

УДК 629.4.027.27

## ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО РЕСУРСА ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ ЗАПАСА СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ

**М. И. ПАСТУХОВ**

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель*

**Ключевые слова:** технический ресурс, боковая рама, надрессорная балка, предел выносливости, коэффициент запаса сопротивления усталости, назначенный срок службы.

### Введение

Под четырехосными грузовыми вагонами эксплуатировались и продолжают эксплуатироваться трехэлементные двухосные тележки по ГОСТ 9246 с литыми боковыми рамами и надрессорными балками, изготавливаемыми из стали по ГОСТ 977. За истекший период тележки прошли длительный путь своего развития по конструктивному совершенствованию и технологии изготовления (отливки) боковых рам и надрессорных балок, направленных на повышение их несущей способности, надежности и технического ресурса. Поэтому, несмотря на значительный рост осевых нагрузок на детали тележек, технический ресурс литых деталей не только не снизился (табл. 1), но даже и вырос с 30 до 32 лет. Достигнутые результаты вагоностроительной отрасли промышленности являются следствием систематического роста допускаемого коэффициента запаса сопротивления усталости литых деталей, являющегося основным критерием их несущей способности.

*Таблица 1*

**Параметры литых деталей (боковых рам и надрессорных балок) тележек грузовых вагонов, установленных нормативными документами: [1], ГОСТ 9246, ГОСТ 977, ОСТ 32.183**

| Тип, модель тележки | Годы выпуска тележек | Допускаемая осевая нагрузка $P_0$ , тс   | Марка стали литых деталей       | Назначенный срок службы $T_n$ , лет                             |
|---------------------|----------------------|--|---------------------------------|---|
| ЦНИИ-ХЗ             | 1956–1973            | 20,5 (1956–1971)<br>22,0 (1972–1973)   | 20Л                             | 30  |
| 18-100              | 1974–2006            | 22,0 (1974–1980)<br>23,25 (1981–1984)<br>25,75 (1985–1986<br>экспериментально)<br>23,5 (1987–2006) | 20ГФЛ<br>20ГЛ<br>20ГТЛ<br>20ГТЛ | 30 (1974)<br>40 (1975–1983)<br>30 (1984–2001)<br>32 (2002–2006) |
| 18-578              | 2007                 | 23,5   | То же                           | 32  |
| 18-194-1            | –                    | 25,0   | »                               | 32  |

Если на начальном этапе изготовления тележек литые детали проектировались с допускаемым коэффициентом запаса сопротивления усталости  $[n] = 1,2$ , то в настоящее время, в соответствии с требованиями ГОСТ 32400 «Рама боковая и балка надрес-

сорная литых тележек железнодорожных грузовых вагонов» (технические условия), он возрос до  $[n] = 1,8$ . В перспективе прогнозируется создание литых деталей тележек грузовых вагонов с коэффициентом запаса сопротивления усталости  $[n] = 2,0$ .

### Постановка задачи

Исследование влияния коэффициентов запаса сопротивления усталости боковых рам и надрессорных балок двухосных тележек грузовых вагонов на их технический ресурс в состоянии поставок или остаточный ресурс после длительной эксплуатации вагонов.

### Метод решения задачи

Коэффициент запаса сопротивления усталости литых деталей тележек произведен по методике ВНИИВа [2] по зависимости

$$n = \frac{P_a(0,95) + \Psi_\sigma(P_T - P_{ст}K_{и})}{P_{ст}K_{и}K_{дз}}, \quad (1)$$

где  $P_a(0,95)$  – предел выносливости детали при вероятности неразрушения 0,95 при базовом числе циклов нагружения  $N_0 = 10^7$ , полученный по результатам усталостных испытаний. По результатам натурных испытаний деталей ФГУП «ПО Уралвагонзавод» [3] предел выносливости боковой рамы из стали 20ГЛ при вероятности неразрушения  $P = 0,95$  в состоянии поставки составляет  $P_a(0,95) = 15,55$  тс, а надрессорной балки –  $P_a(0,95) = 16,53$  тс (тележки модели 18-100);  $\Psi_\sigma$  – коэффициент чувствительности детали к асимметрии цикла;  $P_T$  – постоянная средняя нагрузка цикла;  $P_{ст}$  – вертикальная статическая нагрузка брутто на деталь;  $K_{и}$  – коэффициент использования грузоподъемности вагона;  $K_{дз}$  – коэффициент вертикальной динамической нагрузки на деталь.

