

УДК 629.4.027.2

## О ВЛИЯНИИ ЛИТЕЙНЫХ ДЕФЕКТОВ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ

**И. Ф. ПАСТУХОВ, М. И. ПАСТУХОВ**

*Учреждение образования «Белорусский государственный  
университет транспорта», Республика Беларусь*

### **Введение**

Литые детали (рамы боковые и балки надрессорные) тележек грузовых вагонов изготавливаются из низколегированных сталей марок: 20ГФЛ, 20ГЛ, 20ГТЛ и 20ХГНФТЛ по ГОСТ 977. Требования к отливкам рам и балок регламентируются техническими требованиями завода изготовителя и техническими условиями МПС РФ [1]. При соблюдении этих требований гамма-процентный (90 %) срок службы рам и балок из сталей 20ГФЛ, 20ГЛ и 20ГТЛ составляет 32 года, а для рам и балок из стали 20ХГНФТЛ – 35 лет. Однако в эксплуатации имеют место случаи разрушения рам и балок через непродолжительный срок службы: от 2-х до 23-х лет [2], [3]. И хотя вероятность разрушения литых деталей в эксплуатации мала (0,00000059), они все же происходят. И происходят они, в основном, по двум причинам: либо при возникновении в эксплуатации экстремального режима нагружения деталей тележек, особенно в сочетании с ухудшением их технического состояния (большим износом сопрягаемых узлов), либо при появлении литых дефектов в опасных зонах сечений деталей, которые становятся очагами зарождения в них усталостных трещин даже при нормированных режимах нагружения.

Существующие технологии изготовления крупногабаритных литых деталей не могут обеспечивать такое качество литья, при котором бы в них отсутствовали литые дефекты: шлаковые включения, газовые раковины, горячие трещины, рыхлость металла и т. д. Однако влияние этих дефектов на сопротивление усталости и технический ресурс детали изучено недостаточно. Имеющаяся информация [4] об оценке влияния литых дефектов на циклическую прочность деталей тележек грузовых вагонов не дает ответов на вопросы, возникающие при анализе причин их разрушения в эксплуатации. Как влияют дефекты на зарождение усталостных трещин в зависимости от уровня напряжений, в зонах которых дефекты появляются? Как влияют дефекты на эти процессы в зависимости от их местоположения по отношению к поверхности детали и размеров по площади поражения сечения? Приведенный материал только констатирует, что предел выносливости бездефектных боковых рам при стендовых циклических испытаниях на 13 % выше, чем рам, в изломах которых зафиксированы дефекты, допустимые техническими условиями на их изготовление. При этом по условиям испытаний все разрушения рам проходят по сечению с максимальными номинальными напряжениями, тогда как в эксплуатации разрушения происходят по девяти сечениям с различным уровнем номинальных напряжений и, как правило, с литыми дефектами в изломах.

### **Постановка задачи**

Исследование влияния литых дефектов на усталостные характеристики материала (сталь 20ГФЛ), из которых изготовлены рамы и надрессорные балки тележек

модели 18–100, а также на усталостные характеристики натуральных деталей при их лабораторных испытаниях и эксплуатационных повреждениях.

#### Метод решения задачи

Оценка влияния литейных дефектов на усталостные характеристики материала стали 20ГФЛ произведена по методике ГОСТ 25.502 на круглых образцах 10 мм, изготовленных из боковых рам и надрессорных балок, проработавших в эксплуатации 25 лет. Испытание образцов проведено на машине УКИ-6000-2, с частотой нагружения 50 Гц при вращении с изгибом при симметричном цикле нагружения. Образцы были сформированы в две группы: без видимых дефектов (16 штук) и с видимыми дефектами (12 штук).

Оценка влияния литейных дефектов на усталостные характеристики натуральных деталей (боковых рам и надрессорных балок) произведена в лабораторных условиях при их стендовых испытаниях по методике [5]. Для испытаний были отобраны детали, изъятые из эксплуатации после их 30-летней работы. Испытания проведены на машине ЦДМ-200 с гидропульсирующими силовыми устройствами при частоте нагружения 300 циклов в минуту (5 Гц).

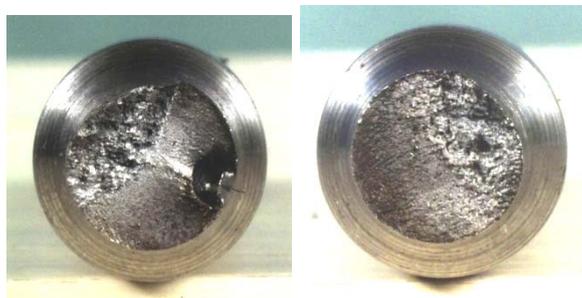
Оценка влияния литейных дефектов на срок службы литых деталей в условиях эксплуатации произведена диагностированием боковых рам и надрессорных балок в Витебском вагонном депо Белорусской железной дороги при проведении плановых ремонтов вагонов.

