

В. О. ЗАПЛЕТНЮК

Т. Б. БРЫЛОВА, канд. техн. наук, доц.

Е. В. КОНДРАТЕНКО, канд. техн. наук, доц.

Омский государственный университет путей сообщения (Омск, Россия)

КОМПЛЕКСНЫЙ МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ КАК ОСНОВА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НАДРЕССОРНЫХ БАЛОК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Аннотация. В статье рассмотрена актуальная задача повышения безопасности эксплуатации грузовых вагонов за счёт внедрения методов прогнозирования остаточного ресурса надрессорных балок. На основе анализа конструкции и условий эксплуатации балок типа 18-100 из стали 20ГЛ обоснован переход от констатирующей дефектоскопии к диагностике с элементами прогноза. Показано, что сочетание магнитопорошкового и вихретокового методов с оценкой изменения магнитных характеристик материала позволяет создать параметрическую основу для расчёта остаточного ресурса. Предложена эмпирическая модель прогнозирования, использующая диагностический параметр «тангенс износа», и приведены результаты её апробации в условиях вагонного депо.

Ключевые слова: надрессорная балка, грузовые вагоны, магнитопорошковый контроль, вихретоковый контроль, остаточный ресурс, тангенс износа, прогнозирование.

Надрессорная балка модели 18-100 – одна из наиболее ответственных литых деталей тележки грузового вагона. Она воспринимает нагрузки от кузова через подпятник и передаёт их на рессорные комплекты (рис.1.). В эксплуатации динамические нагрузки достигают 25 тс на ось [5]. В зонах концентрации напряжений (углы карманов, радиусы перехода, нижний пояс) возникают усталостные трещины, которые при критическом развитии могут привести к разрушению балки и сходу состава [6].

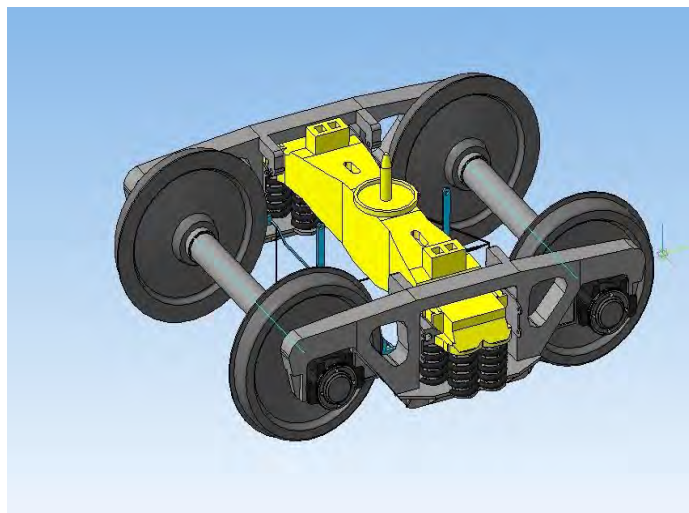


Рис. 1. Надрессорная балка

Существующий магнитный метод контроля выявляет уже возникшие дефекты, но не позволяет прогнозировать остаточный ресурс детали до появления явных трещин. Для перехода к ремонту по фактическому состоянию необходимы диагностические параметры, чувствительные к накоплению повреждений, включая состояние материала, структуру, уровень напряжений и скрытые дефекты.[4]

В работе обосновано применение комплексного магнитного контроля (магнитопорошковый + вихретоковый) для прогнозирования остаточного ресурса надрессорных балок. Сочетание методов повышает точность диагностики и полноту оценки состояния деталей.

- Оба метода требуют доступа к контролируемой поверхности для намагничивания, нанесения индикатора и осмотра.

- Порог чувствительности зависит от шероховатости, зазора и кривизны поверхности.

