} = 1,627,000$  cycles)

горизонтальную стенку, выполняющую опорную площадку для пружин. В зоне разрушения других дефектов не выявлено.

Излом боковой рамы на  $P_a = 25$  тс ( $N_{изл} = 5\,370\,000$  циклов) по середине нижнего пояса. Очагом зарождения усталостной трещины послужила песчаная раковина  $20 \times 1,8$  мм на опорной поверхности рессорного проема.

Излом боковой рамы на  $P_a = 26$  тс ( $N_{изл} = 4\,863\,000$  циклов) по углу рессорного проема с выходом на сливное отверстие. В зоне разрушения видимых дефектов нет.

Излом боковой рамы на  $P_a = 27$  тс ( $N_{изл} = 1\,627\,000$  циклов) произошел в результате развития двух усталостных трещин: по углу рессорного проема с выходом на сливное отверстие и по технологическому окну (наклонной поверхности) с выходом на наклонный пояс. Излом произошел по трещине в углу рессорного проема (рис. 6). Разностенность вертикальных стенок в этом месте составила 26,5 мм, что значительно превышает допускаемую чертежом (3,2 мм). Других дефектов в зоне разрушения не выявлено. Зарождение трещины на наклонной поверхности технологического окна произошло на его отбуртовке от поверхностного засора.

**Группа 2.** Излом боковой рамы на  $P_a = 22$  тс ( $N_{изл} = 7\,190\,000$  циклов) произошел по наклонному поясу. Разрушение произошло по двум усталостным трещинам, каждая из которых зародилась на внутренней поверхности вертикальной стенки от незначительных засоров.

Излом боковой рамы на  $P_a = 23$  тс ( $N_{изл} = 4\,873\,000$  циклов) произошел в результате зарождения и развития трех усталостных трещин в разных местах детали — на наклонном поясе за поддомкратной подушкой, по середине нижнего пояса и по углу рессорного проема. В зоне разрушения по наклонному поясу видимых дефектов нет, толщины стенок — в соответствии с требованиями чертежа. В фокусе трещины по нижнему поясу присутствует незначительная усадочная рыхлота.

Излом боковой рамы на  $P_a = 24$  тс ( $N_{изл} = 1\,574\,000$  циклов) по углу рессорного проема произошел в результате зарождения и развития трех усталостных трещин (рис. 7). Очагами зарождения усталостных трещин послужили литейные дефекты в виде горячих трещин.

Излом боковой рамы на  $P_a = 24$  тс ( $N_{изл} = 2\,634\,000$  циклов) произошел по середине нижнего пояса. Очагом зарождения усталостной трещины послужила песчаная раковина на горизонтальной стенке нижнего пояса.

Проведенное конструктивное изменение боковых рам партии 2 при циклическом нагружении привело к формированию неоднородного напряженного состояния между усиленными и неусиленными зонами — к созданию пиковых напряжений в нижнем и наклонном поясах. Анализ зон разрушения и поверхностей изломов боковых рам показал, что для первой группы деталей характерно разрушение в углу рессорного проема, при этом отмечено отсутствие каких-либо других дефектов в зоне разрушения, кроме тех, которые находятся в фокусах (очагах) усталостных трещин. Для второй группы деталей характерно, во-первых, разрушение в различных зонах рам: по наклонному поясу, по середине нижнего пояса, по углу рессорного проема, во-вторых, увеличение числа образовавшихся трещин

на каждой детали (в двух случаях — по три трещины). Наличие в партии 2 двух групп боковых рам, различающихся уровнем повреждаемости (дефектности), привело к формированию кривой усталости с величиной  $|m| = 17$ .

**Партия 3.** Боковые рамы представляют собой вариант усиления внутреннего угла буксового проема за счет увеличения в этой зоне высоты вертикальных стенок в 1,2 раза и толщины горизонтального пояса, выполняющего внутренний угол буксового проема, с 20 до 26 мм. Таким образом, площадь поперечного сечения коробчатой конструкции существенно увеличивается (до 15%), снижая тем самым эксплуатационные напряжения в этой зоне. На рис. 8 показана кривая усталости деталей этой партии ( $P_a$  — амплитуда нагрузки). Как видно из графика, для большей части экспериментальных данных (6 шт. — отмечено прямоугольником) характерно незначительное изменение числа циклов до излома деталей ( $N_{изл} = 3 \div 5$  млн циклов) в достаточно широком диапазоне испытательных нагрузок ( $P_a = 22 \div 25$  тс).

