

В. Л. ГОРОБЕЦ, Д. А. ЯГОДА, П. А. ЯГОДА (ДИИТ)

ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЦИКЛИЧЕСКИМ НАГРУЗКАМ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ РАВНОМЕРНОЙ КОРРОЗИИ

В умовах тривалої експлуатації несучі конструкції рухомого складу піддаються дії зовнішнього середовища. Це викликає їх рівномірну корозію та зниження несучої здатності конструкції. Стаття присвячена методиці врахування рівномірної корозії в задачах прогнозування залишкового ресурсу залізничних несучих конструкцій.

В условиях длительной эксплуатации несущие конструкции подвижного состава подвергаются действию внешней среды. Это вызывает их равномерную коррозию и снижение несущей способности конструкций. Статья посвящена методике учета равномерной коррозии в задачах прогнозирования остаточного ресурса железнодорожных конструкций.

In conditions of long-term operation the bearing structures of a rolling stock are subject to action of an environment. It causes their uniform corrosion and decrease in bearing ability of the structures. The article is devoted to a technique of the account of uniform corrosion in problems of forecasting of a residual resource of railway structures.

Одним из основных факторов, способствующих потере несущей способности несущих конструкций (НК) подвижного состава (ПС), является их коррозионный износ [1...3]. В ряде случаев части железнодорожных НК подвергаются более интенсивному коррозионному воздействию за счет локальной концентрации агрессивных сред. К таким НК относятся консольные части рам тележек и надрессорных балок пассажирского и мотор-вагонного подвижного состава со стороны расположения фановых труб вагонов (рис. 1).



Рис. 1. Коррозионный износ консольной части надрессорной балки тележки электропоезда ЭР1 зав. № 033 (январь 2005 г.)

Поскольку прогноз срока службы НК ПС наиболее часто делается на основании оценки их сопротивления усталости при фактическом состоянии коррозии, задача прогноза дальнейшего возможного коррозионного воздействия окружающей среды является актуальной.

Прогнозирование изменения характеристик прочности НК при длительном действии слабо-

агрессивной среды может быть сведено к следующей процедуре [8]:

- аналитическая оценка напряженного состояния НК как функции толщины δ_i контролируемых $i = 1..n$ несущих элементов при действии расчетных нормативных нагрузок [4...6];
- обследование фактического состояния коррозионного износа n исследуемых несущих элементов и индивидуальная оценка скорости их равномерной коррозии для единицы ПС;
- прогнозирование изменения толщины каждой из n контролируемых НК на заданный промежуток времени с использованием корректируемой линейной модели прогноза;
- оценка прогнозируемого напряженно-деформированного состояния (НДС) НК и вывод о её прочности.

Практическая реализация указанной процедуры, особенно для ПС иностранного производства, серьезно осложнена следующими установленными экспериментально факторами:

- несоответствие проектных размеров толщины основных НК данным конструкторской документации;
- несовпадение характеристик материалов, примененных для постройки НК разными производителями ПС в различные периоды времени.

На рис. 2 приведена фактическая зависимость толщины боковой балки дизель-поезда Д1 (производство Венгрии, фирма MVAG) от пробега, нелинейный неоднозначный характер которой может быть объяснен неоднородностью объектов обследования разного возраста. Подобная ситуация наблюдается, например, в парке пассажирских вагонов, построенных разными производителями в различные периоды времени.

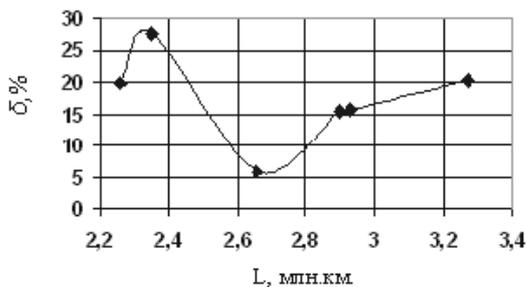


Рис. 2. Зависимость процентного уменьшения толщины полки боковой продольной балки рамы кузова δ дизель-поезда Д1 от пробега L

Это делает затруднительным построение адекватных аналитических моделей коррозионного износа [7]. Поэтому предлагается методика индивидуального прогнозирования степени равномерного коррозионного износа НК ПС, снижающая влияние указанных факторов.

