

МОДЕРНИЗАЦИЯ И ОБНОВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 629.4.027.27

В. И. СЕНЬКО, доктор технических наук, И. Ф. ПАСТУХОВ, кандидат технических наук, М. И. ПАСТУХОВ, заведующий сектором НИЦ ЭиЭТ, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

СПОСОБ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Рассмотрены два способа оценки остаточного ресурса (срока службы) литых деталей тележек грузовых вагонов: по результатам усталостных испытаний натуральных деталей после выработки ими назначенного срока службы и по результатам испытания на усталость образцов, изготовленных из деталей после их длительной эксплуатации. Показано, что способ оценки остаточного ресурса литых деталей по результатам испытания образцов более эффективен. Он требует меньших финансовых и трудовых затрат и обеспечивает более высокую точность оценки остаточного ресурса литых деталей. Объясняется это тем, что остаточный ресурс литых деталей по результатам испытания образцов определяется по пределу выносливости материала, а затем и самих деталей, выражаемому в напряжениях, тогда как при испытании натуральных деталей он находится по амплитудным нагрузкам, действующим только в одной плоскости и значительно отличающимся от спектра динамического нагружения в эксплуатации. Как следствие, зоны разрушения деталей в лабораторных условиях испытания не совпадают с зонами разрушения деталей в эксплуатации, а следовательно, не обеспечивается необходимая точность расчета остаточного ресурса литых деталей.

По действующей нормативной и проектно-конструкторской документации для ходовых частей вагонов в качестве ресурса устанавливается назначенный срок службы [1, 2], определяемый как календарная продолжительность эксплуатации объекта до его перехода в предельное состояние, когда эксплуатация невозможна по тем или иным причинам. Для ходовых частей причиной прекращения эксплуатации является снижение показателей безопасности движения ниже предельно допустимого уровня. Однако в период дорыночной экономики срок службы вагона в основном назначался на основе действовавших норм амортизационных отчислений, по которому до сих пор работает подвижной состав старого поколения. В результате технический ресурс по назначенному сроку службы недоиспользуется, что приводит к факту необоснованного исключения вагонов (несущих конструкций) из инвентарного парка, отчего дороги несут значительные издержки.

Для повышения эффективности использования существующего парка вагонов в последние годы производится модернизация подвижного состава с продлением срока службы вагонов по сравнению с назначенным. В связи с этим интенсивно ведутся работы по оценке остаточного ресурса (срока службы) вагонов и, в частности, их ходовых частей.

По заданию Белорусской железной дороги такая работа проводится в БелГУТе с 1997 г. За это время накоплен значительный материал, позволяющий упростить процедуру оценки остаточного

ресурса литых деталей, сократить сроки и стоимость работ.

Под тележками модели 18–100 грузовых вагонов находятся три поколения литых деталей (боковых рам и надрессорных балок). Первое – постройки 1956–1973 гг., выполненных из углеродистой стали 20Л ГОСТ 977 ($\sigma_T = 216$ МПа, $\sigma_{-1} = 165$ МПа), второе (1974–2000 гг.) – из низколегированных сталей 20ГЛ, 20ФЛ и 20ГТЛ ($\sigma_T = 275–314$ МПа, $\sigma_{-1} = 190–215$ МПа) и третье (с 2001 г.) – из низколегированной стали 20ХГНФТЛ ($\sigma_T = 343$ МПа, $\sigma_{-1} = 240$ МПа). Здесь σ_T – предел текучести материала, а σ_{-1} – среднее значение предела выносливости материала при симметричном цикле нагружения. Срок службы деталей этих трех периодов изготовления был установлен соответственно 30 (ГОСТ 9246), 32 и 35 (ОСТ 32.183–2001) лет.

