

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ М.И.КАЛИНИНА

На правах рукописи

НАРИУС НАДЕЖДА ГРИГОРЬЕВНА

УДК 629.463.027.001.24-192:539.431:681.3

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ
УСТАЛОСТИ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ
НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ
ВАГОНОВ

(05.22.07 - Подвижной состав железных дорог и тяга поездов)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ДНЕПРОПЕТРОВСК - 1986

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена в Днепропетровском ордена Трудового Красного Знамени институте инженеров железнодорожного транспорта им. М.И.Калинина

Научный руководитель – заслуженный работник высшей школы УССР, доктор технических наук, профессор Е.П.Блохин.

Научный консультант – кандидат технических наук, старший научный сотрудник А.В.Юрченко.

Официальные оппоненты – доктор технических наук,
профессор В.А.Камаев;

доктор технических наук,
профессор В.Ф.Ушкалов.

Ведущее предприятие – Днепродзержинский вагоностроительный завод им. газеты "Правда".

Защита диссертации состоится 24 декабря 1986 года в 15 ч. 30 мин. на заседании специализированного совета К П4.07.01 в Днепропетровском ордена Трудового Красного Знамени институте инженеров железнодорожного транспорта по адресу: 320700, ГСП, г.Днепропетровск, ул.Акад. В.А.Лазаряна, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан 22 ноября 1986 г.

Ученый секретарь
Специализированного Совета
кандидат технических наук,
доцент



И.В.Петрович

НТБ
ДНУЖТ

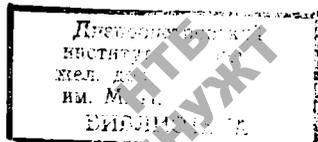
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Намеченная XXV съездом КПСС стратегическая линия развития экономики страны требует дальнейшей интенсификации работы железнодорожного транспорта. Увеличение провозной и пропускной способности железных дорог может быть достигнуто при повышении скорости движения, веса поездов, осевой нагрузки, а также путем совершенствования технического оснащения подвижного состава за счет разработки и внедрения новых конструкций, которые отличаются повышенной производительностью и достаточной надежностью в эксплуатации. Существенно сократить сроки разработки и освоения перспективных конструкций позволит применение в проектировании автоматизированных систем.

5013a

Диссертационная работа посвящена вопросам совершенствования методов проектирования и повышения надежности несущих элементов тележки грузовых вагонов. Она представляет часть работ, выполненных в ДИИТе в рамках комплексной целевой программы Министерства среднего машиностроения создания и внедрения систем автоматизации проектирования, конструирования, испытаний и отработки изделий (приказ Министра среднего машиностроения № 746 от 31.12.81 г.), а также работ в соответствии с приказами ВПО "СовзвAGONмаш" от 12.03.84 г. № 15 "О внедрении системы автоматизированного проектирования", Министра тяжелого и транспортного машиностроения от 31.03.84 г. № 76 и связана непосредственно с практической реализацией научно-технических программ Министерства путей сообщения на 1986-1990 г.г. "Разработка и внедрение высокоэффективных технологических процессов и технических средств в вагонном хозяйстве" и "Разработка и эффективное использование вычислительной техники и автоматизированных систем на железнодорожном транспорте" (утверждены Министром путей сообщения 6 мая 1986 г., № 294-у), направленных на обеспечение более полного удовлетворения народного хозяйства и населения в перевозках на основе широкого использования средств вычислительной техники.

Цель работы - разработка методического, математического и программного обеспечения расчета характеристик сопротивления усталости и показателей надежности несущих элементов тележек грузовых вагонов; исследование усталостной прочности и надежности серийных и опытных конструкций надрессорных балок, боковых рам при нормативной и повышенной осевых нагрузках.



