

Для получения точного описания процесса разрушения необходимо учитывать все основные факторы, влияющие на накопление повреждений, и проводить их анализ с использованием современных методов моделирования. В этом направлении применительно к исследуемой области необходимо провести соответствующий объем дополнительных исследований. В конечном итоге получение верифицированных моделей поврежденности может обеспечить прогнозирование показателей прочности и долговечности ответственных, сложных в изготовлении и дорогостоящих деталей несущих конструкций железнодорожного подвижного состава, подверженных циклическим нагрузкам, и тем самым значительно сократить время и стоимость их проектирования и производства.

#### Список литературы

- 1 Разрушение. Т. 4 : Исследование разрушения для инженерных расчетов / Р. Н. Барнетт [и др.] ; под ред. Г. Либовица. – М. : Мир, 1977. – 400 с.
- 2 Коллинз, Дж. Повреждение материалов в конструкциях: анализ, предсказание, предотвращение / Дж. Коллинз. – М. : Мир, 1984. – 624 с.
- 3 Сосновский, Л. А. Статистическая механика усталостного разрушения / Л. А. Сосновский. – Минск : Наука и техника, 1987. – 288 с.
- 4 Волегов, П. С. Поврежденность и разрушение: обзор экспериментальных работ / П. С. Волегов, Д. С. Грибов, П. В. Трусов // Физическая мезомеханика. – 2015. – Т. 18, № 3. – С. 11–24.
- 5 Бондарь, В. С. Оценка ресурса элементов конструкций при повторных и длительных термомеханических воздействиях / В. С. Бондарь, Д. Р. Абашев // Упругость и неупругость : материалы Междунар. науч. симп. по проблемам механики деформируемых тел, посвящ. 110-летию со дня рождения А. А. Ильюшина, Москва, 20–21 января 2021 г. – М. : МГУ им. М. В. Ломоносова. Издательский дом (типография), 2021. – С. 184–195.
- 6 Бондарь, В. С. Математическое моделирование процессов деформирования и накопления повреждений при циклических нагружениях / В. С. Бондарь, В. В. Данилин, Д. А. Макаров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 2. – С. 125–152.
- 7 Никушкин, Н. В. Критерий усталостного разрушения металлов при мало- и многоцикловом нагружении / Н. В. Никушкин, А. В. Кацура, Р. П. Васильев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М. Ф. Решетнева. – 2006. – № 6(13). – С. 34–38.

УДК 539.431

### АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ УСКОРЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ВАГОННЫХ СТАЛЕЙ

*В. В. КОМИССАРОВ, Е. С. ТАРАНОВА, В. В. ГАБРУСЕВА*  
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

При проведении комплекса работ по продлению срока службы вагонов в ИЦ ЖТ БелГУТ выполнялись исследования по определению характеристик сопротивления усталости (СУ). Основные характеристики сопротивления механической усталости (МУ): предел выносливости  $\sigma_{-1}$ , абсциссу точки перелома кривой усталости  $N_{\sigma\sigma}$ , показатель наклона левой ветви кривой усталости  $m_{\sigma}$  и коэффициенты уравнения кривой усталости  $a$  и  $b$ , определяют по кривой МУ, которая представляет собой зависимость между амплитудой напряжений ( $\sigma_a$ ) и количеством циклов ( $N_{\sigma}$ ) до достижения предельного состояния испытываемого образца (ГОСТ 25.502–79) [1]. Для построения данной кривой и определения  $\sigma_{-1}$ , соответствующих вероятности разрушения 50 %, испытывают около 15 одинаковых образцов. В интервале напряжений, равных (0,95–1,05) от  $\sigma_{-1}$ , соответствующего вероятности разрушения 50 %, должны быть испытаны не менее трех образцов, при этом не менее половины из них не должны разрушаться до достижения базового числа циклов ( $N_B$ ). Испытания ведут непрерывно до достижения предельного состояния (ПС) или до  $N_B$  ( $10^7$ – $10^8$  циклов). Критерии ПС при МУ – появление усталостных макротрещин заданного размера либо разрушение образца. В пределах намеченной серии испытаний схема нагружения должна быть одинаковой, частота циклов нагружения должна быть постоянной.