Анализ зон разрушения и поверхностей изломов шести боковых рам (см. рис. 8) показал, что четыре излома ( $P_a = 22, 24$  и  $25$  тс) произошли по технологическому окну с выходом на поддомкратную подушку по наклонному поясу, два излома ( $P_a = 23$  и  $25$  тс) — по углу рессорного проема с выходом на сливное отверстие. Очагами зарождения усталостных трещин послужили незначительные дефекты, поверхностные засоры; на поверхности изломов видимые литейные дефекты отсутствуют. Следует отметить большую живучесть деталей этой партии во всем диапазоне испытательных нагрузок (табл. 3).

Как видно из табличных данных, живучесть ( $\Delta = N_{изл} - N_{тр}$ ) боковых рам в трех случаях из шести превышает 1 млн циклов, что значительно выше

Таблица 3

Живучесть боковых рам

Table 3

| Survivability of the side frames |                                                          |           |           |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------|-----------|
| $P_a$ , тс                       | Число циклов                                             |           |           |
|                                  | $N_{тр}$                                                 | $N_{изл}$ | $\Delta$  |
| 1                                | 2                                                        | 3         | 4         |
| 22                               | 2 547 000                                                | 2 950 000 | 403 000   |
| 22                               | 2 381 000                                                | 3 898 000 | 1 517 000 |
| 23                               | Первая трещина — 4 930 000<br>Вторая трещина — 5 294 000 | 5 498 000 | 204 000   |
| 24                               | 2 772 000                                                | 3 844 000 | 1 072 000 |
| 25                               | 3 047 000                                                | 4 254 000 | 1 207 000 |
| 25                               | 3 672 000                                                | 4 531 000 | 859 000   |

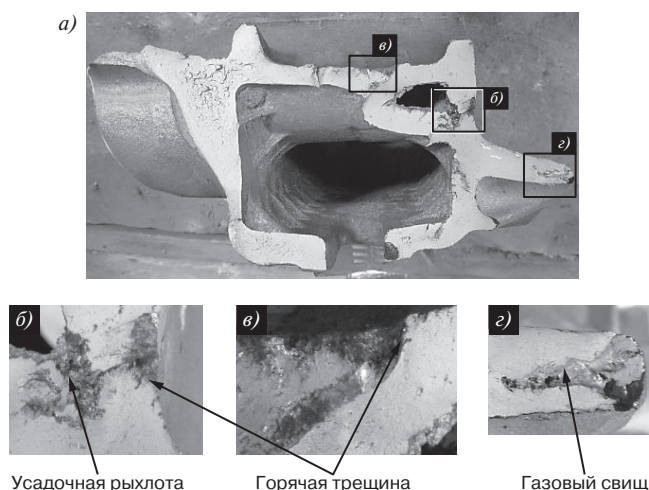


Рис. 7. Разрушение боковой рамы партии 2 (группа 2) по углу рессорного проема при  $P_a = 24$  тс ( $N_{изл} = 1\,574\,000$  циклов): а — общий вид зоны разрушения; б — горячая трещина и усадочная рыхлота в зоне развития первичной усталостной трещины; в — горячая трещина в фокусе второй усталостной трещины; г — газовый свищ в зоне разрушения

Fig. 7. Destruction of the side frame of batch 2 (group 2) by the angle of spring opening at  $P_a = 24$  tf ( $N_{изл} = 1,574,000$  cycles): а — general view of the zone of destruction; б — hot crack and shrinkage porosity in the development zone of primary fatigue crack; в — hot crack in the focus of the second fatigue crack; г — gas blowhole in the fracture zone