В соответствии с этим решены следующие задачи:

- обзор и анализ существующих методов расчета усталостной прочности машиностроительных конструкций и достижений в области автоматизации расчетов в рамках создания САПР;
- выбор математических моделей для расчета характеристик сопротивления усталости и показателей надежности несущих элементов тележек грузовых вагонов по критерию усталостного повреждения;
- разработка математического и программного обеспечения оценки усталостной прочности и надежности несущих элементов тележек грузовых вагонов;
- апробация математического обеспечения и пакета прикладных программ для прогнозирования надежности несущих элементов тележек и оценка достоверности получаемых результатов на примере расчета серийных конструкций надрессорной балки и боковой рамы;
- исследование о применении МКЭ напряженного состояния от статической нагрузки и оценка статистических характеристик динамических напряжений серийных и опытных конструкций надрессорной балки и боковой рамы тележки ЦНИИ-ХЗ при нормативной и повышенной осевых нагрузках;
- расчет характеристик сопротивления усталости, показателей надежности серийных и опытных конструкций надрессорной балки и боковой рамы тележки ЦНИИ-ХЗ при осевых эксплуатационных нагрузках 200, 228 и 245 кН;
- исследование влияния повышения осевой нагрузки на прочность и надежность несущих элементов тележки, оценка эффективности мер по повышению надежности – совершенствования конструкции и применение новых конструкционных материалов.

Методы исследования. В исследованиях применен расчетно-экспериментальный метод. Теоретические исследования основывались на теории вероятностей, математической статистике, статистической теории подобия усталостного разрушения, теории надежности. Напряженное состояние конструкции от статической нагрузки исследовалось на уточненных пространственных моделях с применением метода конечных элементов. Нагруженность в эксплуатации оценивалась по результатам ходовых испытаний конструкций-аналогов, а для оценки сопротивления усталости использовались характеристики усталостной прочности образцов, моделей и натуральных конструкций. Достоверность результатов показана на примерах расчета серийных конструкций надрессорной балки и боковой рамы путем сопоставле-

НТ
ДНУЖТ

ния результатов расчета с экспериментальными и эксплуатационными данными.

Научная новизна

- предложена уточненная методика оценки усталостной прочности и надежности несущих элементов тележек, учитывающая случайный характер нагруженности этих деталей в эксплуатации, статистический разброс характеристик сопротивления усталости и вероятностную природу усталостного разрушения, что обеспечивает качественно новый подход к задачам оценки и обеспечения надежности ходовой части вагонов при проектировании и отработке;

- разработаны алгоритмы и программное обеспечение расчета характеристик сопротивления усталости и показателей надежности несущих элементов тележек в виде пакета прикладных программ;

- оценка напряженного состояния конструкций осуществлялась по уточненным пространственным моделям с применением метода конечных элементов;

- математическое и программное обеспечение оценки сопротивления усталости и надежности несущих элементов тележек применены при разработке опытных конструкций надрессорной балки (без опорной колонки) и боковой рамы тележки ЦНИИ-ХЗ.

- получены оценки усталостной прочности и показателей надежности серийных и опытных конструкций надрессорной балки и боковой рамы тележки ЦНИИ-ХЗ для условий эксплуатации при нормативной и повышенной осевых нагрузках;

- исследовано влияние повышения осевой нагрузки на усталостную прочность и надежность элементов тележки;

- оценена эффективность мер по повышению надежности несущих элементов тележки ЦНИИ-ХЗ - совершенствования конструкции и применения новых конструкционных материалов;

Практическая ценность. Предложена методика расчета характеристик сопротивления усталости и показателей надежности, позволяющая прогнозировать надежность опытных конструкций несущих элементов тележек на стадиях проектирования и проведения экспериментальных исследований, а также серийных для перспективных условий эксплуатации. Математическое обеспечение и автоматизация расчетов дает возможность обеспечить необходимую надежность наиболее нагруженных элементов ходовой части грузовых вагонов в эксплуатации при более полном использовании резервов несущей способности, существенно сократить сроки проектирования и объем экспериментальных исследований.

Определены усталостная прочность, показатели надежности серийных и опытных конструкций надрессорной балки, боковой рамы при нормативной и повышенной осевых нагрузках; оценено влияние повышения осевой нагрузки на уровень надежности этих деталей, дана качественная оценка эффективности новых конструктивных решений и применения прогрессивных конструкционных материалов.