В нормативной документации на производство и эксплуатацию вагонов значение ресурса несущих деталей не регламентируется. В качестве норматива принят коэффициент запаса сопротивления усталости, значение которого для вновь поступающих в эксплуатацию деталей не должно быть меньше нормируемой величины (1,35–1,6). Поэтому за величину предельного остаточного ресурса литых деталей тележек, от которых требуется высокая надежность в эксплуатации (вероятность безотказной работы должна быть в пределах 0,98–0,99 за срок службы), принято такое значение срока их службы, при котором коэффициент запаса

са сопротивления усталости не выходит за пределы нормативного. Для его получения проводят усталостные испытания натуральных деталей, выработавших назначенный срок службы. Для этого отбирают партию деталей из 12–14 единиц одного года постройки, испытывают их на четырех уровнях нагрузок (по три детали на каждом уровне) и определяют пределы выносливости по амплитудным нагрузкам для вероятностей неразрушения 0,5 и 0,95. По результатам испытаний определяют коэффициент запаса сопротивления усталости деталей по зависимости [3]:

$$n = \frac{(P_{aN})_{0,95} + \Psi_b (P_T - P_{ст} K_n)}{P_{ст} K_n K_{дз}}, \quad (1)$$

где $(P_{aN})_{0,95}$ – предел выносливости детали по амплитуде при вероятности неразрушения 0,95 после назначенного срока эксплуатации, кН; Ψ_b – коэффициент чувствительности детали к асимметрии цикла. Для деталей, изготовленных из стали 20Л, $\Psi_b = 0,05$, из сталей 20ГЛ, 20ФЛ, 20ГФН и 20ГТЛ – $\Psi_b = 0,1$; P_T – постоянная средняя нагрузка цикла, кН; $P_{ст}$ – расчетная вертикальная статическая нагрузка брутто на деталь, соответствующая заданной осевой нагрузке, кН; K_n – коэффициент использования грузоподъемности вагона, $K_n = 0,9$; $K_{дз}$ – коэффициент вертикальной динамики, приведенный к базовому числу циклов нагружения $N_0 = 10^7$ и эквивалентный повреждающему действию вертикальных динамических нагрузок на литые детали за назначенный срок службы T . Для боковых рам $K_{дз} = 0,5$, а для надрессорных балок – $K_{дз} = 0,35$.

Остаточный срок службы литых деталей определяется по найденному коэффициенту сопротивления усталости по зависимости [3]:

$$T_0 = T_i \left(\frac{n}{[n]} \right)^m, \quad (2)$$

где T_i – срок службы детали на момент контрольных испытаний на усталость, лет; n – коэффициент запаса сопротивления усталости, определяемый по зависимости (1); $[n]$ – допускаемый коэффициент запаса сопротивления усталости. Для литых тележек вагонов $[n] = 1,4$; m – показатель степени кривой выносливости, $m = 4 \dots 4,5$.

Однако оценка коэффициента сопротивления усталости и остаточного срока службы, выполненная авторами, а в последующем – ГосНИИВом – ВНИИЖТом [3] по изложенной методике, показала, что зоны разрушений деталей в эксплуатации и при усталостных испытаниях в лаборатории не

совпадают. Кроме того, сами усталостные испытания натуральных деталей оказались весьма дорогостоящими и продолжительными по времени.

Поэтому в ходе решения поставленной задачи найден и апробирован другой, более простой способ оценки остаточного ресурса (срока службы). Для этого из детали, отработавшей назначенный срок службы, изготавливается партия (не менее 15 шт.) стандартных образцов, испытывается на усталостную прочность по ГОСТ 25.502 и определяется среднее (медианное) значение предела выносливости σ_{-1r} материала при симметричном изгибе на базе $N_0 = 10^7$ циклов. По полученным данным определяются пределы выносливости натурной детали после их длительной эксплуатации по амплитудным напряжениям, а не по нагрузкам при 0,5 и 0,95 вероятности неразрушения по зависимостям

$$\bar{\sigma}_{aNr} = \frac{\sigma_{-1r}}{(K_\sigma)_k}; \quad (3)$$

$$\sigma_{aNr} = \bar{\sigma}_{aNr} (1 - Z_p v_{\sigma aN}), \quad (4)$$

где $(K_\sigma)_k$ – среднее значение общего коэффициента снижения предела выносливости данной натурной детали по отношению к пределу выносливости гладкого стандартного образца $(K_\sigma)_k = 4,0 \dots 4,8$; Z_p – квантиль распределения, соответствующий односторонней вероятности P (для $P = 0,95$ $Z_p = 1,645$ [4]); $v_{\sigma aN}$ – коэффициент вариации предела выносливости детали. Для стальных отливок $v_{\sigma aN} = 0,1$ [4].