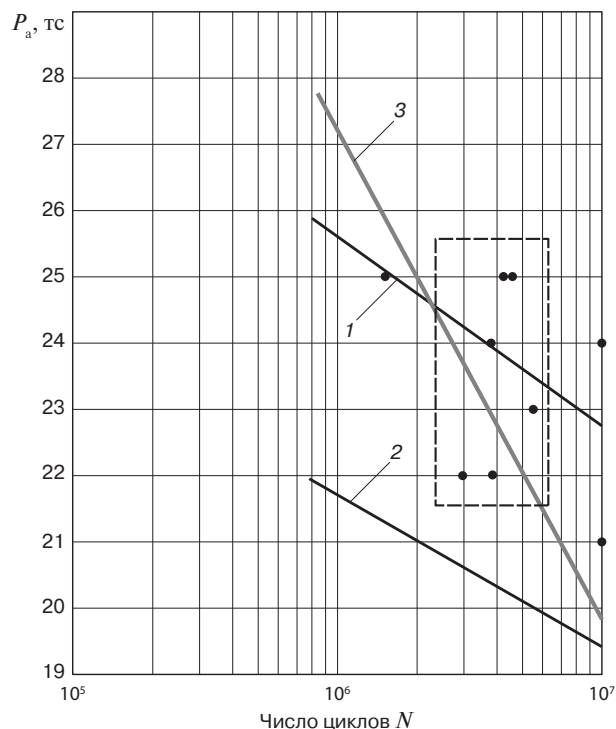


Рис. 8. Кривая усталости боковых рам партии 3: 1 — при вероятности неразрушения 50%; 2 — при вероятности неразрушения 95%; 3 — сравнительная кривая  
Fig. 8. Fatigue curve of the side frames of batch 3: 1 — at a probability of 50% of non-destruction; 2 — at 95% of non-destruction; 3 — comparative curve

среднестатистических значений всего объема проконтролированных деталей.

Таким образом, для деталей партии 3 жесткость усиленной зоны (буксовый проем) привела к увеличению напряжений в следующей зоне — наклонном поясе. Как следствие, в этой зоне на поверхности отбуртовки технологического окна возникали усталостные трещины, приводящие к изломам боковых рам в небольшом интервале циклов нагружения и к формированию кривой усталости с величиной  $|m| = 25$ .

Конструктивные усиления в буксовом проеме боковых рам партий 2 и 3 увеличили, во-первых, массу деталей в среднем на 15–20 кг по сравнению с базовым вариантом (партия 1), во-вторых, разброс по массе деталей внутри каждой партии (см. табл. 2), что также не могло не повлиять на конечные результаты испытаний этих партий.

Различные усиления одной зоны (буксового проема) боковых рам сформировали неоднородное напряженное состояние между усиленной и неусиленными зонами деталей. Дальнейшие совершенствования вариантов усиления боковой рамы по зонам повышенного риска отказов (буксовый и рессорный проемы) привели к увеличению массы деталей (на 30 кг), толщины горизонтальной стенки, выполняющей внутренний угол буксового проема (на 5 мм), а также вертикальных стенок в углу рессорного проема (с 15–18 до 18–19 мм) и в нижнем поясе (с 20 до 22,5 мм). При этом величина показателя  $|m| = 5 \div 6$ , коэффициента  $|\rho| = 0,75 \div 0,85$ .

**Выводы.** 1. Проведен анализ результатов полных усталостных испытаний 30 партий боковых рам различных модификаций. Получены параметры кривых усталости деталей:  $\rho$  — коэффициент линейной корреляции экспериментальных данных,  $m$  — показатель степени уравнивания кривых усталости. Для большинства партий боковых рам показатель  $m$  находится в интервале значений (по абсолютной величине) от 4 до 10 со средним значением  $|m| = 7$ , для трех партий значения  $|m|$  существенно выше — 14, 17 и 25.

2. Рассмотрено влияние различных конструктивных решений по усилению зоны буксового проема боковой рамы (дополнительное ребро, увеличение высоты и толщины вертикальных стенок, а также толщины горизонтальной стенки) на результаты полных усталостных испытаний деталей.

Установлено, что усиление отдельных зон боковых рам, в данном случае — буксового проема, приводит к созданию повышенных напряжений в других зонах деталей — в нижнем и наклонном поясах.

Показано, что формирование зон с различным уровнем напряженного состояния искажает резуль-

таты усталостных испытаний, необоснованно увеличивая значения показателя  $m$ , а следовательно, и показателя  $n$ .

