

Использование виртуального блока нагрузок колесной пары высокоскоростного подвижного состава при расчете живучести оси



Г. М. Волохов,
д.т.н., заведующий отделением динамики и прочности подвижного состава и инфраструктуры АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»)



Д. А. Князев,
заведующий лабораторией отдела прочности АО «ВНИКТИ»



М. В. Тимаков,
младший научный сотрудник отдела прочности АО «ВНИКТИ»

Группа специалистов АО «ВНИКТИ» рассмотрела возможность использования генератора случайных чисел для получения виртуального блока оперативной нагрузки колесной пары высокоскоростного подвижного состава, идентичного полученному экспериментально в условиях фактической эксплуатации грузовым блоком, и его приложения для оценки живучести сплошной оси.

Для компьютерного моделирования процессов развития трещин в элементах конструкции подвижного состава и оценки живучести сплошной оси необходимо знать не только блок эксплуатационной нагруженности исследуемого элемента, но и фактическую последовательность возникновения амплитуд механических напряжений с течением времени.

При подстановке значений амплитуд механических напряжений, возникающих в каждом конкретном цикле, в уравнение, описывающее процесс роста трещины, подсчитывают прирост длины (глубины) трещины за данный цикл и количество циклов, необходимое для достижения трещиной критических размеров.

На рис. 1 представлены схема колесной пары с обозначенными местами

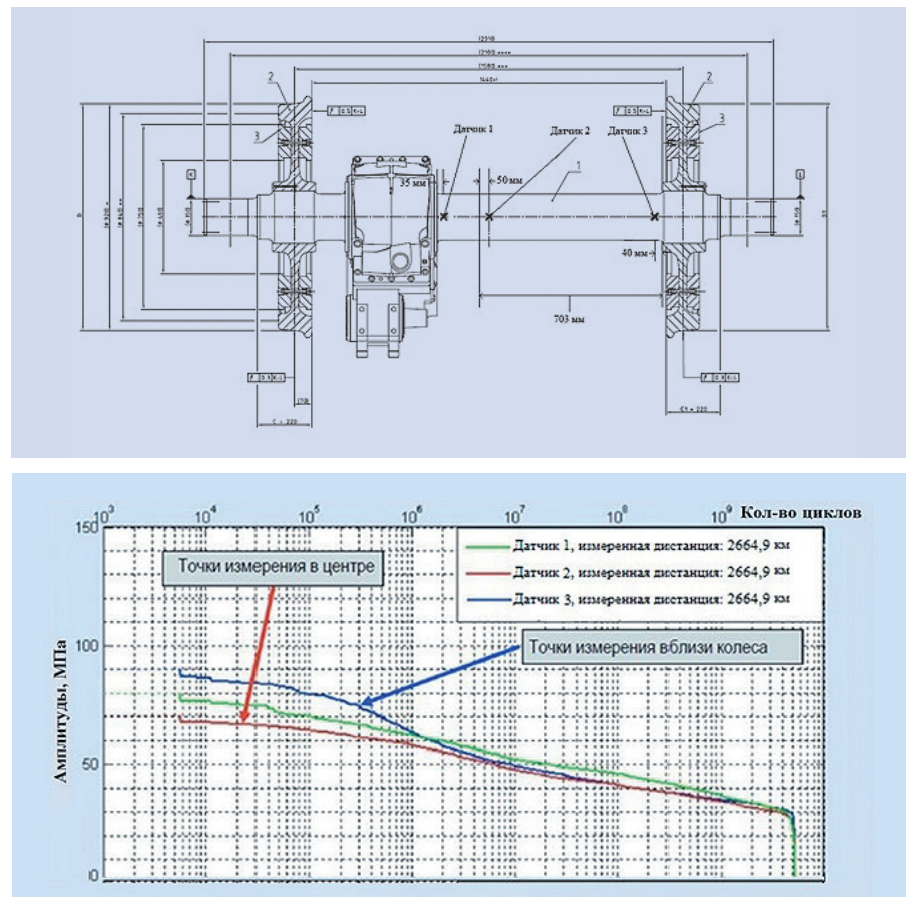


Рис. 1. Схема размещения тензорезисторов (сверху) и результаты измерений (снизу)

Таблица 1. Блок эксплуатационной нагруженности

№	Напряжение, МПа	Циклы	Вероятность	Интервал генерации
1	90–85	6000	9,65991E-07	(0; 9,65991E-07)
2	85–80	30 000	4,82996E-06	(9,65991E-07; 5,79595E-06)
3	80–75	100 000	1,60999E-05	(5,79595E-06; 2,18958E-05)
4	75–70	300 000	4,82996E-05	(2,18958E-05; 7,01954E-05)
5	70–65	500 000	8,04993E-05	(7,01954E-05; 0,000150695)
6	65–60	800 000	0,000128799	(0,000150695; 0,000279493)
7	60–55	1 500 000	0,000241498	(0,000279493; 0,000520991)
8	55–50	3 000 000	0,000482996	(0,000520991; 0,001003987)
9	50–45	5 000 000	0,000804993	(0,001003987; 0,00180898)
10	45–40	50 000 000	0,008049928	(0,00180898; 0,009858907)
11	40–35	150 000 000	0,024149783	(0,009858907; 0,03400869)
12	35–30	1 000 000 000	0,160998552	(0,03400869; 0,195007242)
13	<30	5 000 000 000	0,804992758	(0,195007242; 1)
	Всего	6 211 236 000	1	–