Реализация работы. Результаты проведенных исследований использованы ВНИИЖТ при разработке надрессорной балки тележки ЦНИИ-ХЗ. В рамках создания системы автоматизированного проектирования, первая очередь САПР-ГВИ (II этап) разработанный пакет прикладных программ прошел опытную эксплуатацию и внедрен ПО "Уральвагонзавод" им. Ф. Э. Дзержинского и Днепродзержинским вагоностроительным заводом им. газеты "Правда".

Апробация. Основные положения диссертации доложены и обсуждены: на Всесоюзной конференции "Проблемы механики железнодорожного транспорта" (Днепропетровск, 1960); на Всесоюзной конференции по вибрационной технике (Тбилиси, 1961); на Уральской зональной конференции "Пути повышения надежности и ресурса систем машин" (Свердловск, 1963); на Всесоюзной конференции "Проблемы механики железнодорожного транспорта. Повышение надежности и совершенствование конструкций подвижного состава" (Днепропетровск, 1984); на научном семинаре кафедры строительной механики ДИИГА (Днепропетровск, 1986).

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в семи печатных работах,

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и содержит 125 страниц машинописного текста, 26 рисунков, 29 таблиц. Список литературы включает III наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В первой главе освещены основные достижения в разработке расчетных методов оценки сопротивления многоцикловой усталости и надежности машиностроительных конструкций. Дальнейшее развитие эти методы получили в применении к конструкциям подвижного состава.

Большой вклад в развитие этих методов при решении теоретических и прикладных вопросов динамики и прочности подвижного со-

НТБ
ДНУЖТ

стада внесли Е.П.Блохин, М.Ф.Вериго, С.В.Вершинский, В.Д.Данович, В.А.Камаев, М.Л.Коротенко, Б.Г.Кегли, В.А.Лазарян, Л.А.Манашкин, Л.Н.Никольский, А.П.Приходько, А.Н.Савоськин, О.М.Савчук, М.М.Соколов, В.Ф.Ушкалов, Ю.М.Черкашин, А.В.Юрченко. Наряду с развитием методов оценки нагруженности по экспериментальным данным большие успехи достигнуты в прогнозировании нагруженности теоретическими методами. Результаты теоретических и экспериментальных исследований сопротивления усталости несущих конструкций вагонов получены в работах В.А.Двухглазова, О.Б.Камаева, Л.Н.Косарева, В.С.Плоткина, А.П.Погребного, В.И.Шахова. Основные положения теории подобия усталостного разрушения нашли применение при оценке сопротивления усталости литых деталей вагонов в работах А.П.Шлюсенкова, В.П.Коцубенко и др. авторов.

Методы расчета долговечности на основе линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений в применении к прогнозированию надежности несущих конструкций подвижного состава в настоящее время получили широкое распространение и дальнейшее развитие. Так, экстраполяция кривой усталости несущих деталей ходовой части грузового вагона за пределы базы испытаний вызвала необходимость корректировки нижней границы повреждающих напряжений при оценке срока службы. Для оценки вероятности безотказной работы этих деталей наряду с логарифмически-нормальным распределением наработки до отказа используются другие модели-распределения экстремальных значений, гамма-распределение.

Значительное количество работ посвящено оценке усталостной прочности надрессорной балки и боковой рамы тележек грузовых вагонов. По данным эксплуатации надежность несущих элементов тележек при растущих осевых нагрузках недостаточна. В связи с этим принимаются меры по обеспечению необходимой прочности их, что, в свою очередь, требует проведения дальнейших исследований.

Далее отмечается, что в настоящее время в вагоностроении большое внимание уделяется применению ЭВМ при решении задач обеспечения надежности, осуществляется разработка подсистем САПР.

В заключение главы, исходя из актуальности задач совершенствования методов проектирования и повышения надежности ходовой части вагонов, обеспечения расчетов при проектировании и модернизации конструкций несущих элементов, формулируется цель и перечисляются задачи диссертационной работы.

