

Результаты определения остаточных технологических напряжений в дисковой части цельнокатаных колес грузовых и пассажирских вагонов методом тензометрии



А. В. Якушев,
канд. техн. наук,
доцент кафедры
«Вагоны и вагонное
хозяйство»
Петербургского
государственного
университета путей
сообщения Императора
Александра I (ПГУПС)



Д. П. Кононов,
канд. техн. наук,
доцент кафедры
«Технология металлов»
ПГУПС



С. О. Комиченко,
инженер
АО «Научно-внедренческий
центр «Вагоны»

Колесо – важная несущая деталь ходовой части единицы железнодорожного подвижного состава, от которой зависит безопасность движения поездов. По статистике, ОАО «РЖД» в сети ежегодно выявляется от трех до пяти изломов колес по месту перехода дисковой части в обод. Иногда изломы колес приводят к сходу вагонов с рельсов и к повреждению инфраструктуры. Приведены результаты экспериментального определения уровня остаточных технологических напряжений в зоне перехода дисковой части в обод цельнокатаных колес грузовых и пассажирских вагонов методом тензометрии.

Причинами появления усталостных трещин в дисковой части колес (рис. 1) служат неравномерный прокат или ползун на поверхности катания, создающие повышенные динамические нагрузки на дисковую часть колеса, усталость металла и внутренние остаточные напряжения, образовавшиеся в результате изготовления.

Отметим, что в нормативах [1, 2] расчет прочности колес грузовых и пассажирских вагонов выполняется с учетом различных значений толщины ободьев (в результате обточек после определенного пробега), а также вероятного появления ползунов на поверхности катания или неравномерного проката. После расчетов по [1, 2] обнаружены напряжения Мизеса до 120 МПа в зоне перехода дисковой части в обод колеса с неравномерным прокатом после финальной обточки [3]. В то же время уровень остаточных радиальных технологических напряжений растяжения в зоне перехода дисковой части в обод может достигать 70 МПа [4] в зависимости от способа изготовления, или около 60 % от расчетных напряжений в эксплуатации. Образование остаточных растягивающих радиальных напряже-

ний ускоряет зарождение окружающих усталостных трещин в дисковой части колеса (см. рис.1) вследствие наложения на эксплуатационные напряжения.

Учитывая изложенные обстоятельства, выявление уровня и направления остаточных технологических напряжений в зоне перехода дисковой части в обод колеса актуально для получения наиболее полного представления о напряженном состоянии колес. Мы экспериментально определили уровень остаточных технологических напряжений в зоне перехода дисковой части в обод цельнокатаных колес грузовых и пасса-



Рис. 1. Усталостная трещина колеса в зоне перехода плоскоконической дисковой части в обод длиной 200 мм после семи лет эксплуатации

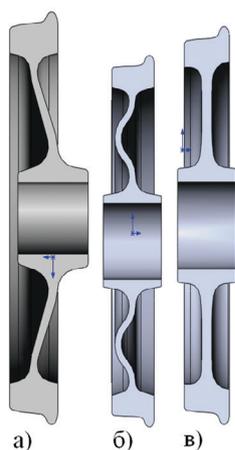


Рис. 2. Диаметральные разрезы исследуемых колес: а) по ГОСТ 10791-2011; б) типа ВА004; в) для электропоездов «Ласточка» (Desiro RUS)

жирских вагонов методом тензометрии.

Объектами исследований выбраны цельнокатаные колеса следующих типов:

1) с плоскоконическим диском, диаметром по кругу катания 957 мм, изготовленное по ГОСТ 10791-2011 (приложение А, рис. А1, сталь марки 2) для грузового вагона с осевой нагрузкой 23,5 тс и с конструктивной скоростью 120 км/ч (рис. 2а);

2) с плоскоконическим диском, диаметром по кругу катания 957 мм, изготовленное по ГОСТ 10791-2011 (приложение А, рис. А1, сталь марки Т) для грузового вагона с осевой нагрузкой 23,5 тс и с конструктивной скоростью 120 км/ч (рис. 2а);