#### Анализ полученных результатов

В процессе испытания образцов все они после разрушения сортировались в две группы: с дефектами и без дефектов (рис. 1, *в* и 1, *б*). Все изломы фотографировались. В дефектных образцах устанавливался вид дефекта (неметаллические включения, газовые раковины и т. д.). Оценка результатов испытаний произведена по долговечности (табл. 1) и по параметрам сопротивления усталости (табл. 2).



*а)*



*б)*

*в)*

*Рис. 1.* Образцы после проведения усталостных испытаний:  
*а* – общий вид изломов; *б* – характер изломов бездефектных образцов;  
*в* – характер изломов образцов с литейными дефектами

Как видно из табл. 1, литейные дефекты в образцах снижают их долговечность в среднем в 2,65 раза в сравнении с бездефектными.

Анализ табл. 2 показывает, что предел выносливости образцов, имеющих литейные дефекты, на 15 % ниже предела выносливости бездефектных образцов, которые соответственно равны 154 и 181,5 МПа. Уравнения кривых выносливости бездефектных и дефектных образцов хорошо коррелируются (-0,94 и -0,85). Показатели наклона кривых выносливости примерно равны (10,66 и 11,84), что дает основание для проведения сравнительного анализа характеристик усталости исследуемых образцов.

Таблица 1

Уровень снижения долговечности образцов от наличия литейных дефектов

Напряжения в расчетном сечении $\sigma$ , МПа	Средняя долговечность образцов одного уровня расчетных напряжений $N$ , циклов	Наличие дефекта (да, нет)	Разница в долговечности дефектного образца в сравнении с бездефектным, %
230	191 200	да	< в 2,55 раза
230	487 700	нет	–
196	712 950	да	< в 1,55 раза
196	1 107 000	нет	–
188	820 000	да	< в 2,7 раза
188	2 229 200	нет	–
183	579 100	да	< в 3,8 раза
183	2 217 450	нет	–

Таблица 2

Параметры усталостной прочности образцов из стали 20ГФЛ, изготовленных из литых деталей после 25 лет эксплуатации

Параметр	Обозначение и размерность	Состояние образцов	
		без литейных дефектов	с литейными дефектами
Предел выносливости при вероятности неразрушения 0,5	$\bar{\sigma}_{-1}$ , МПа	181,5	154
Абсцисса точки перелома кривой выносливости	$N$ , циклов	$6,86 \cdot 10^6$	$10^7$
Показатель наклона левой ветви кривой выносливости	$m$	10,66	11,84
Уравнение кривой выносливости	$y = b + ax$	$\lg \sigma = 2,9001 - 0,0938 \lg N$	$\lg \sigma = 2,8291 - 0,09158 \lg N$
Коэффициент корреляции	$\rho$	-0,945404868	-0,858532096
Число испытанных образцов	$n$	16	12

В целом можно констатировать, что литейные дефекты в образцах приводят как к снижению их долговечности (в 2,65 раза), так и предела выносливости (на 15 %).

Анализ стендовых испытаний боковых рам и надрессорных балок после их 30-летней эксплуатации показал, что бездефектных деталей практически нет. Вопрос состоит в том, в какую зону (по напряженному состоянию детали) эти дефекты попали, где (по отношению к поверхности) они располагаются и какова их величина по площади поражения сечения? Так, в боковых рамах 77 % всех разрушений произошло по внутреннему углу буксового проема, в котором от вертикальной нагрузки наибольшие напряжения (90 МПа при осевой нагрузке 228 кН). Дефектов в этом сечении у разрушенных рам не было. Но не было их в этих рамах и по наклонному поясу, в котором напряжения ниже, чем в буксовом проеме на 15 % (76 МПа при  $P_0 = 228$  кН). Однако стоило дефектам попасть в сечение наклонного пояса, как у них разрушение произошло именно по этому сечению (при этом в сечении по буксовому проему дефекты отсутствовали).

На рис. 2 и 3 показаны зоны (сечения) разрушения боковых рам и надрессорных балок, а в табл. 3 характер их изломов.