Исходные данные для выполнения расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Исходные данные для определения коэффициентов запаса сопротивления усталости боковой рамы и надрессорной балки тележки 18-100

| Наименование показателя   | Обозначение показателя           | Размерность | Величины показателей              |
|---|----------------------------------|-------------|-----------------------------------|
| Осевая нагрузка   | $P_0$                            | тс          | 23,5                              |
| Допускаемые коэффициенты запаса сопротивления усталости   | $[n]$                            | –           | 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0           |
| Предел выносливости деталей из стали 20ГЛ при вероятности неразрушения $P = 0,95$ [3]:<br>– для боковой рамы<br>– для надрессорной балки              | $P_a(0,95)$<br>$P_a(0,95)$       | тс<br>тс    | 15,55<br>16,53                    |
| Общие коэффициенты снижения усталостной прочности [1]:<br>– для боковой рамы<br>– для надрессорной балки  | $(K_\sigma)_k$<br>$(K_\sigma)_k$ | –<br>–      | 4–4,5<br>4,3–4,8                  |
| Показатели наклона кривой выносливости, определяемые зависимостью $m = \frac{A}{(K_\sigma)_k}$ [1]:<br>– для боковой рамы<br>– для надрессорной балки | $m$<br>$m$                       | –<br>–      | 4,5; 4,28; 4,0<br>4,18; 4,0; 3,75 |

Окончание табл. 2

| Наименование показателя  | Обозначение показателя | Размерность | Величины показателей |
|--|------------------------|-------------|----------------------|
| Коэффициенты вертикальной динамики нагрузок:<br>– на боковые рамы<br>– на надрессорные балки | $K_{дэ}$               | –           | 0,5                  |
|  | $K_{дэ}$               | –           | 0,35                 |
| Коэффициент использования грузоподъемности вагона  | $K_{и}$                | –           | 0,9                  |
| Постоянная средняя нагрузка цикла:<br>– на боковую раму<br>– на надрессорную балку           | $P_{т}$                | тс          | 35                   |
|  | $P_{т}$                | тс          | 45                   |
| Вертикальная статическая нагрузка брутто:<br>– на боковую раму<br>– на надрессорную балку    | $P_{ст}$               | тс          | 22                   |
|  | $P_{ст}$               | тс          | 42                   |
| Коэффициент чувствительности детали к ассиметрии цикла для низколегированных сталей          | $\Psi_{\sigma}$        | –           | 0,05                 |

Величины коэффициентов запаса сопротивления усталости литых деталей тележки 18-100 в состоянии поставок составляют:

– для боковой рамы

$$n = \frac{15,55 + 0,05(35 - 22 \cdot 0,9)}{22 \cdot 0,9 \cdot 0,5} = 1,64;$$

– для надрессорной балки

$$n = \frac{16,53 + 0,05(45 - 42 \cdot 0,9)}{42 \cdot 0,9 \cdot 0,35} = 1,27.$$

Однако в процессе эксплуатации тележек происходит «выжигание» деталей с литейными дефектами в опасных зонах с изменением их предела выносливости в сторону его увеличения. Природа причин увеличения усталостной прочности литых деталей до конца не изучена. Невзирая на это, испытания боковых рам и надрессорных балок на усталость после их 30-летней эксплуатации показали, что предел выносливости рам при вероятности неразрушения  $P = 0,95$  возрастает на 28 %, а надрессорных балок на 54 % [5]. Поэтому при оценке остаточного ресурса литых деталей через  $t$  лет эксплуатации в величину предела выносливости  $P_a(0,95)$  зависимости (1) вносится поправочный коэффициент  $K_t$ , с учетом которого пересчитываются коэффициенты запаса сопротивления усталости деталей (табл. 3). То есть в зависимость (1) вместо  $P_a(0,95)$  подставляется  $P_a(0,95)K_t$ .