3) с криволинейным диском, диаметром по кругу катания 920 мм типа ВА004, изготовленное по EN 13262 из стали марки ER7 (химический состав: $C < 0,52\%$; $Si < 0,40\%$; $Mn < 0,80\%$; $P < 0,02\%$; $S < 0,02\%$; $Cr < 0,30\%$; $Cu < 0,30\%$; $Mo < 0,08\%$; $Ni < 0,30\%$; $V < 0,06\%$) для колесных пар с осевой нагрузкой 22,5 тс и с максимальной скоростью 120 км/ч (рис. 2б);

4) с плоским диском, моторное, диаметром по кругу катания 920 мм, изготовленное по ТУ 0943-265-01124323-2011 из стали марки ER9 (химический состав: $C < 0,60\%$; $Si < 0,40\%$; $Mn < 0,80\%$; $P < 0,020\%$; $S < 0,015\%$; $Cr < 0,30\%$; $Cu < 0,30\%$; $Mo < 0,08\%$; $Ni < 0,30\%$; $V < 0,06\%$) для электропоездов «Ласточка» (Desiro RUS) с конструктивной скоростью 160 км/ч (рис. 2в).

Конфигурации дисков исследуемых колес приведены на рис. 2.

Исследованиям подвергались два колеса с плоскоконическим диском, одно колесо с криволинейным диском

типа ВА004 и одно колесо для электропоезда «Ласточка» (Desiro RUS). Таким образом, всего исследовано четыре колеса.

Все колеса до испытаний находились на этапе поставки с завода-изготовителя ОАО «Выксунский металлургический завод» из г. Выкса Нижегородской области.

Колеса с плоскоконическим диском по ГОСТ 10791-2011 изготовлены по серийной технологии. Колеса типов ВА004 и Desiro RUS находятся на стадии отработки технологии термической обработки ободьев.

Методика определения остаточных технологических напряжений в ободьях и в дисковых частях основана на принципе последовательного снятия остаточных напряжений после отрезания фрагментов и регистрации деформаций на поверхности с помощью тензометров. Линейная экстраполяция поверхностных деформаций позволяет установить уровень деформаций внутри обода и диска.

Использованный метод регламентирован стандартом EN 13262:2004+A2:2011 (D) «Продукция для железных дорог – Колесные пары и тележки – Колеса – Требования к изделиям. Немецкая редакция» и ГОСТ 32207-2013 «Колеса железнодорожного подвижного состава. Методы определения остаточных напряжений».

Остаточные напряжения в колесах типов ВА004 и Desiro RUS оценивались по EN 13262:2004+A2:2011 (D), в колесах с плоскоконическим диском – по ГОСТ 32207-2013. Требования стандартов различаются в порядке определения остаточных напряжений в ободьях колес. В части оценки остаточных напряжений в зоне перехода диска в обод колеса требования совпадают.

Подготовка колес для определения остаточных напряжений в зоне перехода дисковой части в обод по немецкому и российскому стандартам заключалась в наклейке двухкомпонентных тензорезисторов ТКБД2-5-200 в радиальном направлении (рис. 3), в их защите жаростойким герметиком от попадания брызг во время огневой вырезки сектора из колеса и смазочно-охлаждающей жидкости при последующей механической разрезке сектора на ленточнопильном станке. Измерительные схемы из тензорезисторов подвергались балансировке с помощью тензометрической аппаратуры МС-036. Во избежа-

ние нагрева измерительных схем выше 50 °С вблизи отмечалась площадка для измерения температуры бесконтактным пирометром Testo 845 до и во время газовой резки. Хорда вырезаемого сектора равнялась 390 мм для всех колес. Измерительные схемы располагались посередине сектора.

Отделение сектора с тензорезисторами при подключенной тензометрической аппаратуре от колеса выполнялось огнем способом. После каждого реза проводили водяное охлаждение измерительных схем до температуры 15 °С. Показания с тензорезисторов регистрировали после полного отделения сектора от колеса и остывания до первоначальной температуры. Неизменность показаний тензорезисторов достигалась через 20–30 мин после окончания огневой вырезки.