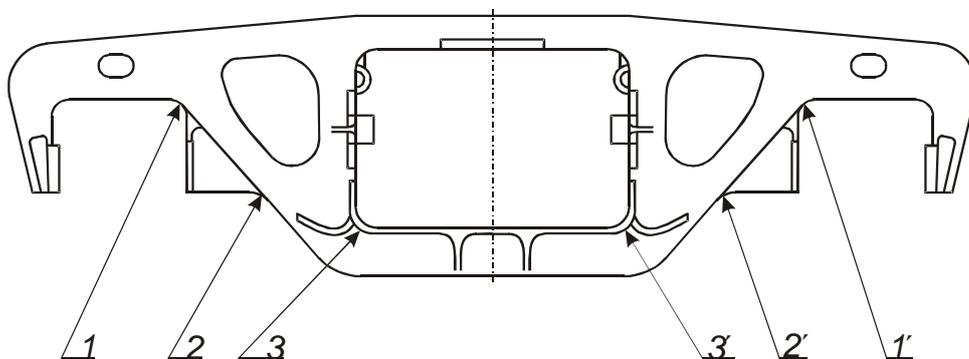


Рис. 2. Схема расположения сечений в боковой раме по зонам разрушения:  
1 – сечение внутреннего угла буксового проема (зона максимальных напряжений: 90 МПа от  $P_0 = 228$  кН); 2 – сечение наклонного пояса за буксовым упором;  
3 – сечение рессорного проема

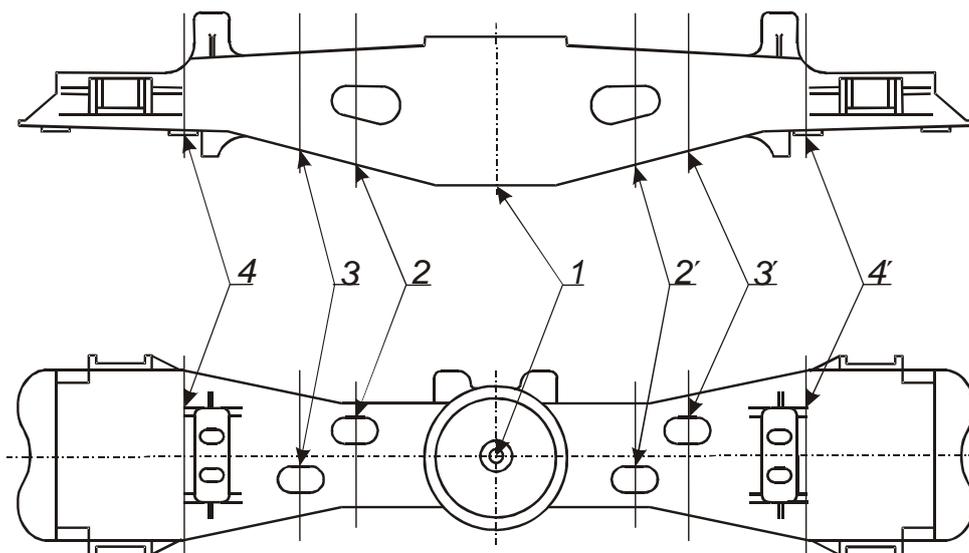


Рис. 3. Схема расположения сечений в надрессорной балке по зонам разрушения:  
1 – шкворневое сечение; 2 – сечение по технологическому отверстию наклонного пояса (зона максимальных напряжений: 110 МПа от  $P_0 = 228$  кН); 3 – сечение наклонного пояса; 4 – сечение возле скользуна

Таблица 3

Виды, величины и положение литейных дефектов в изломах литых деталей

Условный номер детали (УН)	Место разрушения (сечение)	Напряжения в зоне зарождения трещин при осевой нагрузке 228 кН $\sigma$ , МПа	Дефект			Амплитудная испытательная нагрузка $P_{ав}$ , кН	Число циклов $N$ до разрушения
			вид	местоположение в сечении	площадь поражения сечения $S$ , мм <sup>2</sup>		
<b>надрессорная балка</b>							
4	1	95	ШВ	внутри от 5 мм и более от поверхности сечения	50	373	436 000
3	1	95	ШВ	то же	300 и 400	363	211 000
8	1	95	ШВ	то же	45 и 110	363	440 000
5	1	95	ШВ	то же	150	314	689 000
14	1	95	ШВ	то же	92	255	634 000
2	3	78	ШВ	то же	150	275	2 728 000
1	2	110	–	без дефектов	–	255	1 188 000
<b>боковая рама</b>							
1	2	76	ШВ	внутри на расстоянии 1 мм от поверхности	22 и 40	275	709 000
12	1	90	ШВ	внутри на расстоянии 2 мм от поверхности	36 и 70	216	1 625 000
13	2	76	ШВ	то же	50	245	2 435 000
5	1	90	–	без дефектов	–	216	3 035 000

Примечание. ШВ – шлаковые включения.