Наиболее целесообразным представляется расчет коррозионного влияния с учетом следующих предположений: а) начальная толщина НК соответствует проектной (с учетом максимального положительного допуска); б) в случае превышения на момент контроля толщиной НК проектной величины она принимается равной проектной толщине.

С учетом указанных предположений, скорость равномерной коррозии α_k составляет:

$$\alpha_k = \frac{\Delta_{k \text{ ном}} - \Delta_{k \text{ факт}}}{L_{\text{факт}}} \cdot l_p \quad \uparrow \quad \Delta_{k \text{ факт}} < \Delta_{k \text{ ном}}, \quad (1)$$

$$\alpha_k = 0 \quad \uparrow \quad \Delta_{k \text{ факт}} \geq \Delta_{k \text{ ном}}.$$

Расчетное соотношение для прогнозирования величины равномерной коррозии:

$$\Delta_{k \text{ прогн}} = \Delta_{k \text{ ном}} - \alpha_k T_p, \quad (2)$$

где $\Delta_{k \text{ ном}}$ – проектная толщина k -го элемента НК, мм; $\Delta_{k \text{ факт}}$ – фактическая толщина k -го элемента НК, мм; $\Delta_{k \text{ прогн}}$ – прогнозируемая толщина НК на момент проведения следующего

ремонта (контроля); T_p – межремонтный период, год; $L_{\text{факт}}$ – суммарный фактический пробег единицы ПС на момент контроля, км; l_p – среднегодовой пробег ПС, км/год.

Прогноз остатка толщины (в %) контролируемых несущих конструкций при этом может выполняться по формуле:

$$\delta_k = \frac{\Delta_{k \text{ прогн}}}{\Delta_{k \text{ ном}}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Для оценки срока перехода элементов НК в предельное состояние это соотношение используется в сочетании с результатами расчета по прогнозу параметров их НДС.

Ниже, в табл. 1 и на рис. 3 приведены оценки постоянной скорости равномерной коррозии, полученные на основе натурного обследования боковых балок кузовов дизель-поездов Д1 Львовской железной дороги.

Таблица 1

Скорость равномерной коррозии боковых балок дизель-поездов Д1 в зависимости от пробега

Пробег L , млн.км	Срок службы T , год	Изменение толщины		α_k , мм/год
		δ , %	Δ , мм	
2,26	19	19,8	1,98	0,104
2,35	20	27,6	2,76	0,138
2,66	22	5,87	0,587	0,027
2,9	24	15,5	1,55	0,065
2,93	25	15,7	1,57	0,063
3,27	27	20,3	2,03	0,075

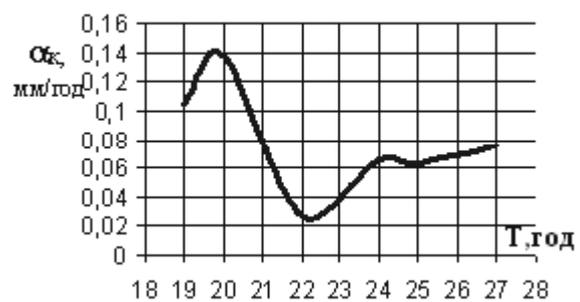


Рис. 3. График зависимости скорости равномерной коррозии от срока службы

Остановимся далее на зависимости характеристик НДС НК от коррозионного воздействия на них внешней среды.

В работе [8] на основании разработанной для этого подробной конечно-элементной модели рамы тележки пассажирского вагона

КВЗ-ЦНИИ (рис. 4) определена зависимость максимального напряжения при расчетной нормативной вертикальной симметричной нагрузке от толщины полок продольных балок рамы.

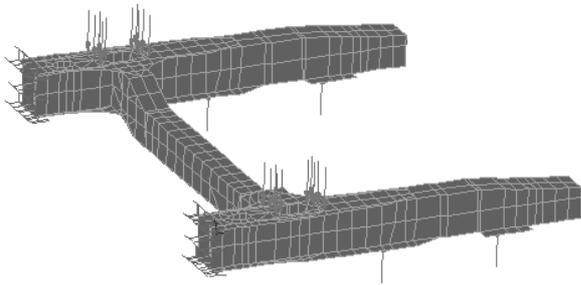


Рис. 4. Модель рамы тележки пассажирского вагона (вертикальная симметричная нагрузка)

На рис. 5, 6 приведены поля эквивалентных напряжений в раме тележки от вертикальной симметричной нагрузки.