На следующем этапе осуществлялась механическая разрезка отделенного сектора на ленточнопильном станке. Линия первого механического реза, параллельная хорде сектора, проходила на расстоянии 15–20 мм от измерительной схемы в зоне перехода дисковой части в обод. Линия последнего механического реза проходила по нижней границе обода. Таким образом, после полного высвобождения зоны перехода диска в обод колеса зарегистрированы остаточные поверхностные деформации, которые суммировались после каждого реза.

Обработка полученных результатов заключалась в расчете радиальных напряжений после каждого реза для каждой розетки, приведения их к оси симметрии дисковой части в зоне перехода в обод и в построении эпюр распределения остаточных радиальных напряжений.



Рис. 3. Расположение измерительных схем на колесе с размеченным сектором для последующего отделения огнем способом

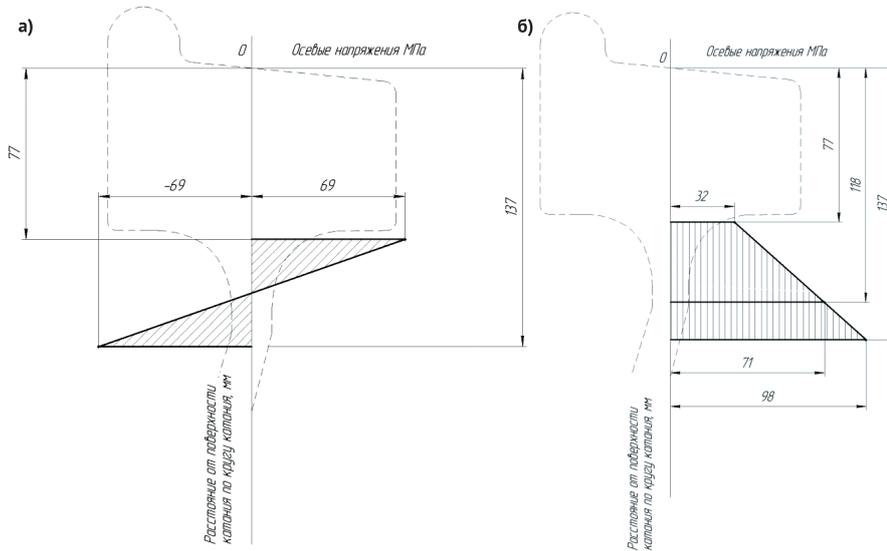


Рис. 4. Итоговые эпюры распределения осевых (радиальных) остаточных напряжений в цельнокатаных колесах по ГОСТ 10791-2011: а) из стали марки 2; б) из стали марки Т