Конструктивные решения по созданию усиленных боковых рам следует разрабатывать на основе соблюдения равнопрочности деталей по зонам повышенного риска отказов: буксовый проем — наклонный пояс — рессорный проем.

3. Рекомендовано при получении показателя  $|m| > 10$  дополнительно проводить анализ зон разрушения с установлением причин, обусловивших повышение величины  $|m|$ . Наличие факторов, увеличивающих главный показатель качества деталей  $n$ , может послужить основанием для отрицательного заключения по результатам полных усталостных испытаний.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сурвилло А. Б., Плоткин В. С., Бронивичский А. Б. Исследование динамической нагруженности и оценка усталостной прочности несущих узлов восьмиосных полувагонов // Тр. ВНИИЖТ. 1976. Вып. 548. С. 94–110.
2. Тележка «Моушн Контрол» для грузовых вагонов / А. А. Тен [и др.] // Вагоны и вагонное хозяйство. 2011. № 4. С. 16–19.
3. Бамбулевич В. Б., Николаев Н. Л., Якушев А. В. Испытание деталей и узлов изделий объединения — оперативный и надежный способ оценки их качества // Тяжелое машиностроение. 2004. № 4. С. 11–12.
4. Оганьян Э. С., Красюков Н. Ф. Условия безопасной эксплуатации литых деталей тележек грузовых вагонов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2013. № 3. С. 13–19.
5. Самошкин С. Л., Хоменко А. А., Виноградов А. А. Исследование несущих элементов тележек модели 18-100 грузовых вагонов // Транспортное машиностроение. 2007. № 9. С. 23–25.
6. Конькова Т. Е., Беловодский В. Б., Великанов А. В. О путях повышения эксплуатационной надежности стальных литых деталей тележек грузовых вагонов // Вестник ВНИИЖТ. 2009. № 1. С. 22–26.
7. Сухов А. В., Рейхарт В. А. К оценке сопротивления усталости литых деталей тележек грузовых вагонов // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 1. С. 43–48.
8. Школьник Л. М. Методика усталостных испытаний. Справочник М.: Металлургия, 1978. 304 с.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**СУХОВ Алексей Владимирович**, канд. техн. наук, заведующий отделением «Транспортное материаловедение», АО «ВНИИЖТ»

**РЕЙХАРТ Владимир Александрович**, канд. техн. наук, заместитель заведующего лабораторией «Испытания материалов и конструкций», АО «ВНИИЖТ»

**КОНЫКОВА Татьяна Евгеньевна**, старший научный сотрудник, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 14.04.2015 г., актуализирована: 30.09.2015 г.; 17.02.2016 г.; 26.05.2016 г., принята к публикации 24.06.2016 г.

## Influence of constructive solutions on the formation of fatigue curve of the side frames of freight car bogies

A. V. SUKHOV, V. A. REYKHART, T. E. KON'KOVA

Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

**Abstract.** Fatigue resistance is the main parameter of the quality of cast parts. Fatigue tests allow evaluating performance of designs, feasibility of introducing structural changes, efficiency of used in the manufacture parts of technological solutions.

The analysis of the results of fatigue tests of the side frames of different manufacturers is made. The main places of destruction were determined and defects in the centers of origin of the fatigue cracks were systematized. The parameters of fatigue curves ( $m$  — exponent equation,  $\rho$  — correlation coefficient), as well as limits of endurance and resistance to fatigue safety factor  $n$  were calculated in the article.

In some cases, the value of the index  $m$  greatly exceeds the average level of the entire test volume. Test results of three batches of the side frames with high values of  $m$  and  $n$  were reviewed.

The first batch of the side frames is represented by the base case. Analysis of the fracture of surfaces showed the presence of damage with high operating time of parts without casting defects. Also, there is destruction of parts with low operating time with presence of numerous casting defects. This indicates instability of manufacturing techniques of parts during its development in the enterprise.

Side frames in the second batch are reinforced in the zone of internal angle of pedestal jaw opening by introducing additional edge, increasing the height of the vertical walls in 1.2 times and the wall thickness in 1.25 times. Efforts of pedestal opening led to a peak stresses in the lower and diagonal tension members, side frames divided into two groups of parts with different levels of damage. As a result — the formation of the fatigue curve with the magnitude  $|m| = 17$ .