Таблица 2. Генерированный блок нагрузок

№	Напряжение, МПа	Циклика	Вероятность
1	90	97	1,27E-06
2	85	380	4,98E-06
3	80	1198	1,57E-05
4	75	3830	5,02E-05
5	70	6623	8,67E-05
6	65	10 440	0,000137
7	60	17 574	0,00023
8	55	37 407	0,00049
9	50	60 628	0,000794
10	45	615 742	0,008065
11	40	1 844 148	0,024154
12	35	12 294 241	0,161027
13	30	61 456 642	0,804944
	Всего	76 348 950	1

наклейки тензорезисторов и результаты измерения амплитуд механических напряжений [1]. Значения верхней кривой (точки измерения вблизи колеса), аппроксимированные с шагом 5 МПа, представлены в табл. 1.

На основании результатов экспериментальных исследований проведено моделирование аналогичного блока нагрузок с использованием ге-

нератора случайных чисел Randomize, имеющегося в большинстве языков программирования, в том числе в VBA электронных таблиц Excel [2]. Randomize генерирует случайное число в интервале (0;1) с постоянной плотностью вероятности появления (рис. 2).

В соответствии с аппроксимацией данных табл. 1 виртуальный блок

нагрузок формировали следующим образом: выпавшее случайное число сравнивали с интервалами генерации, соответственно результату сравнения назначали амплитуду механических напряжений сгенерированного цикла.

Всего генерировали 76 348 950 циклов. В каждом цикле рассчитывали прирост длины (глубины) трещины по формуле Периса, записанной в виде

$$N = \frac{1}{C\sigma^m \sqrt{\pi}} \cdot \frac{l^{1-\frac{m}{2}}}{1-\frac{m}{2}} + const, \quad (1)$$

где постоянную интегрирования рассчитывали по следующей формуле, а постоянные m и C были приняты, соответственно, $m = 3,2$ и $C = 3 \times 10^{-14}$ [3, 4]:

$$const = \frac{1}{C\sigma^m \sqrt{\pi}} \cdot \frac{1,8^{1-\frac{m}{2}}}{1-\frac{m}{2}}. \quad (2)$$

Таким образом, в начальный момент времени количество циклов нагружения было равно $N_0 = 0$, а начальная длина трещины была равна $l_0 = 1,8$ мм. Генерированный виртуальный блок нагрузок представлен в табл. 2, на рис. 3 приведено его графическое соответствие исходному экспериментальному блоку.

Из анализа данных табл. 1 и рис. 3 видно удовлетворительное соответствие экспериментального и генерированного блока нагрузок, что позволило с достаточной степенью достоверности моделировать процесс роста трещины на сплошной оси при условии случайного появления цикла с амплитудой механических напряжений, отвечающей заданному распределению.

При критической длине (глубине) трещины 31,8 мм количество циклов составляет 76 348 950, что соответствует 251 842 км пробега колесной пары с колесами радиусом 1050 мм по кругу катания или 220 662 км пробега для колесной пары с колесами радиусом 920 мм по кругу катания.

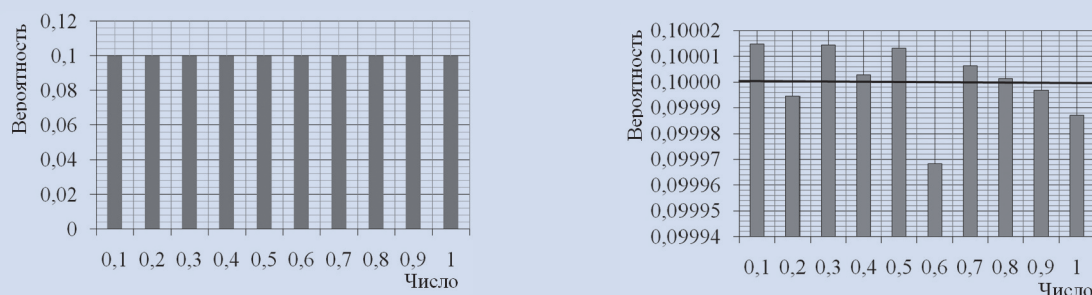


Рис. 2. Плотность вероятности появления случайного числа при использовании Randomize