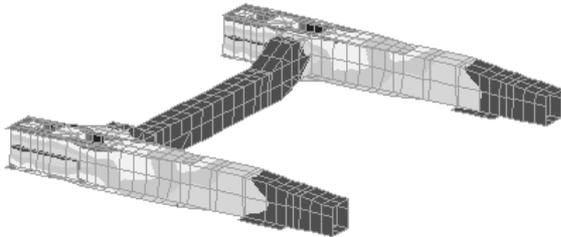


Рис. 5. Поля эквивалентных напряжений при номинальных толщинах (максимальное значение 74,6 МПа)

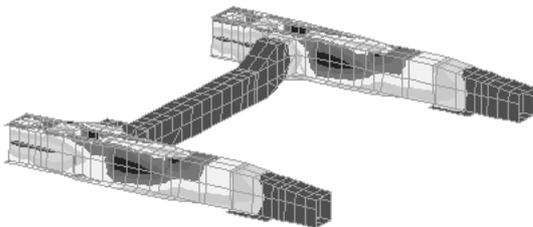


Рис. 6. Поля эквивалентных напряжений при уменьшении толщин полок продольных балок на 7 мм (максимальное значение 194 МПа)

Результаты расчета удобно представить в виде графика зависимости максимального эквивалентного напряжения от уменьшения толщины полок (рис. 7).

Далее, были выполнены расчеты от вертикальной кососимметричной нагрузки и от действия горизонтальной поперечной силы.

На рис. 8, 9 приведены зависимости максимальных эквивалентных напряжений как функции уменьшения толщины полки продольной балки рамы тележки при расчетных нормативных нагрузках [4]. При этом на рис. 8 показана

зависимость максимального напряжения в раме тележки от уменьшения толщины элементов по отношению к максимальному напряжению при вертикальном симметричном нагружении, а на рис. 9 – по отношению к максимальному исходному напряжению для соответствующего типа нагружения (при номинальной толщине всех элементов). На рис. 8, 9: линия 1 – вертикальная кососимметричная нагрузка, линия 2 – вертикальная симметричная нагрузка и линия 3 – горизонтальная поперечная нагрузка.

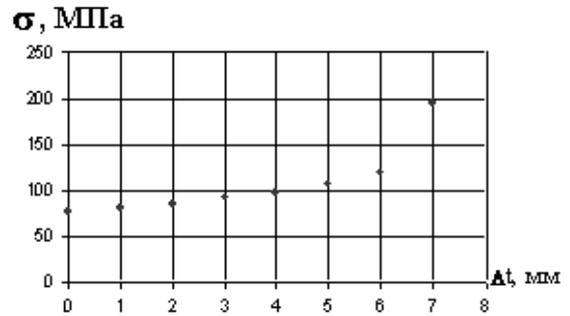


Рис. 7. График зависимости максимального напряжения от уменьшения толщины полок продольных балок рамы при вертикальном симметричном нагружении

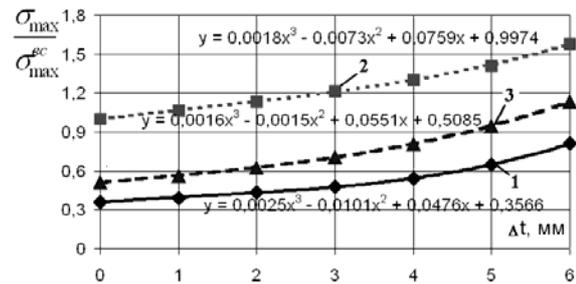


Рис. 8. Зависимость максимального напряжения в раме тележки пассажирского вагона от величины процента остатка толщины полок продольных балок (по отношению к наибольшему напряжению от вертикального симметричного нагружения)