Остаточный срок службы (ресурса) литой детали после выработки назначенного срока по критерию усталостной долговечности при многоцикловом динамическом нагружении предлагается определять по зависимости

$$T_0 = \frac{\left(\frac{\sigma_{aNr}}{[n]} \right)^m N_0}{B f_s \sum \sigma_{ai}^m P_{\sigma i}}, \quad (5)$$

где σ_{aNr} – предел выносливости натурной детали после длительной эксплуатации по амплитудным напряжениям и вероятности неразрушения 0,95; $[n]$ – допускаемый коэффициент запаса усталостной прочности; N_0 – базовое число циклов при усталостных испытаниях, $N_0 = 10^7$ циклов; B – коэффициент перевода календарного расчетного срока службы детали в годах во время непрерывного движения в секундах; f_s – центральная (эффективная) частота изменения динамических напряжений; σ_{ai} – уровень (разряд) амплитуды динамических напряжений; $P_{\sigma i}$ – частота (вероят-

ность) появления амплитуд напряжений с уровнем σ_{ai} в i -м интервале скоростей движения вагона; m – показатель степени кривой выносливости натурной детали, $m = 4 \dots 4,5$.

Коэффициент B для вагонных конструкций определяется по зависимости

$$B = 365 \frac{10^3 \bar{L}_c}{\bar{v}(1 + \alpha)}, \quad (6)$$

где \bar{L}_c – среднесуточный пробег вагона, $\bar{L}_c = 250$ км; \bar{v} – средняя техническая скорость движения вагона, $\bar{v} = 22,4$ м/с; α – коэффициент порожнего пробега вагона.

Центральная (эффективная) частота процесса изменения динамических напряжений

$$f_0 = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{f_{ст}}}, \quad (7)$$

где a – коэффициент, для обрессоренных частей тележки – 1,6, необрессоренных – 2,0; $f_{ст}$ – статистический прогиб рессорного подвешивания, $f_{ст} = 0,05$ м; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с².

Для проверки достоверности результатов оценки остаточного ресурса по зависимости (5) проведены усталостные испытания образцов, изготовленных из боковых рам и надрессорных балок после 30 лет их эксплуатации из сталей 20Л и 20Г1ФЛ. Испытания проведены на стандартных образцах при симметричном изгибе по ГОСТ 25.502-79. Результаты сведены в таблицу 1, из которой следует, что за 30 лет работы литых деталей происходят изменения усталостных характеристик материала. Предел выносливости углеродистой стали 20Л под боковой рамой вырос на 6 %, а надрессорной балки – остался неизменным (новой поставки $\sigma_{-1} = 165$ МПа). Однако предел выносливости низколегированной стали 20Г1ФЛ как под боковой рамой, так и под надрессорной балкой снизился на 9 % (новой поставки $\sigma_{-1} = 200$ МПа).

Используя результаты усталостных испытаний образцов, по зависимости (5) найдены остаточные ресурсы боковых рам и надрессорных балок после 30 лет их эксплуатации для двух марок сталей (20Л и 20Г1ФЛ) и сведены в таблицу 2 вместе с результатами, полученными при испытании натуральных деталей по зависимости (2).