Side frames of third batch are an option of enhancing inner angle of pedestal opening by increasing the height of the vertical walls in 1.2 times and the thickness of the horizontal zone in 1.3 times. The rigidity of reinforced zone (pedestal opening) has led to an increase in stress in a neighbor zone — diagonal tension member. As a result, obtaining fatigue of the curve with the magnitude  $|m| = 25$ .

Formation of zones with different levels of stress state distorts results of fatigue tests of the side frames, unreasonably increases the value of index  $m$ , and hence index  $n$ . When receiving  $m$  in absolute value over 10 an analysis of zones of destruction with establishing reasons behind this increase should be made as well.

**Keywords:** side frames; fatigue curves; test results; destruction zones; cast failures; fatigue cracks

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-5-300-307>

### REFERENCES

1. Survillo A. B., Plotkin V. S., Bronivitskiy A. B. *Issledovanie dinamicheskoy nagruzhennosti i otsenka ustalostnoy prochnosti nesushchikh uzlov vos'miosnykh poluvagonov* [Study dynamic

load rating and the fatigue strength of bearing units of eight-axle open cars]. Tr. VNIIZhT. [Proc. of the Railway Research Institute], 1976, no. 2, pp. 94 – 110.

2. Ten A. A., London M. D., Komissarova I. N., Dodonov A. V., Zhemenev A. V., Belousov V. N. *Telezhenka "Moushn Kontrol" dlya gruzovykh vagonov* ["Motion Control" bogie for freight cars]. Vagony i vagonnoe khozyaystvo [Cars and car facility], 2011, no. 4, pp. 16 – 19.

3. Bambulevich V. B., Nikolaev N. L., Yakushev A. V. *Ispytanie detaley i uzlov izdeliy ob"edineniya — operativnyy i nadezhnyy sposob otsenki ikh kachestva* [Tests of parts and units of association's products — fast and reliable way to assess its quality]. Tyazheloe mashinostroenie [Heavy engineering], 2004, no. 4, pp. 11 – 12.

4. Ogan'yan E. S., Krasnyukov N. F. *Usloviya bezopasnoy ekspluatatsii litykh detaley telezhek gruzovykh vagonov* [Terms of safe operation of cast parts of freight car bogies]. Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZhD" [Bulletin of the Joint Scientific Council of the JSC "Russian Railways"], 2013, no. 3, pp. 13 – 19.

5. Samoshkin S. L., Khomenko A. A., Vinogradov A. A. *Issledovanie nesushchikh elementov telezhek modeli 18 – 100 gruzovykh vagonov* [Study of bearing elements of 18 – 100 bogies of freight cars]. Transportnoe mashinostroenie [Transport engineering], 2007, no. 9, pp. 23 – 25.

6. Kon'kova T. E., Belovodskiy V. B., Velikanov A. V. *O putyakh povysheniya ekspluatatsionnoy nadezhnosti stal'nykh litykh detaley telezhek gruzovykh vagonov* [On ways to improve operational reliability of steel cast parts of freight car bogies]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway research Institute], 2009, no. 1, pp. 22 – 26.

7. Sukhov A. V., Reykhart V. A. *K otsenke soprotivleniya ustalosti litykh detaley telezhek gruzovykh vagonov* [For estimation of fatigue resistance of cast parts of freight car bogies]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2015, no. 1, pp. 43 – 48.

8. Shkol'nik L. M. *Metodika ustalostnykh ispytaniy. Spravochnik* [Methods of fatigue testing. Reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 304 p.

### ABOUT THE AUTHORS

**SUKHOV Aleksey Vladimirovich,**

Cand. Sci. (Eng.), Head of Department "Transport material science", JSC "VNIIZhT"

**REYKHART Vladimir Aleksandrovich,**

Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Laboratory "Tests of materials and structures", JSC "VNIIZhT"

**KON'KOVA Tat'yana Evgen'evna,**

Senior Researcher, JSC "VNIIZhT"

Received 14.04.2015

Revised 30.09.2015, 17.02.2016, 26.05.2016

Accepted 24.06.2016

■ E-mail: [sukhov.alexey@vniizht.ru](mailto:sukhov.alexey@vniizht.ru) (A. V. Sukhov)