Анализ изломов боковых рам и надрессорных балок после их усталостных испытаний показал, что литейные дефекты, попадающие внутрь поперечного сечения, не приводят к разрушению детали в условиях эксплуатации. Причем дефекты по площади иногда имели величины, превышающие допускаемые по техническим условиям 22 мм<sup>2</sup>. Из табл. 3 также следует, что долговечность деталей при стендовых испытаниях зависит от наличия или отсутствия в них литейных дефектов, зоны (по напряженному состоянию), в которые дефекты попадают и их размеров по площади поражения сечения. Так, в надрессорной балке УН2 при испытании на нагрузку 275 кН долговечность до разрушения оказалась выше (2 728 000 циклов), чем у балки УН14 (634 000 циклов), испытанной на меньшую нагрузку (255 кН), так как дефекты в ней оказались в сечении с меньшими номинальными напряжениями (78 против 95 МПа балки УН14). По изломам балок УН3 и УН8 можно судить о влиянии размеров дефектов на их долговечность. Обе балки испытаны на одну и ту же амплитудную нагрузку 363 кН, но долговечность балки УН8 оказалась в 2 раза

выше, чем УН3 (440 000 и 211 000 циклов), так как размеры дефектов первой балки в 3 раза больше, чем у второй (соответственно 400 и 110 мм<sup>2</sup>). Долговечности двух балок (бездефектной УН1 и дефектной УН14), испытанных на одинаковую нагрузку 255 кН оказались соответственно 1 188 000 и 634 000 циклов. То есть у бездефектной балки долговечность больше на 47 %, хотя номинальные эксплуатационные напряжения в зоне разрушения балки УН1 выше, чем у балки УН14 на 15 %. Аналогичная картина наблюдается и в характере разрушений боковых рам. Долговечность рамы УН13, испытанной на более высокую нагрузку (245 кН), чем рамы УН12 (216 кН) оказалась на 33 % выше последней (соответственно 2 435 000 и 1 625 000 циклов) вследствие того, что номинальные напряжения в зоне разрушения балки УН13 оказались ниже, чем у балки УН12 на 15 % (76 и 90 МПа).

Если же сравнить долговечность дефектной УН12 и бездефектной УН5 рам (соответственно 1 625 000 и 3 035 000 циклов), испытанных на одинаковую нагрузку 216 кН и разрушившихся в одном и том же сечении, то становится очевидным, что дефекты ускоряют процесс зарождения трещин и разрушения детали не менее, чем на 46 %. То есть дефекты, как концентраторы напряжений, опасны в деталях. Они становятся очагами зарождения усталостных трещин, если концентрация напряжений в них превышает величину предела выносливости материала детали. Особо опасны дефекты, попадающие на поверхность или предповерхностную зону детали (до 2 мм от поверхности).

Установить количественную закономерность влияния размеров дефектов на долговечность нагружения детали до разрушения не представлялось возможным из-за малого числа объектов наблюдения.

В табл. 4 приведены результаты циклических испытаний боковых рам и наддрессорных балок на сопротивление усталости.

Таблица 4

**Сопротивление усталости боковых рам и наддрессорных балок тележек грузовых вагонов**

Характеристика сопротивления усталости	Деталь	
	боковая рама	наддрессорная балка
Предельная амплитуда цикла нагружения ( $P_a$ ) (предела выносливости) при вероятности неразрушения, кН: $P = 0,5$ $P = 0,95$	160,3 128,1	222,6 162,2
Показатель наклона кривой выносливости $m$	4,81	7,43
Коэффициент вариации предельной амплитуды цикла нагрузки $v_{PaN}$	20,1	36,7

Анализ результатов циклических испытаний боковых рам и наддрессорных балок на сопротивление усталости (табл. 4), прослуживших 30 лет, показал, что усталостная прочность их от длительной эксплуатации повышается по сравнению с исходным состоянием (новыми деталями) [6]: в боковых рамах на 28 % (от 100 до 128,1 кН при вероятности неразрушения  $P = 0,95$ ), а в наддрессорных балках – на 54 % (от 105 до 162,2 кН). Объясняется это тем, что при воздействии на деталь кратковременных и редко действующих эксплуатационных нагрузок, приближающихся по величине к пределу текучести, происходит упрочнение детали, сопровождающееся увеличением предела выносливости. Следовательно, потенциал по несущей способности остающихся в

эксплуатации литых деталей после выбраковки их неразрушающими методами контроля за назначенный срок их службы не только не снижается, но и возрастает.