Таблица 1 – Параметры усталостной прочности образцов, изготовленных из литых деталей, проработавших 30 лет

Параметр	Обозначение и размерность	Боковая рама		Надрессорная балка	
		20Л	20Г1ФЛ	20Л	20Г1ФЛ
Предел выносливости	σ_{-1} , МПа	175	181,5	165	181,5
Абсцисса точки перелома кривой усталости	N , циклов	$1,51 \cdot 10^6$	$6,86 \cdot 10^6$	$3,07 \cdot 10^6$	$4,55 \cdot 10^6$
Показатель наклона левой ветви кривой усталости	m	7,6	10,66	8,36	11,08
Уравнение кривой усталости	$y = ax + b$ $y = \lg \sigma$ $x = \lg N$	$\lg \sigma = 3,1055 - 0,1396 \lg N$	$\lg \sigma = 2,9001 - 0,0938 \lg N$	$\lg \sigma = 2,9927 - 0,11951 \lg N$	$\lg \sigma = 2,8601 - 0,0903 \lg N$

Таблица 2 - Величины остаточного ресурса литых деталей тележки ЦНИИ-ХЗ (18-100) по результатам усталостных испытаний натуральных деталей и образцов

Наименование детали	Марка стали	Остаточный срок службы детали после 30 лет эксплуатации, годы, установленный		
		усталостными испытаниями натуральных деталей		по результатам испытания образцов
		авторов	ГосНИИВ	
Боковая рама	20Л	28,9	30,9	25,9
	20Г1ФЛ	–	–	39,4
Надрессорная балка	20Л	14,9	13,7	12,5
	20Г1ФЛ	–	–	21,8

Как видно из таблицы 2, сходимость результатов разных исполнителей и по различным методам определения остаточного ресурса литых деталей удовлетворительная. Однако затраты и сроки на получение результатов по испытанию образцов значительно ниже, чем при испытании натуральных деталей. Натурные испытания на выносливость боковых рам и надрессорных балок заняли 20 мес.

и стоили 15 тыс. дол. США, а образцов – 4 мес. и 1,5 тыс. дол. США.

Для проверки достоверности предлагаемой методики по оценке остаточного ресурса и потенциала по несущей способности литых деталей тележек типа ЦНИИ-ХЗ и модели 18-100 собран и систематизирован материал по их эксплуатационным повреждениям за период 1981–2004 гг. с кон-

тролем ходовых частей грузовых вагонов при плановых ремонтах в депо, а также материал по разрушению деталей в эксплуатации за период 1996–2004 гг. При контрольной проверке в депо обследовано более 3,5 млн боковых рам и 1,5 млн наддресорных балок, что позволило установить законы распределения повреждений по зонам деталей, вероятность их появления по ним и связь режимов эксплуатации вагонов и физического состояния тележек с найденной закономерностью. В боковых рамах тележек наиболее слабыми зонами являются буксовые проемы, на которые приходится до 85 % всех повреждений, причем вероятность их появления в эксплуатации составляет 0,0047 при нормируемой величине 0,01, что свидетельствует об их высоком потенциале по несущей способности. Кроме того выявлено, что наибольшая доля повреждений по буксовому проему приходится на наружный угол (32 % от общего их количества) и верхний опорный пояс (40 %), напряжения в которых при соблюдении нормативных требований по эксплуатации вагонов – минимальны и соответственно составляют не более 0,25 от допускаемых величин. Это противоречие о разрушении рам в зонах низких напряжений нашло свое отражение в дополнительных исследованиях напряженно-деформированного состояния рам, позволивших установить причины такого явления. Они заключаются в том, что при экстремальных режимах эксплуатации вагонов, при их роспуске на сортировочных горках и нарушении режимов торможения вагонов на вагонных замедлителях, а также при скоростях соударения, превышающих допускаемые правилами технической эксплуатации вагонов, происходит перераспределение напряжений по зонам рам.