Технический ресурс литых деталей в состоянии поставок (до начала эксплуатации) определяется по зависимости

$$T_{\text{рес}} = T_{\text{н}} \left( \frac{n}{[n]} \right)^m, \tag{2}$$

где  $T_{\text{н}}$  – назначенный срок службы детали, лет;  $n$  и  $[n]$  – соответственно расчетный и допускаемый коэффициенты запаса сопротивления усталости. Допускаемый коэф-

коэффициент запаса сопротивления усталости регламентируется [1] и до появления ГОСТ 32400 принимался:

– при использовании статистически надежных экспериментальных данных по пределу выносливости  $\sigma_{aN}$  при доверительной вероятности  $P = 0,95$  и надежных экспериментальных данных по эксплуатационной нагруженности детали  $\sigma_{ai}$  равным  $[n] = 1,4$ ;

– при использовании статистически надежных экспериментальных данных по пределу выносливости  $\sigma_{aN}$  при доверительной вероятности  $P = 0,95$  и приближенных данных по  $\sigma_{ai}$ , по установленным нормативам динамических сил либо при использовании средневероятностных данных по  $\sigma_{aN}$  при  $P = 0,95$  и надежных экспериментальных данных по  $\sigma_{ai}$  равным  $[n] = 1,6$ ;

– при использовании приближенных данных по  $\sigma_{aN}$ , определяемых расчетным путем или экспертной оценкой при  $P = 0,5$ , и приближенных данных по  $\sigma_{ai}$ , определяемых расчетным путем по установленным нормативам динамических сил, равным  $[n] = 1,8-2,0$ ;  $m$  – показатель степени наклона кривой выносливости, определяемый по [1] по зависимости, приведенной в табл. 2.

Расчетный коэффициент запаса сопротивления усталости  $n$  определяется по зависимости (1).

Остаточный ресурс литых деталей после длительной эксплуатации определяется по зависимости

$$T_{\text{ост}} = (T_n - T_t) \left( \frac{n}{[n]} \right)^m, \quad (3)$$

где  $T_t$  – срок службы детали на момент  $t$  контроля, годы.

Таблица 3

**Величины скорректированных коэффициентов запаса сопротивления усталости, в зависимости от срока службы деталей**

| Срок службы детали $T_n$ , лет | Поправочные коэффициенты $K_t$ |                        | Величины коэффициентов запаса сопротивления усталости в зависимости от $T_t$ |                    |
|--------------------------------|--------------------------------|------------------------|--|--------------------|
|                                | для боковых рам                | для наддресорных балок | боковых рам  | наддресорных балок |
| 0                              | 1,00                           | 1,0                    | 1,64   | 1,27               |
| 10                             | 1,05                           | 1,3                    | 1,72   | 1,65               |
| 20                             | 1,10                           | 1,4                    | 1,80   | 1,77               |
| 30 и более                     | 1,20                           | 1,5                    | 1,96   | 1,84               |

**Анализ полученных результатов**

По материалам натуральных испытаний ФГУП «ПО Уралвагонзавод» [3] определены остаточные ресурсы  $T_{\text{ост}}$  боковых рам и наддресорных балок тележки 18-100, изготовленных из низколегированной стали 20ГЛ в состоянии их поставки.