Во второй главе изложены требования к выбору методов оценки сопротивления усталости и надежности при разработке опытных и модернизации серийных конструкций несущих элементов тележек грузовых вагонов. Приведены математические модели, используемые для расчета характеристик сопротивления усталости и показателей надежности. Описана методика проведения расчетов.

Выбор методов оценки сопротивления усталости и надежности конструкции определяется в основном стадией разработки, объемом и достоверностью имеющейся информации. На стадиях технического проектирования и экспериментальных исследований должны использоваться расчетные и расчетно-экспериментальные методы, наиболее полно учитывающие условия эксплуатации, особенности конструкции и физическую сущность отказов. Так как долговечность несущих элементов тележек определяется появлением усталостных трещин в результате действия переменных напряжений, надежность их оценивается по критерию усталостного повреждения. Рассматривается многоцикловая усталость, когда динамические напряжения возникают при упругих деформациях. Модели для оценки усталостной прочности обеспечивают расчет характеристик сопротивления усталости в вероятностном аспекте.

На стадии проектирования, когда опытный образец отсутствует, расчет выполняется по конструкторской документации, расчетной статической нагрузке с использованием критерия подобия усталостного разрушения, результатов усталостных испытаний образцов и моделей, изготовленных из того же материала, что и конструкция, по единой технологии и расчетных данных о напряженном состоянии конструкции.

Оценка напряженного состояния несущих деталей тележки осуществляется с применением метода конечных элементов (МКЭ) по уточненным моделям. По результатам расчета выбирается сечение детали, где наиболее вероятно появление усталостной трещины, и определяется значение критерия подобия усталостного разрушения $L/\bar{\sigma}$.

Предел выносливости детали $\bar{\sigma}_{0,1F}$ и параметры кривой усталости в амплитудах напряжений, соответствующих среднему эксплуатационному напряжению, определяются для заданной вероятности разрушения F

$$\bar{\sigma}_{0,1F} = \bar{\sigma}_{0,1} + U_F S_{\bar{\sigma}_{0,1}}, \quad C_F = \bar{\sigma}_{0,1F}^m N_1 = \bar{\sigma}_{0,1F}^m N_2; \quad m = (\gamma - \nu) \rho^{\nu}$$

где U_F - квантиль нормального распределения, $\bar{\sigma}_{0,1}$ - среднее

значение предела выносливости, определяется из уравнения диаграммы предельных амплитуд стандартных образцов с учетом коэффициента снижения предела выносливости $K_{\ell N}$ и асимметрии циклов; $S_{\sigma_{\ell N}} = S_{\sigma_{\ell 1N}} K_{\ell 1N}$; $S_{\sigma_{\ell 1N}}$ - среднеквадратическое отклонение предела выносливости образца; ρ и γ - константы материала; $\ell = \lg(\ell/\bar{\sigma})$. В зависимости от принятой базы испытаний N соотношения для определения обобщенного коэффициента $K_{\ell N}$ имеют вид

$$K_{\ell N_1} = c \cdot K(\ell, N_2); \quad K_{\ell N_2} = c^{-1} K(\ell, N_1); \quad c = \sigma_{\ell 1N_1} \sigma_{\ell 1N_2}^{-1} \sqrt{N_1 N_2^{-1}};$$

$$K(\ell, N_1) = \tau_1 \omega_1^{\ell}; \quad K(\ell, N_2) = \tau_2 \omega_2^{\ell},$$

где $N_1 = 10^6$ и $N_2 = 10^7$ циклов; $\sigma_{\ell 1N_1}$ и $\sigma_{\ell 1N_2}$ - пределы выносливости стандартного образца; $\tau_1, \tau_2, \omega_1, \omega_2$ - коэффициенты, определяемые по данным испытаний образцов и моделей. Если имеются кривые усталости n образцов различных размеров и натуральных конструкций и значения критерия ℓ для них, то константы материала и коэффициенты зависимости $K(\ell, N)$ в этом случае могут быть определены из уравнений