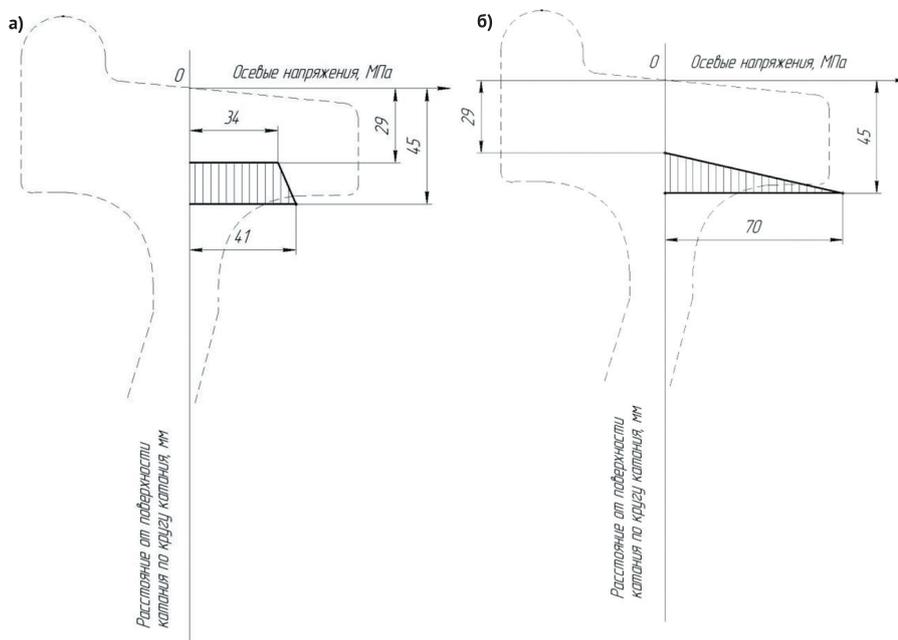


Рис. 5. Итоговые эпюры распределения осевых (радиальных) остаточных напряжений в цельнокатаных колесах: а) типа BA004; б) для электропоездов «Ласточка» (Desiro RUS)

Радиальные напряжения в розетках после каждой разрезки рассчитывались по формуле из теории упругости:

$$\sigma_i^{axl} = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_i^{axl} + \mu\varepsilon_i^{cir}),$$

где $E = 2,1 \times 10^5$ МПа – модуль упругости стали колеса; $\mu = 0,28$ – коэффициент Пуассона; ε_i^{axl} – осевая (радиальная) деформация; ε_i^{cir} – окружная деформация; i – номер розетки.

Средние радиальные напряжения после каждого реза, приведенные к оси симметрии дисковой части в зоне перехода в обод, определялись по формуле [EN]

$$\sigma^{axl} = \frac{a}{a+b} \sigma_I^{axl} + \frac{b}{a+b} \sigma_E^{axl}, \quad (1)$$

где a и b – расстояния по толщине от мест наклейки розеток с внутренней (I – internal) и с наружной (E – external) стороны колеса соответственно до оси симметрии дисковой части.

В результате расчетов по формуле (1) с учетом полученных экспериментальных данных построены эпюры распределения радиальных остаточных технологических напряжений в месте перехода диска в обод для цельнокатаных колес четырех типов (рис. 4, 5). Как видно из рис. 4, растягивающие радиальные остаточные напряжения в зоне перехода диска в обод составили 69 МПа для колеса по ГОСТ 10791-2011 из стали марки 2 и 71 МПа для колеса из стали марки Т. Растягивающие

радиальные остаточные напряжения в колесах BA004 и Desiro RUS составили 41 МПа и 70 МПа соответственно для зон перехода диска в обод (рис. 5).

Измеренные остаточные напряжения согласуются с результатами более ранних работ [4] по характеру и уровню остаточных напряжений в переходной части колес с плоскоконическим диском. Полученные данные могут быть использованы в расчетах колес на прочность при действии эксплуатационных нагрузок для создания предварительной напряженности колес ввиду закалки ободьев на производстве.

Таким образом, установлено, что в зонах перехода дисковых частей в обод в колесах трех типов имеются растягивающие радиальные остаточные напряжения после закалки обода колеса. Они могут суммироваться с напряжениями от эксплуатационных нагрузок и способствовать ускорению стадии зарождения окружных усталостных трещин.

Значения растягивающих радиальных остаточных напряжений в зонах перехода диска в обод составляют 70 МПа в колесах с плоскоконическим диском, а также с криволинейным и плоским диском. Полученные значения остаточных напряжений можно использовать в расчетах колес на прочность при действии эксплуатационных нагрузок, чтобы установить влияние остаточных напряжений на зарождение окружных усталостных трещин. ■

Литература

1. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 319 с.
2. Нормы для расчета и проектирования пассажирских вагонов локомотивной тяги железных дорог колеи 1520 мм Российской Федерации – М.: ФГУП ВНИИЖТ-ФГУП ГосНИИВ, 2005. 214 с.
3. Архипова А. А., Якушев А. В., Гетманец Р. М., Комиченко С. О. Результаты расчета коэффициента запаса прочности колеса с коническим диском тележки грузового вагона с помощью программ Mathcad – Интернет-журнал «Науковедение». 2014. Вып. 5 (24), сент.–окт. С.1–11.
4. Миронов П. Ф. Термическое упрочнение и напряженное состояние цельнокатаных железнодорожных колес: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01. Днепропетровск, 1984. 196 с.