В указанных экстремальных условиях могут возникать продольные силы, передающиеся на наружную плоскость буксового проема рамы, величиной до 135 кН, при которых напряжения в наружном углу буксового проема превышают допускаемые. Положение усугубляется еще и физическим состоянием боковых рам. При длительной эксплуатации вагонов в буксовых проемах возникают износы с появлением значительных продольных (до 29 мм) и поперечных (до 20 мм) зазоров между корпусами букс и челюстями рам, вызывая перекос колесных пар и кромочную передачу продольной нагрузки, отчего напряжения в наружном углу буксового проема возрастают на 14 %. Если к тому же в эту зону попадают литейные дефекты, то усталостная прочность рамы снижается на 25 %, и создается критическая ситуация по ее напряженному состоянию, что и приводит к появлению в ней трещин. Однако вероятность возникновения рассматриваемой экстре-

мальной ситуации невелика и находится на уровне 0,0047, не выходя за пределы нормируемой величины 0,01.

Аналогичная ситуация и с наддресорной балкой. Материалы по эксплуатационным повреждениям в ней позволили, как и в раме, установить закон распределения трещин по зонам детали, вероятность их появления, причины появления трещин и степень их опасности для движения поездов. Наибольшая доля появления трещин в балке приходится на подпятник (около 70 % от их общего количества), которые практически не угрожают безопасности движения поездов. Трещин по нижнему поясу, угрожающих безопасности движения, возникает не более 0,3 % от их общего количества. В целом же вероятность появления трещин в балке при эксплуатации составляет 0,0046 и не выходит за пределы нормируемой величины 0,01. То есть по несущей способности наддресорные балки равнопрочны с боковыми рамами и обладают достаточным потенциалом для работы сверх назначенного срока. Об этом свидетельствует и тот факт, что в эксплуатации разрушения рам и наддресорных балок приближаются к нулю. Так, по данным [6] железных дорог Российской Федерации за последние 9 лет (с 1996 по 2004 гг.), вероятность разрушения литых деталей по железным дорогам России составила 0,0000059.

И, наконец, накоплен значительный материал по оценке поведения литых деталей при их эксплуатации сверх назначенного срока, установленным решением Комиссии Совета по железнодорожному транспорту полномочных специалистов вагонного хозяйства железнодорожных администраций стран СНГ, Литвы, Латвии и Эстонии (пр. № 18-06-02-01/4486 от 17.04.2002 г.). За четырехлетний срок службы вагонов (2002–2006 гг.) сверх назначенного (32 года) факты о разрушении литых деталей в эксплуатации отсутствуют.

Таким образом, на основании вышеизложенных результатов исследований можно констатировать, что методика оценки остаточного ресурса (срока службы) литых деталей по результатам испытания образцов на усталостную прочность, изготовленных из деталей после выработки ими назначенного срока службы, прошла достаточную апробацию и может использоваться при продлении срока службы грузовых вагонов.

Список литературы

- 1 ГОСТ 9246-79. Тележки двухосные грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм. Технические условия. – М. : Госстандарт, 1979. – 5 с.
- 2 ОСТ 32.183-2001. Тележки двухосные грузовых вагонов колеи 1520 мм. Детали литые. Рама боковая и наддресорная балка. – М. : МПС РФ, 2001. – 22 с.
- 3 Разработка методики диагностирования литых несущих деталей (наддресорных балок и боковых рам) тележек ЦНИИ–

X3 (18–100), проработавших более 30 лет, и порядок продления срока их службы : отчет о НИР (заключит.): 62.00.50.00.01.01 / ГУП ВНИИЖТ МПС России ; рук. Л. Н. Косарев ; исполн.: В. А. Ильин [и др.]. – М., 2000. – 88 с.

4 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / разраб. ВНИИВ, ВНИИЖТ. – М., 1996. – 318 с.

5 **Сенько, В. И.** Оценка влияния эксплуатационных факторов на усталостную прочность литых деталей тележек грузовых вагонов / В. И. Сенько, И. Ф. Пастухов, М. И. Пастухов // Теория и практика машиностроения. – Мн., 2004. – № 1. – С. 4–8.

6 **Кондратов, С. П.** Безопасности движения – пристальное внимание / С. П. Кондратов // Вагоны и вагонное хозяйство. Пилотный выпуск. – М., 2004. – С. 14–23.

