

Для определения механических напряжений в контакте без учета других явлений для угольной вставки задавались: модуль упругости – 10 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,24, плотность материала – 1760 кг/м<sup>3</sup>. Для контактного провода из меди приняты следующие физические характеристики: модуль упругости – 100 ГПа; коэффициент Пуассона – 0,2; плотность материала – 5529 кг/м<sup>3</sup>. Контакт задан фрикционным. Коэффициент трения в контакте принят равным 0,06. Контактная пара принята фрикционной, несимметричной с формулировкой «Augmented Lagrange». Был назначен контакт между телами без отстранения. Коэффициент нормальной жесткости уменьшен в 10 раз до 0,01 по сравнению со значением по умолчанию, чтобы обеспечить более устойчивый контакт тел по всей поверхности контакта. Чтобы учесть свойства механического взаимодействия провода со вставкой сила натяжения провода принята равной 500 Н, а сила давления провода на вставку – 140 Н.

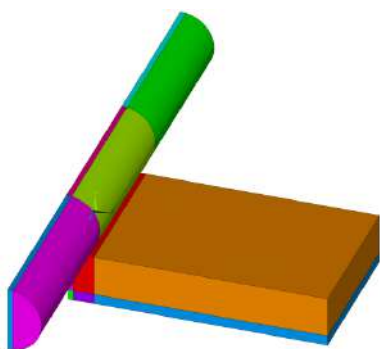


Рисунок 1 – Геометрическая модель системы «контактный провод – токосъемная вставка»

В качестве граничного условия введен запрет поперечного смещения вставки относительно провода, а также закреплены его концы. Решение выполнено для положения равновесия и при смещении токосъемной вставки относительно провода со скоростью 1 м/с.

При тепловом расчете приняты параметры: для угольной вставки коэффициент теплопередачи в контакте – 70 Вт/(м<sup>2</sup>·К); коэффициент теплового расширения –  $7,9 \cdot 10^{-6}$  1/К; коэффициент теплопроводности – 150 Вт/м·К; удельная теплоемкость – 708 Дж/кг·К. Для провода: коэффициент теплового расширения провода –  $16,7 \cdot 10^{-6}$  1/К; удельная теплоемкость – 383 Дж/кг·К; коэффициент теплопроводности – 380 Вт/м·К. Для нахождения плотности теплового потока, обусловленного кулоновым трением, коэффициент рассеивания энергии принят равным 1. Весовой коэффициент, учитывающий распределение тепла между контактной и целевой поверхностями, принят равным 0,5. Предполагалось, что при температуре 22 °С тепловые деформации отсутствовали. Указанная температура принята в качестве начальной [3].

Для электрического расчета удельное сопротивление токосъемной вставки принято 0,008 Ом·м, а материала провода –  $1,72 \cdot 10^{-8}$  Ом·м. К одному концу провода приложен входной поток электрического тока, равный 200 А, на выходной плоскости токосъемной вставки задано напряжение 0 В. Входными данными являлось распределение механических напряжений. Силой трения в контакте пренебрегали.

Тестирование разработанных конечно-элементных моделей показало, что получаемые с их помощью результаты достаточно точно соответствуют реализуемым на практике значениям.

#### Список литературы

- 1 Improving of the electrothermal characteristics of the contact line / A. Galkin [et al.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 1115. – P. 195–205.
- 2 Shimanovsky, A. Modeling of the pantograph–catenary wire contact interaction / A. Shimanovsky, V. Yakubovich, I. Kapliuk // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 134. – P. 284–290.
- 3 Каплюк, И. И. Моделирование контактного взаимодействия токосъемника и контактного провода с учетом тепловых процессов / И. И. Каплюк // Актуальные вопросы машиноведения. – 2018. – Вып. 7. – С. 46–48.