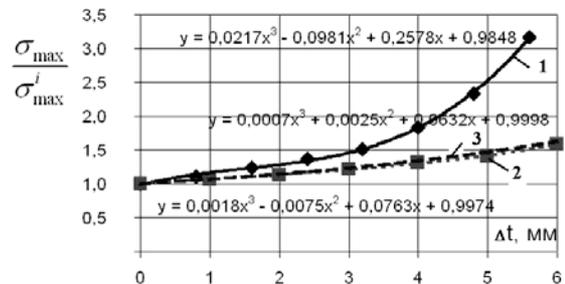


Рис. 9. Зависимость максимального напряжения в раме тележки пассажирского вагона от величины процента остатка толщины полок продольных балок (по отношению к наибольшему напряжению каждого типа нагружения)

Как видно из рис. 8, более тяжёлым типом нагружения рамы тележки в абсолютных величинах напряжений является вертикальная симметричная нагрузка, а из рис. 9 следует, что НК рамы в относительных единицах наиболее чувствительна к вертикальному кососимметричному нагружению.

Зависимости на рис. 8, 9 могут быть аппроксимированы полиномами вида

$$P_k(\delta_k) = \sum_{j=0}^n p_{jk} \delta_k^j, \quad (4)$$

где $P_k(*)$ – полиномиальная аппроксимация функции влияния уровня коррозии на НДС k -ой НК; n – порядок полинома; p_{jk} – коэффициенты аппроксимации.

В табл. 2 приведены параметры аппроксимирующих полиномов для расчетных нормативных нагрузок.

Таблица 2

Параметры аппроксимирующих полиномов для расчетных нормативных нагрузок.

№ коэф. полинома j	Коэффициенты полиномов p_j при расчетной нормативной [4] нагрузке		
	Вертикальная симметричная	Вертикальная кососимметричная	Поперечная горизонтальная
0	0,997	0,985	0,999
1	0,076	0,258	0,063
2	0,007	0,098	0,0025
3	0,018	0,0217	0,0007

Толщина НК, в предположении её дальнейшей коррозии, является функцией времени (согласно выражению (2)). Поэтому, при постоянном уровне и характере внешнего силового воздействия на НК, максимальные напряжения в ней со временем возрастают. Этот факт может быть учтен введением поправочных коэффициентов, характеризующих нарастание напряжений при постепенной потере несущей способности НК.

Введем поправочный коэффициент, определяемый как отношение максимальных напряжений в НК при соответствующем типе нагружения (который определяется на основании оценки разрушений в эксплуатации или гипотез о возможных его причинах) в виде:

$$SIC_k(t_+) = \frac{P_k[\delta_k(t_+ + t_0)]}{P_k[\delta_k(t_0)]}, \quad (5)$$

где $SIC(*)$ (stress increasing coefficient) – поправочный коэффициент, характеризующий масштаб возрастания напряжений в течение периода прогноза; t_+ – время прогноза, измеряемое от момента контроля толщины; t_0 – возраст НК на момент контроля его толщины.

Для оценки ресурса НК учет поправочного коэффициента (5) возможен двумя путями:

- масштабирование в сторону увеличения расчетных напряжений, характеризующих нагруженность НК в эксплуатации в зависимости от текущего времени продления их срока службы t_+ ;
- масштабирование в сторону уменьшения расчетных напряжений, реализованных в процессе ускоренных стендовых вибрационных испытаний [9] НК до разрушения.

Поскольку стендовые вибрационные испытания происходят в ускоренном, заранее неизвестном масштабе времени, более приемлемым представляется первый путь.

Тогда расчетные соотношения расчета остаточного ресурса [5, 6] претерпевают следующие изменения.

При последовательном действии n_1, n_2, \dots, n_l рабочих циклов с амплитудами напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_l > (\sigma_{-1Dm})_{v-1}$, где v – количество лет E эксплуатации, который объект предположительно имел место на данный момент, пересчитывается величина $(\sigma_{-1Dm})_v$ v -того значения предела усталости [5, 6]:

$$\left. \begin{aligned} (\sigma_{-1Dm})_v &= \frac{(\sigma_{-1Dm})_{v-1} \left(1 - \frac{n_v}{N_v}\right)}{1 - \frac{(\sigma_{-1Dm})_{v-1} n_v}{\sigma_v \cdot SIC(vE) N_v}}, \\ \text{где } N_v &= (\beta_{Dm})_{v-1} \frac{\sigma_B - (|\sigma_m| + \sigma_v) \cdot SIC(vE)}{\sigma_v \cdot SIC((v-1)E) - (\sigma_{-1Dm})_{v-1}} \\ (\beta_{Dm})_v &= (\beta_{Dm})_{v-1} \frac{(\sigma_{-1Dm})_v}{(\sigma_{-1Dm})_{v-1}} \\ \sigma_{-1Dm}|_0 &= \sigma_{-1Dm0}, \quad v=1, 2, 3, \dots, t \end{aligned} \right\} (6)$$