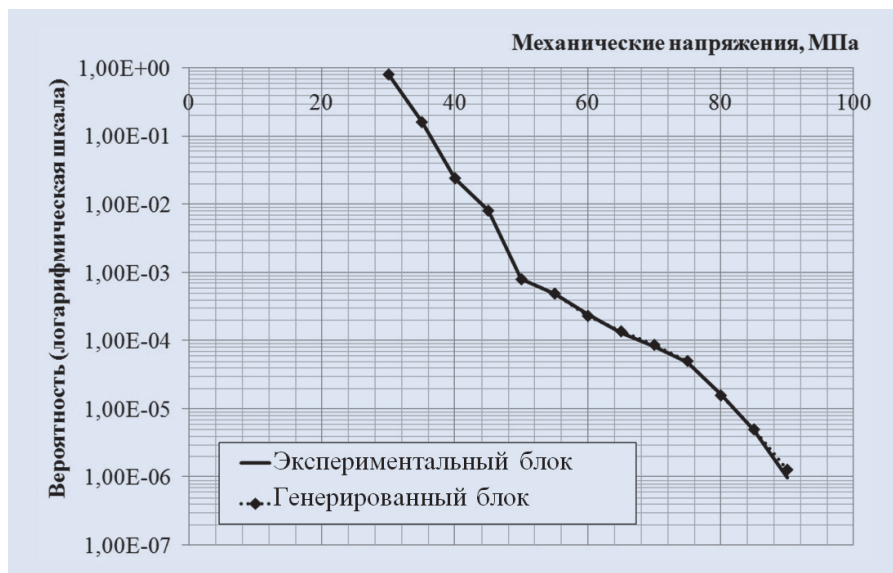


Рис. 3. Сопоставление экспериментального и генерированного блока нагрузок

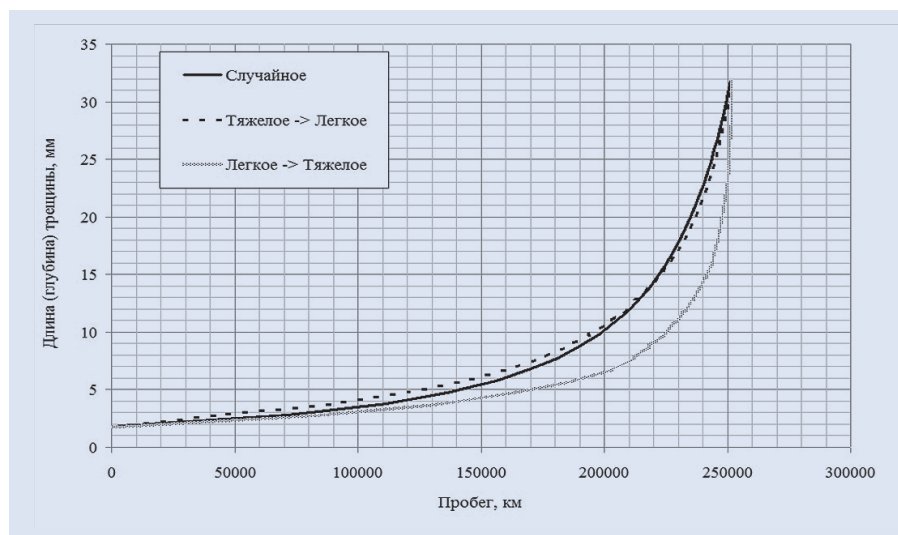


Рис. 4. Результат моделирования роста трещины при различных порядках появления циклов с заданной амплитудой механических напряжений



Фрактал излома оси колесной пары

Для генерированного блока нагрузок моделирование процесса роста трещины повторяли при детерминированном порядке появления циклов с заданной амплитудой механических напряжений: один раз последовательно от высоких напряжений к низким «тяжелое — легкое», а затем последовательно от низких напряжений к высоким «легкое — тяжелое». При аналогичных критических значениях длины (глубины) трещины 31,8 мм пробег составил 251 716 и 251 837 км, соответственно (рис. 4). Динамика развития трещины различалась в трех случаях, т. е. при различных значениях длины (глубины) трещины определенным количеством циклов заданной амплитуды механических напряжений создается тот или иной прирост длины (глубины) трещины, однако суммарное воздействие одного и того же количества циклов с заданным распределением амплитуд механических напряжений приблизительно одинаково.

В данном случае можно говорить о 250 000 км пробега в процессе роста трещины от 1,8 до 31,8 мм длины (глубины). Моделировали далеко не все возможные варианты чередования появления циклов, поэтому помимо назначения критического значения для размера трещины следует говорить о коэффициенте запаса, который в машиностроении часто принимается $k = 1,5$. Следовательно, с коэффициентом запаса 1,5 можно говорить о 167 000 км пробега с трещиной. На основании представленных соображений рекомендуется назначать периодичность осмотра осей на наличие трещин каждые 167 000 км. ■

Литература

1. EN 13261:2003. Railway applications. Wheelsets and bogies. Product requirements (MOD).
2. Глушаков С. В., Мельников И. В., Сурядный А. С. Программирование в среде Widows: учеб. курс. Харьков: Фолио; М.: АСТ, 2001. 488 с.
3. Cantini S., Beretta S. Structural reliability assessment of railway axles. Lucchini RS, 2011. 208 с. (LRS-Techno).
4. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. М.: Физматлит, 1958. 336 с.