Величины  $T_{\text{ост}}$  найдены для пяти вариантов значений  $[n]$  зависимости (3) ( $[n] = 1,2; 1,4; 1,6; 1,8$  и  $2,0$ ) при постоянных значениях  $n$  ( $n = 1,64$  – для боковых рам и  $n = 1,27$  – для наддресорных балок) и трех вариантов значений  $m$  ( $m = 4,5; 4,28; 4,0$  – для боковых рам и  $m = 4,18; 4,0; 3,75$  – для наддресорных балок [1]) и сведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Показатели  $(n/[n])^m$  и  $T_{ост}$  боковой рамы тележки 18-100

| Допускаемые коэффициенты запаса сопротивления усталости $[n]$ | Величины показателей |        |        |                           |       |       |
|---|----------------------|--------|--------|---------------------------|-------|-------|
|   | $(n/[n])^m$ при $m$  |        |        | $T_{ост}^*$ , лет при $m$ |       |       |
|   | 4,5                  | 4,28   | 4,0    | 4,5                       | 4,28  | 4,0   |
| 1,2   | 4,0783               | 3,8074 | 3,4885 | 130,5                     | 121,8 | 111,6 |
| 1,4   | 2,0380               | 1,9683 | 1,8830 | 65,2                      | 62,9  | 60,2  |
| 1,6   | 1,1175               | 1,1114 | 1,1038 | 35,7                      | 35,5  | 35,3  |
| 1,8   | 0,6577               | 0,6713 | 0,6891 | 21,0                      | 21,4  | 22,0  |
| 2,0   | 0,4207               | 0,4276 | 0,4521 | 13,4                      | 13,6  | 14,4  |

\* Назначенный срок службы боковой рамы из стали 20ГЛ выпуска с 2002 г. составляет 32 года [4].

Таблица 5

Показатели  $(n/[n])m$  и  $T_{ост}$  надрессорной балки тележки 18-100

| Допускаемые коэффициенты запаса сопротивления усталости $[n]$ | Величины показателей |        |        |                           |      |      |
|---|----------------------|--------|--------|---------------------------|------|------|
|   | $(n/[n])m$ при $m$   |        |        | $T_{ост}^*$ , лет при $m$ |      |      |
|   | 4,18                 | 4,0    | 3,75   | 4,18                      | 4,0  | 3,75 |
| 1,2   | 1,2674               | 1,2545 | 1,2368 | 40,5                      | 40,1 | 39,5 |
| 1,4   | 0,6654               | 0,6771 | 0,6938 | 21,3                      | 21,6 | 22,2 |
| 1,6   | 0,3807               | 0,3969 | 0,4205 | 12,1                      | 12,7 | 13,4 |
| 1,8   | 0,2327               | 0,2478 | 0,2703 | 7,4                       | 7,9  | 8,6  |
| 2,0   | 0,1498               | 0,1625 | 0,1821 | 4,7                       | 5,2  | 5,8  |

\* Назначенный срок службы надрессорной балки из стали 20ГЛ выпуска с 2002 г. составляет 32 года [4].

Анализ табл. 4 и 5 показывает, что ни боковая рама, ни надрессорная балка, изготовленные из стали 20ГЛ тележки 18-100, не обеспечивают требования ГОСТ 32400 на соответствие допускаемому коэффициенту запаса сопротивления усталости  $[n] = 1,8$  в состоянии поставки и величине назначенного срока службы  $T_n = T_{ост} = 32$  года, установленного ОСТ 32.183 [4]. Фактически боковые рамы при  $T_i = 0$ ,  $n = 1,64$  обеспечивают ресурс  $T_n = T_{ост} = 35,5$  лет только при  $[n] = 1,6$ , а надрессорные балки имеют  $T_n = T_{ост} = 40,1$  года – при  $[n] = 1,2$ . Тем не менее безопасность движения вагонов с тележками 18-100 в течение  $T_n = 32$  года при  $[n] = 1,6 < 1,8$  боковых рам и  $[n] = 1,2 < 1,8$  надрессорных балок обеспечивается на требуемом уровне благодаря возросшему качеству диагностирования деталей при их плановых ремонтах в депо и исключению из работы тех из них, которые по дефектам не отвечают требованиям ОСТ 32.183 [4].