Анализ длительных наблюдений (1997–2003 гг.) за результатами диагностирования боковых рам (19 465 штук) и надрессорных балок (9 513 штук) при плановых ремонтах вагонов с использованием феррозондового метода контроля показал, что повреждения в виде трещин или литейных дефектов в контрольных зонах выявляются через срок службы деталей от 2,5 лет и более. При этом частота выбраковки деталей при выходном контроле в депо от осмотренных: боковых рам 0,0047 и надрессорных балок – 0,0046 при нормируемой их вероятности 0,01.

Во всех случаях зарождение трещин происходит от литейных дефектов, расположенных на поверхности детали или от внутренних дефектов, расположенных на расстоянии 1–2 мм от поверхности.

В качестве примера на рис. 4 показан излом боковой рамы через 2 года эксплуатации от поверхностного литейного дефекта по внутреннему углу буксового проема. Рама находилась под полувагоном № 65343212 принадлежности Белорусской железной дороги, постройки Алтайского ВСЗ 07.06.2005 г. (разрушение 12.03.2007 г. [3]). Как видно по излому (рис. 4, б), зарождение усталостной трещины произошло от литейного дефекта.



а)

б)

Рис. 4. Излом боковой рамы тележки модели 18-100 после двух лет эксплуатации:

а – общий вид излома; б – сечение излома

Таким образом, при существующей технологии изготовления литых деталей появление в них литейных дефектов неизбежно, которые при попадании их на поверхность или находясь внутри сечения, но на расстоянии 1–2 мм от поверхности детали, могут вызывать зарождение усталостной трещины с возможным разрушением ее в эксплуатации.

#### Практическое приложение результатов

Результаты исследований могут быть использованы при разработке технических условий заводами изготовителями литых деталей и ужесточения контроля их состояния в эксплуатации и при диагностике в депо.

#### Заключение

Таким образом, исследования влияния литейных дефектов на долговечность и усталостные характеристики материала и натуральных деталей показали:

– литейные дефекты, попадающие на поверхность деталей в зоны высоких напряжений, приводят к их усталостному разрушению раньше назначенного срока службы (через 2–23 года эксплуатации);

– разрушения происходят при наличии литейных дефектов в зонах деталей с напряжениями от 0,75 до 1,0 от допускаемых;

– опасность представляют дефекты, находящиеся не только на поверхности опасной зоны детали, но и в предповерхностном слое на глубине от 1 до 2 мм.

С целью повышения ресурса литых деталей необходимо:

– при переработке технических условий на изготовление литых деталей предусмотреть возможность исключения попадания литейных дефектов в зоны высоких напряжений (0,75–0,95) от допускаемых;

– при разработке новых технических средств неразрушающего контроля литых деталей предусмотреть полную автоматизацию регистрации результатов, исключив человеческий фактор.

### Литература

1. ОСТ 32.183–2001. Тележки двухосные грузовых вагонов колеи 1520 мм. Детали литые. Рама боковая и балка надрессорная. Технические условия. МПС России. – Утв. и введ. в действие с 01.05.2002 г. – 22 с.
2. Кондрашов, С. П. Безопасности движения – пристальное внимание / С. П. Кондрашов // Вагоны и вагон. хоз-во. – 2004. – Пилот. вып. – С. 14–23.
3. Гаврилюк, А. Ф. Совершенствование системы безопасности движения – залог стабильности работы железнодорожного транспорта / А. Ф. Гаврилюк // Вагон. парк. – Харьков, 2007. – № 4. – С. 59–62.
4. Попов, С. И. Выбор критерия для оценки влияния литейных дефектов на циклическую прочность деталей тележек грузовых вагонов / С. И. Попов, Н. А. Худякова // Повышение надежности и совершенствование ремонта вагонов : сб. науч. тр. ВНИИЖТа. – М., 1982. – Вып. 652. – С. 115–120.
5. Надрессорные балки и боковые рамы литые 2-осных тележек грузовых вагонов колеи 1520 мм. Методика испытаний на усталость ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1992. – 14 с.
6. К оценке запасов усталостной прочности надрессорных балок и боковых рам тележки ЦНИИ-ХЗ-О по результатам полных усталостных испытаний / В. С. Плоткин [и др.] // Сб. науч. тр. ВНИИВ. – М., 1978. – Вып. 35. – С. 41–47.

*Получено 08.09.2012 г.*