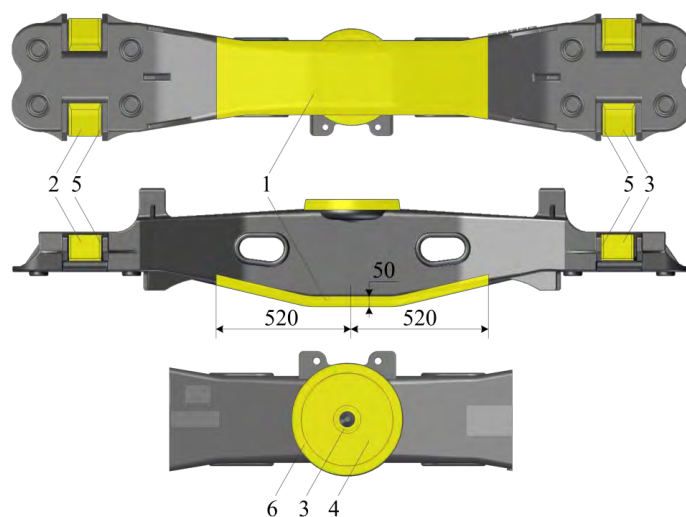
- Оценка остаточного ресурса требует не только выявления дефектов, но и анализа их влияния на прочность и долговечность с учётом условий эксплуатации.

Таким образом, сочетание магнитопорошкового и вихретокового методов позволяет получить более полную картину технического состояния

наддресорных балок и повысить точность прогнозирования их остаточного ресурса.

Рассматриваемая наддресорная балка типа 18-100 имеет длину 1800 мм, ширину 200 мм, высоту 150 мм, массу 120 кг. Материал – сталь 20ГЛ. Согласно требованиям ГОСТ 32400-2013 «Рама боковая и балка наддресорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Технические условия», изделия из стали этой марки должны иметь высокие значения прочностных и пластических характеристик: предел текучести не менее 245 МПа, предел прочности ≥ 500 МПа), относительные удлинение – не менее 20 % и сужение – не менее 30%, ударную вязкость КСЧ при +20°C не менее 0,50 МДж/м² и при – 60°C не менее 0,25 МДж/м², а КСЧ при – 60°C (A_{KV}) не менее 0,15 МДж/м². Такие свойства достигаются за счёт мелкодисперсной феррито-перлитной структуры и отсутствия грубых карбидных сеток и неметаллических включений [2].

Основные зоны контроля: нижний пояс, карманы для рессорных комплектов, радиусы перехода, подпятник (рис.2). Согласно ГОСТ 32699-2014 «Рама боковая и балка наддресорная литые трёхэлементных двухосных тележек грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Методы неразрушающего контроля», ПР НК В.3-2013 «Правила неразрушающего контроля деталей тележек грузовых вагонов при ремонте. Специальные требования» Методы НК должны обеспечивать выявление дефектов, в том числе обязательным является визуально-измерительный и магнитопорошковый контроль поверхностных трещин [1, 3].



1 – нижний пояс и прилегающие участки боковых поясов; 2 – наклонная плоскость для клина; 3 – внутренний бурт подпятника; 4 – опорная поверхность подпятника; 5 – угол между ограничительным буртом и наклонной плоскостью; 6 – наружный бурт подпятника.

Рис. 2. Зоны обязательного НК наддресорной балки

Магнитопорошковый контроль выполняется в соответствии с требованиями ПР НК В1, ПР НК В.3, ТИ НК В.31-2-2023 способом приложенного поля с помощью переносных электромагнитов (портативный

приставной электромагнит типа МЭД-120 (ТУ 4276-012-01124336-2001), МЭМ-9 (ТУ 4276-003-30241810-2011), МСН 20.36 (МКИЯ.427631.050 ТУ), Magnaflux серии: Y1, Y2, Y6 или Y7) с использованием КМС ДИАГМА 1200 ТУ 2662-003-41086427-97 (30 ± 5) г до 1 л водопроводной воды [3].

Следует отметить, что действующая нормативно-техническая документация не предусматривает количественной оценки изменения магнитных характеристик стали в процессе эксплуатации и не содержат критериев прогнозирования остаточного ресурса [4].

Реальная дефовская статистика наглядно иллюстрирует эту нормативную недоработку: как показывают отчетные показатели и собственные наблюдения в депо Омск-Сортировочный за 2025 год, из 2000 балок, прошедших неразрушающий контроль, 11% (220) забраковано, 24% (480) направлено в ремонт наплавкой (при глубине дефекта не более 30% толщины), 65% (1300) признаны годными (рис. 3). Следовательно, большинство деталей эксплуатируются до появления явных дефектов, а возможность раннего прогнозирования их остаточного ресурса остаётся нереализованной.