Как видно из табл. 3, расчетные значения коэффициентов запаса сопротивления усталости литых деталей возрастают с увеличением их срока службы, что приводит к сохранению их потенциала по несущей способности при длительной эксплуатации (табл. 6). Так, боковые рамы в состоянии поставки  $T_i = 0$  обладают ресурсом  $T_n = T_{ост} = 35,5$  лет при  $[n] = 1,6$ , а через 30 лет эксплуатации в них еще остается ресурс  $T_{ост} = 3,6$  года ( $30 + 3,6 > 32$  нормированных лет). То же происходит и с надрессорными балками: при  $T_i = 0$  и  $[n] = 1,2$   $T_n = T_{ост} = 40,1$  год, а через 30 лет эксплуатации в них остается ресурс в 11 лет ( $30 + 11 > 32$  лет). При  $[n] = 1,8$  ресурс рам составляет  $30 + 2 = 32$  года, а надрессорных балок –  $30 + 2,1 = 32,1$  года.

Таблица 6

Остаточный срок службы литых деталей тележки 18-100 в зависимости от их срока службы и допускаемых коэффициентов запаса сопротивления усталости

| Срок службы детали $T_n$ , лет | Величины остаточного срока службы $T_{ост}$ , лет |             |             |             |             |                        |             |             |             |             |
|--------------------------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                                | боковой рамы при                                  |             |             |             |             | надрессорной балки при |             |             |             |             |
|                                | $n^*$   | $[n] = 1,2$ | $[n] = 1,4$ | $[n] = 1,6$ | $[n] = 1,8$ | $n^*$                  | $[n] = 1,2$ | $[n] = 1,4$ | $[n] = 1,6$ | $[n] = 1,8$ |
| 0                              | 1,64  | 121,8       | 62,9        | 35,5        | 21,4        | 1,27                   | 40,1        | 21,6        | 12,7        | 7,9         |
| 10                             | 1,72  | 85,9        | 44,4        | 25,0        | 15,5        | 1,65                   | 78,6        | 42,4        | 24,8        | 15,5        |
| 20                             | 1,80  | 63,3        | 32,7        | 18,1        | 11,1        | 1,77                   | 56,8        | 30,6        | 17,9        | 11,2        |
| 30                             | 1,96  | 7,6         | 6,4         | 3,6         | 2,0         | 1,84                   | 11,0        | 5,9         | 3,4         | 2,1         |

\* Расчетные значения коэффициентов запаса сопротивления усталости с учетом выбраковки дефектных деталей при плановых ремонтах.

Новое поколение тележек (18-578) грузовых вагонов оборудовано боковыми рамами и надрессорными балками повышенной несущей способности [3]: пределы их выносливости при вероятности неразрушения  $P = 0,95$  соответственно составляют  $P_a(0,95) = 18,49$  тс и  $P_a(0,95) = 25,01$  тс. Как следствие, у тележек модели 18-578 коэффициенты запаса сопротивления усталости в состоянии поставки составляют:

– боковых рам

$$n = \frac{18,49 + 0,05(35 - 22 \times 0,9)}{22 \times 0,9 \times 0,5} = 1,94;$$

– надрессорных балок

$$n = \frac{25,01 + 0,05(45 - 42 \times 0,9)}{42 \times 0,9 \times 0,35} = 1,91,$$

а технический ресурс при  $T_t = 0$  и  $[n] = 1,8$  (в состоянии поставки):

– боковых рам

$$T_{ост} = T_n = (32 - 0) \left( \frac{1,94}{1,8} \right)^{4,28} = 44 \text{ года};$$

– надрессорных балок

$$T_{ост} = T_n = (32 - 0) \left( \frac{1,91}{1,8} \right)^{4,0} = 40,6 \text{ года}.$$

То есть технический ресурс боковых рам и надрессорных балок тележек 18-578 на 8–12 лет превышает назначенный срок службы  $T_n = 32$  года (табл. 7).