Представленный способ определения характеристик сопротивления МУ дает наиболее точные результаты, но является весьма длительным и трудоемким процессом. Поэтому большой интерес представляют ускоренные методики, дающие возможность определить характеристики СУ за более короткое время и при испытании меньшего количества образцов. Все методы ускоренного определения предела выносливости можно разделить на четыре группы: расчетной оценки  $\sigma_{-1}$  по характе-

ристикам механических свойств металла (безобразцовые), ускоренной оценки (малообразцовые), расчетно-экспериментальной (малообразцовые, многообразцовые) и экспериментальные методы определения характеристик СУ (многообразцовые) [2].

В работе представлена попытка применения формулы Муратова Л. В. [3] для апробации методики ускоренного определения предела выносливости:

$$\sigma_{-1} = \frac{\sigma_1 \sqrt{N_1} - \sigma_2 \sqrt{N_2}}{\sqrt{N_1} - \sqrt{N_2}},$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – напряжения определенные по кривой усталости и соответствующие им значения долговечности  $N_1$  и  $N_2$ . Данная методика относится к группе малообразцовых методов.

С целью оценки погрешности применения данной формулы произведена обработка всего комплекса испытаний реализованных для материалов вагонных конструкций. В процессе проведения работ экспериментально получено пять кривых МУ (одна из которых представлена на рисунке 1). Данные по всем кривым были обработаны по предложенной формуле. В качестве примера в таблице 1 представлены результаты для одной кривой МУ. Обработка выполнялась как по исходным для каждого образца данным (столбец 1), так и по результатам построения кривой МУ (столбец 2).

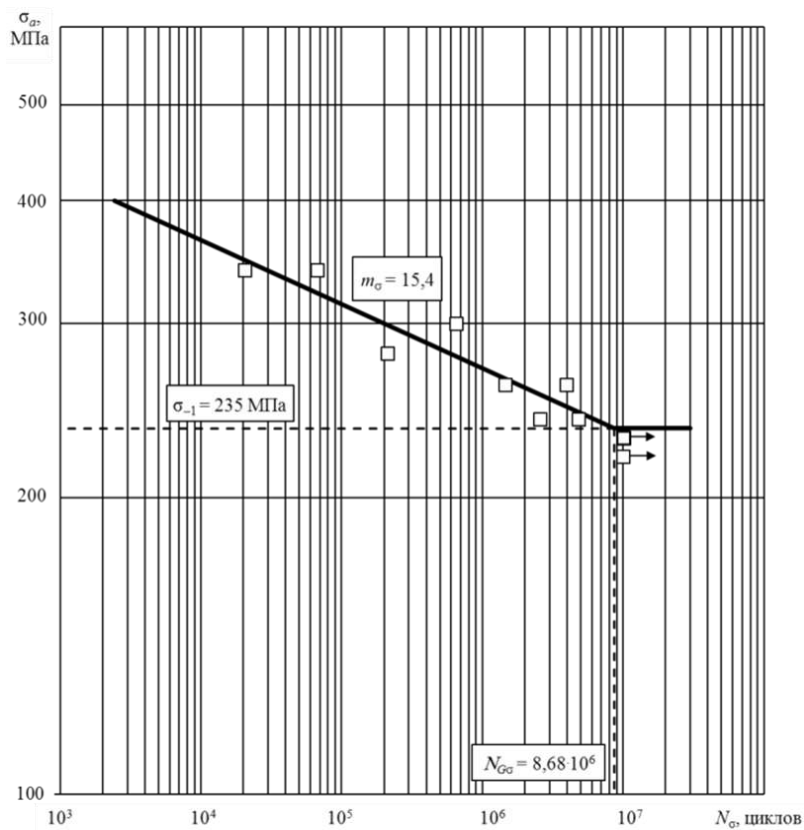


Рисунок 1 – Кривая механической усталости стали Ст4сп при чистом изгибе

Таблица 1 – Обработка результатов экспериментов ( $\sigma_{-1} = 235$  МПа) по формуле Муратова