Для восполнения этого пробела в работе вводится параметр «тангенс износа». Физический смысл параметра связан со скоростью деградации магнитной структуры стали под циклическими нагрузками, служит важным инструментом в диагностике усталостного состояния сталей.

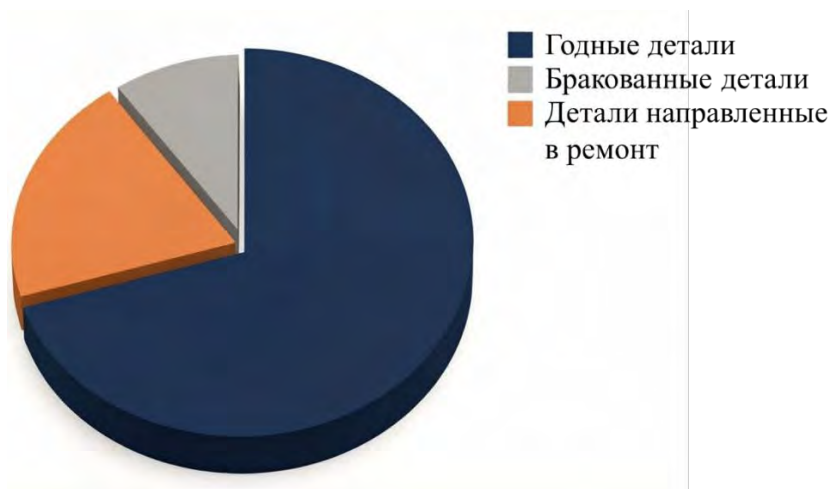


Рис. 3. Результаты контроля надрессорных балок

При циклическом нагружении ферромагнетика изменяются его коэрцитивная сила и магнитная проницаемость вследствие развития дислокационной структуры и микропластических деформаций в зонах, предшествующих образованию макротрещины. Предлагается следующее определение

$$\operatorname{tg}(\delta) = \frac{\Delta\mu}{\mu_0\Delta\varepsilon}, \quad (1)$$

где $\Delta\mu/\mu$ – относительное изменение магнитной проницаемости;

$\Delta\varepsilon$ – накопленная пластическая деформация, оцениваемая по твёрдости или пробегу.

Комплексный метод контроля включает два этапа [7]. Первый этап – стандартный магнитопорошковый контроль по ГОСТ 56512-2015 и ГОСТ 32699-2014 с использованием намагничивающего устройства МЭМ-9. Цель – выявление имеющихся трещин и определение состояния «годен/ремонт/брак». Второй этап – измерение относительного изменения магнитной проницаемости вихретоковым дефектоскопом (например, ВД-12НФ) в контрольных точках, свободных от дефектов. Измерения проводят на нижнем поясе и в районе углов карманов на частотах 10 и 100 кГц. Сравнение с паспортными значениями (или результатами предыдущих контролей) позволяет оценить степень накопленной усталостной повреждаемости.

Апробация методики проведена в период 2026 года на базе вагонного ремонтного депо Омск-Сортировочный. Обследовано 24 надрессорные балки различных годов выпуска (1998–2023) с известной наработкой. Для каждой балки фиксировали год выпуска, пробег, результаты МПК, значения $\Delta\mu/\mu$ полученные вихретоковым методом, и дальнейшую судьбу (годна, ремонт, брак). Предварительный анализ показал корреляционную связь между изменением магнитной проницаемости и остаточным ресурсом: при увеличении $\Delta\mu/\mu$ более чем на 15 – 20% от исходного уровня вероятность образования усталостной трещины в ближайшие два года превышает 70%.

На основе измерений получены усреднённые значения тангенса износа на пробеге 200 тыс. км вихретоковым методом на частоте 10 кГц (табл. 1).

Табл.1. Результаты и модель прогнозирования остаточного ресурса

Группа балок (год выпуска)	Средний $\text{tg}(\delta)$ отн. ед.	Доля балок с трещинами, %
1996–2000	0,11	2%
2006–2010	0,17	8%
2016–2020	0,23	15%
2021–2025	0,27	22%

Современные балки имеют повышенные значения $\text{tg}(\delta)$ уже при малых пробегах, что объясняется оптимизацией массы и повышением рабочих напряжений до 25 тонн без адекватного увеличения усталостной прочности.