УДК 539.431, 539.422.24

## АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ МАТЕРИАЛОВ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

*В. В. КОМИССАРОВ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Описание процессов накопления поврежденности и разрушения в различных процессах деформирования твердых тел, является важной и актуальной задачей. Знание кинетики указанных процессов дает ключ к достоверной оценке надежности объектов в заданных условиях эксплуатации, а также позволяет определить оптимальные условия его использования. Усталостные явления проис-

ходят из-за многообразных эксплуатационных факторов, в этой связи существуют различные научные направления, в рамках которых изучают закономерности многоциклового, малоциклового, термической, ударной, коррозионной усталостей, фреттинг-усталости, а также поверхностного усталостного изнашивания и их комплексного взаимодействия [3, 7]. В этой связи, а также из-за сложности описания механизмов поврежденности и разрушения, их комплексного характера эта тематика занимает в литературе особое место [4].

В работе представлен анализ публикаций [1–7], посвященных исследованиям в рамках континуальной теории поврежденности, а также по экспериментальным методам и подходам к описанию поврежденности и разрушения. Рассмотрены теории, в которых предложены и обоснованы меры поврежденности как эволюционирующие характеристики, описывающие деградацию свойств материала вследствие образования и развития системы микроповреждений при деформировании; исследуются особенности разрушения различных материалов при усталостном нагружении в зависимости от формы цикла нагружения, температуры и других параметров воздействия; макрофеноменологические теории поврежденности, в том числе использующие многоуровневый подход. В частности, многообразные эффекты взаимодействия повреждений многих типов не могут быть точно описаны и предсказаны, поэтому актуальным является нахождение поврежденности через взаимодействие опасных объемов, которое и содержит реальный комплекс необратимых повреждений (дефектов), порождаемых действием соответствующих полей напряжений (деформаций) [3]. Приведены также результаты исследований, развивающих подход с использованием скалярных мер поврежденности [4].

В общем случае модели накопления повреждений могут быть представлены в виде функции, связывающей степень повреждения материала с параметрами, характеризующими режим его нагружения и свойства материала. Примерами таких параметров могут быть количество циклов нагружения, температура, коррозионная активность среды и т. д.

Существует несколько основных типов моделей накопления повреждений, которые используются в зависимости от характера воздействия на материал и его свойств.

1 Линейная модель накопления повреждений (linear damage accumulation model). Эта модель предполагает, что повреждение материала происходит линейно с увеличением числа циклов нагружения или времени эксплуатации. Данная модель хорошо подходит для описания усталости материалов, но не учитывает эффектов, связанных с нелинейным характером накопления повреждений.

2 Модель, основанная на теории трещин (crack-based model). Этот подход используется для описания накопления повреждений в материалах с трещинами и учитывает влияние размеров трещин на процесс разрушения.

Данная модель обычно используется для анализа долговечности конструкций с учетом роста трещин и их взаимодействия.

3 Модель накопления повреждений с учетом параметра деградации (damage degradation model). В этой модели учитывается изменение (деградация) свойств материала со временем, что позволяет более точно описать процесс его разрушения.

4 Моделирование накопления повреждений с использованием фракталов (fractal damage modeling). Фрактальные методы позволяют учитывать эффекты самоподобия и масштабирования при описании накопления повреждений в материале. Они особенно полезны при анализе процессов усталости и разрушения композитных материалов.

Таким образом, можно заключить, что для оценки поврежденности несущих конструкций железнодорожного подвижного состава по критерию сопротивления усталости можно использовать различные подходы, в том числе, учитывающие характер эксплуатационных неисправностей.

В практическом плане выполнена первая попытка провести сравнительный анализ таких моделей. На основе полученных экспериментальных данных характеристик сопротивления усталости материалов несущих конструкций подвижного состава произведено построение расчетных кривых усталости (по различным моделям поврежденности) при мягком симметричном нагружении. Из полученных результатов установлено, что кривые усталости, рассчитанные по полученному уравнению для оценки поврежденности, практически совпадают с экспериментальными, в то время как зависимости, построенные по моделям Мэнсона и Лангера дают существенное отклонение расчетных величин от данных эксперимента.

Использование полученных зависимостей для прогнозирования долговечности конструктивных элементов в конечном итоге потребует установить соответствие между повреждаемостью стандартного образца и натурального элемента конструкции.

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-