$\sigma_a$ , МПа	$N_{\sigma}$ , цикл	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\sigma_a$ , МПа	$N_{\sigma}$ , цикл	$\sigma_{-1}$ , МПа
столбец 1			столбец 2		
400	2430	232	340	67459	227
235	8676700		240	4828000	
300	202990	223	300	651253	205
235	8676700		240	4828000	
400	2430	237	340	67459	238
240	6276940		260	1456036	
300	202990	227	300	651253	179
240	6276940		260	1456036	
Среднее значение (точки на кривой)		230	Среднее значение (результаты испытаний)		212
Среднее расчетное значение $\sigma_{-1}$ ниже на 2 %			Среднее расчетное значение $\sigma_{-1}$ ниже на 10 %		

Полученные результаты при обработке представленной кривой МУ свидетельствуют о погрешности расчетных данных, не превышающей 10 % по сравнению с экспериментальными данными.

Выполненный в целом анализ (для пяти кривых МУ) показывает, что при получении  $\sigma_{-1}$  по ускоренной методике с использованием исходных для каждого образца данных дает погрешность от 3 до 15 %, а при обработке данных, получаемых по результатам построения кривой МУ, – от 2 до 13 %.

В результате можно констатировать, что ускоренное определение  $\sigma_{-1}$  для предварительной оценки характеристик СУ, а также в случае отсутствия возможности изготовления из материалов конструкции большого числа образцов позволяет получить достаточно точные значения. Эти значения, в свою очередь, могут быть также уточнены с использованием полностью эмпирических зависимостей

$$\sigma_{-1} = \frac{(\sigma_b - \sigma_t)}{075[\delta/\psi(7,5 - 4,167\delta/\psi) - 1]},$$

где  $\sigma_t$  – предел текучести, МПа;  $\delta$  и  $\psi$  – относительное удлинение и сужение после разрыва, %.

Результаты апробации методов ускоренного определения характеристик СУ вагонных стелей позволяют определить наиболее эффективные методы ускорения испытаний, а также оценить их влияние на точность и достоверность получаемых результатов. Кроме того, апробация методов ускоренного определения характеристик СУ вагонных стелей позволяет сократить время и затраты на проведение испытаний, что является важным фактором для производителей несущих конструкций железнодорожного транспорта.

#### Список литературы

- 1 ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – Введ. 1981–01–01. – 1979. – 25 с.
- 2 Трощенко, В. Т. Прочность металлов при переменных нагрузках / В. Т. Трощенко. – Киев : Наук. думка, 1978. – 176 с.
- 3 Муратов, Л. В. Энергия разрушения при циклических и статических нагрузках / Л. В. Муратов // Прочность металлов при переменных нагрузках. – М. : Изд-во АН СССР, 1963. – С. 111–118.

УДК 629.4.027.2

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ РАМЫ ТЕЛЕЖЕК ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА МОДЕЛИ 81-717.5 (81-714.5)

*Е. Н. КОНОВАЛОВ, В. В. КОМИССАРОВ, М. И. ПАСТУХОВ, В. В. БЕЛОГУБ,  
П. М. АФАНАСЬКОВ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В результате анализа технического состояния несущих конструкций рам тележек (модель 81-717.5 (81-714.5)) вагонов Минского метрополитена после истечения их нормативного срока службы (16 лет) было установлено, что рамы тележек находятся в удовлетворительном состоянии, однако необходимо выполнить оценку их остаточного ресурса. Для достижения поставленной цели была разработана процедура определения остаточного ресурса рам тележек, учитывающая условия эксплуатации и фактические значения физико-механических характеристик материала, что позволило более адекватно оценить остаточный ресурс [1].

Процедура оценки остаточного ресурса рам тележек включает следующие этапы:

- изучение особенностей конструкции рам тележек, а также условий эксплуатации;
- контроль технического состояния рам тележек после длительной эксплуатации;
- виртуальные испытания (расчеты), позволяющие определить наиболее нагруженные зоны;
- проведение ходовых прочностных испытаний;
- определение физико-механических характеристик материала рамы тележки после длительной эксплуатации ( $\sigma_t$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{-1}$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ,  $HB$ ,  $KCU$ );
- стендовые ресурсные испытания;
- численное определение ресурса несущей конструкции рамы тележки.