Критическое значение $\text{tg}(\delta)$, при котором вероятность разрушения превышает 50%, принято равным 0,40 (определено по наблюдениям для забракованных балок). Начальное значение $\text{tg}(\delta)$ для новой балки составляет 0,08. Остаточный ресурс по пробегу $L_{\text{ост}}$ (тыс. км) предлагается рассчитывать по формуле

$$L_{\text{ост}} = L_{\text{баз}} \cdot k_{\text{рем}} \left(1 - \frac{\text{tg}(\delta_{\text{тек}}) - \text{tg}(\delta_0)}{\text{tg}(\delta_{\text{кр}}) - \text{tg}(\delta_0)} \right), \quad (2)$$

где $L_{\text{баз}}$ – средний ресурс при отсутствии повреждений (700 тыс. км для балок до 2005 г. и 500 тыс. км – после 2015 г., согласно данным завода-изготовителя и ГОСТ 34502-2018); $k_{\text{рем}}$ – коэффициент ремонта: без ремонта – 1,0, наплавка карманов – 0,85.

Рассмотрим ситуацию с наддрессорной балкой 2021 года выпуска: после 250 тысяч километров пробега у неё замеры $\text{tg}(\delta) = 0,28$. Ремонт не делали. Для таких современных балок (после 2015 года) базовый ресурс $L_{\text{баз}}$ принимаем 500 тыс. км. Рассчитаем остаточный ресурс по пробегу $L_{\text{ост}}$ по выражению (2), получаем 187,5 тыс. км. Следовательно, согласно расчетным данным по нашей модели наддрессорная балка должна быть в эксплуатации ещё около 188 тыс. км до браковки. При среднем годовом пробеге 80 тыс. км это примерно 2,3 года безопасной работы [7].

Заключение. В результате работы показано, что существующая система НК, регламентированная ГОСТ 32699-2014, надёжно выявляет дефекты, но не позволяет прогнозировать остаточный ресурс деталей без явных трещин. Обоснована возможность использования комплексного магнитного контроля (магнитопорошкового контроля + вихретоковые измерения) для оценки усталостной повреждаемости материала. Предложен диагностический параметр «тангенс износа» (относительное изменение магнитной проницаемости) и разработана эмпирическая модель прогнозирования остаточного ресурса наддрессорной балки. Результаты апробации в депокских условиях подтвердили корреляцию магнитных свойств с наработкой до отказа. Методика может быть рекомендована для внедрения на предприятиях в рамках перехода к ремонту по фактическому состоянию.

Список литературы

1. ГОСТ 32699-2014. Рама боковая и балка наддрессорная литые трёхэлементных двухосных тележек грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Методы неразрушающего контроля. – Москва: Стандартинформ, 2015.
2. ГОСТ 32400-2013. Рама боковая и балка наддрессорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Техн. условия. – Москва: Стандартинформ, 2015.
3. ПР НК В.3-2013. Правила неразрушающего контроля деталей тележек грузовых вагонов при ремонте. Специальные требования. – Москва: Изд-во стандартов, 2013.
4. ГОСТ 56512-2015. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. – Москва: Стандартинформ, 2015.
5. ГОСТ 34502-2018. Детали литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Методы ресурсных испытаний. Ч. 2. Балка наддрессорная. – Москва: Стандартинформ, 2018.
6. РД 32 ЦВ 052-2009. Общее руководство по ремонту. Ремонт тележек грузовых вагонов тип 2 по ГОСТ 9246 с боковыми скользунами зазорного типа. – М.: Транспорт, 2010.
7. Мажидов, Ф. А. Оценка остаточного срока службы грузового вагона с учётом его технического состояния: дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / Ф. А. Мажидов. – Москва: МИИТ, 2016. – 167 с.

Контакты:

zapletnyukv@mail.ru (Заплетнюк Валерия Олеговна);

brylovatata@mail.ru (Брылова Татьяна Борисовна);

kondratenkoev@list.ru (Кондратенко Евгений Владимирович).