Таблица 7

Остаточный срок службы литых деталей тележек моделей 18-100 и 18-578 в зависимости от срока службы

| Срок службы детали $T_n$ , лет | Величины расчетных коэффициентов запаса сопротивления усталости $n$ и остаточного срока службы $T_{ост}$ при $[n] = 1,8$ |                 |        |                 |                            |                 |        |                 |
|--------------------------------|--|-----------------|--------|-----------------|----------------------------|-----------------|--------|-----------------|
|                                | боковых рам тележек  |                 |        |                 | надрессорных балок тележек |                 |        |                 |
|                                | 18-100   |                 | 18-578 |                 | 18-100                     |                 | 18-578 |                 |
|                                | $n$  | $T_{ост}$ , лет | $n$    | $T_{ост}$ , лет | $n$                        | $T_{ост}$ , лет | $n$    | $T_{ост}$ , лет |
| 0                              | 1,64   | 21,4            | 1,94   | 44,0            | 1,27                       | 7,9             | 1,91   | 40,6            |
| 10                             | 1,72   | 15,5            | 2,03   | 37,4            | 1,65                       | 15,5            | 2,48   | 79,2            |

Окончание табл. 7

| Срок службы детали $T_{ис}$ , лет | Величины расчетных коэффициентов запаса сопротивления усталости $n$ и остаточного срока службы $T_{ост}$ при $[n] = 1,8$ |                 |        |                 |                            |                 |        |                 |
|-----------------------------------|--|-----------------|--------|-----------------|----------------------------|-----------------|--------|-----------------|
|                                   | боковых рам тележек  |                 |        |                 | надрессорных балок тележек |                 |        |                 |
|                                   | 18-100   |                 | 18-578 |                 | 18-100                     |                 | 18-578 |                 |
|                                   | $n$  | $T_{ост}$ , лет | $n$    | $T_{ост}$ , лет | $n$                        | $T_{ост}$ , лет | $n$    | $T_{ост}$ , лет |
| 20                                | 1,80   | 11,1            | 2,13   | 24,6            | 1,77                       | 11,2            | 2,67   | 58,0            |
| 30                                | 1,96   | 2,0             | 2,31   | 5,9             | 1,84                       | 2,1             | 2,87   | 12,9            |

### Практическое приложение результатов

Результаты исследований могут быть использованы при определении назначенного срока службы литых деталей тележек грузовых вагонов.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что литые детали тележки 18-100 обладают техническим ресурсом на пределе назначенного срока службы 32 года и изменению не подлежат. Технический ресурс литых деталей (боковых рам и надрессорных балок) тележки 18-578 превышает назначенный срок их службы 32 года на 8–12 лет, и для них установленный срок службы может быть пересмотрен в сторону его увеличения с 32 до 40 лет при проведении усталостных испытаний литых деталей после их 30-летней эксплуатации и подтверждении полученных теоретических расчетов.

### Литература

1. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
2. 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.
3. Технический уровень тележки 18-578 в сравнении с тележкой 18-100 / В. П. Ефимов // Железнодорож. транспорт. – 2006. – № 7. – С. 56–60.
4. ОСТ 32.183–2001. Тележки двухосные грузовых вагонов колеи 1520 мм. Детали литые. Рама боковая и балка надрессорная. Технические условия. МПС Россия. – Утв. и введ. в действие с 01.05.2002 г. – 22 с.
5. Отчет о научно-исследовательской работе «Проведение испытаний на выносливость надрессорных балок и боковых рам тележек ЦНИИ-ХЗ со сроком службы, превышающим 30 лет» / Брян. гос. техн. ун-т. – Брянск, 1999. – 57 с.

Получено 20.10.2017 г.