Согласно [5, 6], цикл расчетов повторяется t раз. Если в течение срока службы $T = t \cdot E$ пре-

дел усталости детали $(\sigma_{-1Dm})_v > 0$, то деталь удовлетворяет требованиям прочности. Если при $T = t \cdot E$ повторений расчета $(\sigma_{-1Dm})_v < 0$ или $n_v > N_v$, то НК будет иметь повреждения после T лет эксплуатации.

Следует отметить, что коррекция уровня напряжений, возникающих в конструкции, не отражает не вполне понятный баланс возникновения поверхностных микротрещин и их коррозионного преобразования (развития или исчезновения). Однако, принимая во внимание слабоагрессивный характер коррозионного воздействия окружающей среды на большинство НК ПС, учет потери их несущей способности по уровню равномерной коррозии представляется достаточно обоснованным.

ВЫВОДЫ

1. В ряде случаев оценка коррозионного повреждения НК ПС делается на основе обследования неоднородной выборки объектов разного возраста.

2. Для прогноза коррозионного повреждения НК ПС предложена методика индивидуальной оценки коррозионного повреждения элементов ПС, основанная на модифицированной линейной модели развития коррозии.

3. Изменение напряженного состояния НК ПС в зависимости от степени коррозионного повреждения носит существенно нелинейный характер.

4. Наибольшая нагруженность рамы тележки пассажирского вагона при расчетных нормативных типах нагружения достигается в результате приложения к ней симметричной вертикальной нагрузки.

5. Для коррекции срока службы НК предлагается использовать масштабирование эксплуатационных нагрузок с учетом поправочных коэффициентов, характеризующих масштабы возрастания напряжений в течение периода прогноза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние эксплуатационных нагрузок на напряжения в элементах несущих конструкций электровагона ВЛ60 [Текст] / А. М. Бондарев и др. // Заліз. трансп. України. – 2002. – № 4. – С. 21-25.
2. Bolotin, V. V. Mechanical aspects of corrosion fatigue and stress corrosion cracking [Текст] / V. V. Bolotin, A. A. Shipkov // Int. J. of Solids and Structures. – Oct. 2001. – Vol. 38. – P. 7297-7318.
3. Jones, B. F. The influence of environment and stress ratio on the low frequency fatigue crack growth behaviour of two medium-strength quenched and tempered steels [Текст] / B. F. Jones // Int. J. of Fatigue. – April 1984. – Vol. 6, Issue 2. – P. 75-81.
4. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [Текст]. – М: ГосНИИВ-ВНИИЖТ РФ, 1996. – 319 с.
5. Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов и динамических качеств экипажной части моторвагонного подвижного состава железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм [Текст]. – М: МПС РФ, ВНИИЖТ, 1997.
6. Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов и динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм [Текст]. – М: МПС РФ, ВНИИЖТ, 1998. – 145 с.
7. Филатов, Г. В. К вопросу об оценке коэффициентов математических моделей коррозионного разрушения конструкций [Текст] / Г. В. Филатов // ФХММ. – 1993. – т. 29, № 6. – С. 59-64.
8. Комплексная оценка срока службы пассажирских вагонов после проведения капитально-восстановительного ремонта. Часть 1 [Текст] / Е. П. Блохин и др. // Заліз. трансп. України. – 2002. – № 6. – С. 24-29.
9. Кулешов, В. П. Оценка остаточного ресурса рам тележек электропоездов ЭР1, ЭР2 путем их стеновых вибрационных испытаний [Текст] / В. П. Кулешов, В. Л. Горобец, А. И. Паламаренко // Сб. науч. тр. ДИИТа «Транспорт. Нагруженность и прочность подвижного состава». – Д.: Наука и образование, 1998. – С. 56-62.

Поступила в редколлегию 01.09.2008.