Получено 08.09.2006

V. I. Senko, I. F. Pastuhov, M. I. Pastuhov. Way of an estimation of a residual resource of moulded pieces of carriages of goods' cars.

Two ways of an estimation of a residual resource (service life) of cast details of carriages of goods' cars are considered: by results of fatigue tests of natural details after development of the appointed service life by them and by results of test for weariness of the samples made of details after their long operation. It is shown, that the way of an estimation of a residual resource of cast details by results of test of samples is more effective. It demands smaller financial and labour expenses, and provides higher accuracy of an estimation of a residual resource of cast details. It speaks that the residual resource of cast details by results of test of samples is defined on a limit of endurance of a material, and then and the details, expressed in pressure whereas at test of natural details it is on the peak loadings working only in one plane and considerably distinguished from spectrum dynamic to load in operation. As consequence of a zone of destruction of details in laboratory conditions of test do not coincide with zones of destruction of details in operation and consequently does not provide necessary accuracy of calculation of a residual resource of cast details.

Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2007. № 1–2(14–15)

УДК 629.113.6

В. И. СЕНЬКО, доктор технических наук, И. Ф. ПАСТУХОВ, кандидат технических наук, С. В. МАКЕЕВ, кандидат технических наук, С. В. МОКРЕНКО, руководитель группы ОНИЛ «ТТОРЕПС», Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

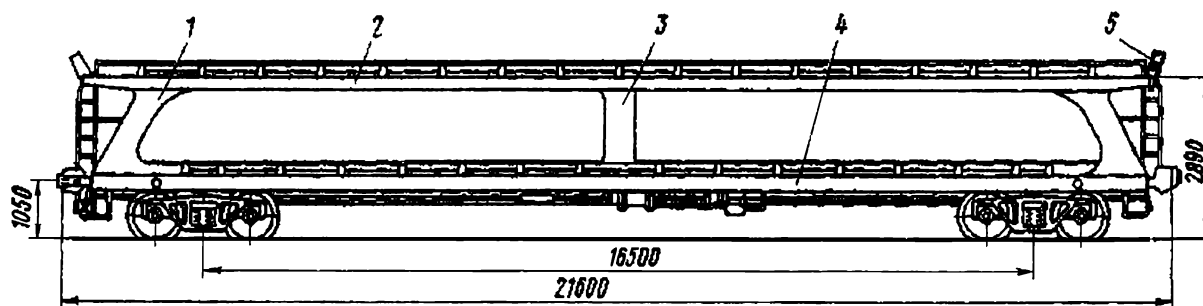
МОДЕРНИЗАЦИЯ ДВУХЪЯРУСНОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Рассматриваются конструкторские и технологические аспекты модернизации двухъярусной платформы для легковых автомобилей модели 13-479. Произведен прочностной расчет и оценка качества хода вагона.

В настоящее время бурными темпами развивается рынок доставки автомобилей по железной дороге. Эксперты оценивают этот сектор как весьма перспективный и высокодоходный. Возрастает и импорт легковых автомобилей в Республику Беларусь, что вызывает дефицит специализированных вагонов, предназначенных для перевозки легковых автомобилей. Однако существующие двухъярусные платформы для легковых автомобилей модели 13-479 не отвечают современным требованиям, так как не обеспечивают сохранность перевозимого груза,

защиту от атмосферных осадков и внешних загрязнений. В связи с этим данные вагоны долгое время не эксплуатировались и находятся на запасных путях. Модернизация этих вагонов позволит продлить их срок службы и использовать для перевозки легковых автомобилей по всей сети железных дорог колеи 1520 мм со скоростью 120 км/ч.

В настоящее время на балансе Белорусской железной дороги находится 114 двухъярусных платформ модели 13-479 для перевозки легковых автомобилей (рисунок 1).



1 – стойка концевая; 2 – рама верхнего яруса; 3 – стойка средняя; 4 – рама нижнего яруса; 5 – переездная площадка

Рисунок 1 – Специализированная двухъярусная платформа для легковых автомобилей