$$\lg a = \frac{\sum \ell_i^2 \sum \lg K(\ell_i, N) - \sum \ell_i \lg K(\ell_i, N)}{n \sum \ell_i^2 - (\sum \ell_i)^2}; \quad \lg a = \frac{n \sum \ell_i \lg K(\ell_i, N) - \sum \ell_i \sum \lg K(\ell_i, N)}{n \sum \ell_i^2 - (\sum \ell_i)^2};$$

$$\rho = \frac{n \sum \ell_i^2 - (\sum \ell_i)^2}{\sum m_i \sum \ell_i - n \sum m_i \ell_i}; \quad \gamma = \frac{\sum \ell_i + \rho \sum m_i}{n};$$

$$K(\ell_i, N) = \frac{\sigma_{\ell 1N}}{\sigma_{\ell 1N}^{(i)}}; \quad i = \overline{1, n}.$$

Оценка напряженного состояния и усталостной прочности опытного образца конструкции осуществляется по результатам натуральных испытаний. Параметры кривой усталости и предел выносливости в этом случае получаются в результате сглаживания эмпирических зависимостей с учетом статистического разброса величин. Кривая усталости аппроксимируется степенным и показательными уравнениями.

С точки зрения выбора расчетной схемы и количественных показателей надежности несущие детали ходовой части рассматриваются как невосстанавливаемые элементы. Но предусмотрена также возможность представления расчетной схемы в виде системы последовательно соединенных элементов. Надежность характеризуется показателями безотказности и долговечности: вероятностью безотказной работы, интенсивностью отказов, значениями среднего и гамма-процентного ресурсов, среднего и гамма-процентного сроков службы. Так

НТБ
ДНУЖТ

как на стадиях проектирования и экспериментальных исследований информация об отказах в эксплуатации отсутствует, в основу расчета положен метод определения показателей надежности в терминах теории вероятностей. Математические модели выбраны с учетом физической сущности отказов (распределения Вейбулла, Вейбулла-Гнеденко, нормальное, логарифмически-нормальное, Рэлея, Джонсона, гамма-распределение).

Наработка конструкции до отказа определяется в результате сопоставления на основе линейной гипотезы накопления повреждений статистических характеристик эксплуатационной нагруженности и сопротивления усталости и оценивается количеством "разрушающих" циклов напряжений. Распределение амплитуд напряжений за срок службы описывается одним из граничных законов - Рэлея или нормальным (для узкополосных и широкополосных процессов), а сопротивление усталости характеризуется кривыми усталости для заданной вероятности разрушения. Нижняя граница амплитуд повреждающих напряжений устанавливается при экстраполяции кривой усталости несущих деталей тележки за пределы базы испытаний следующим образом

$$\sigma_{min} = \begin{cases} q\sqrt{\Delta}, & \text{если } q\sqrt{\Delta} < p\sigma_{a,n} \\ p\sigma_{a,n}, & \text{если } q\sqrt{\Delta} > p\sigma_{a,n} \end{cases}$$

где Δ - параметр распределения амплитуд в эксплуатации; p и q - коэффициенты, определяемые по конструкции - аналогу из условия соответствия расчетного значения ресурса и данных эксплуатации. Верхняя граница амплитуд для указанных законов распределения равна $4,9\sqrt{\Delta}$. Срок службы оценивается по числу "разрушающих" циклов за год эксплуатации.

Результаты, приведенные в этой главе, положены в основу подсистемы "Надежность" для оценки усталостной прочности и надежности несущих элементов тележек грузовых вагонов системы автоматизированного проектирования САПР-ГВИ (II этап).

В третьей главе изложены общие принципы построения подсистемы САПР для расчета характеристик сопротивления усталости и показателей надежности машиностроительных конструкций и требования к разработке. Описаны структура алгоритмов и пакета прикладных программ (ППП) для расчета несущих деталей тележек вагонов. Приводится описание модулей ППП.

Подсистема предназначена для выполнения конкретной проектной процедуры применительно к классу объектов, отказы которых про-

НТБ
ДНУЖТ

исходят в результате накопления усталостных повреждений, и классифицируется как проектирующая объектная подсистема. Построение её осуществляется с учетом общесистемных принципов: новых задач, системного единства, развития, включения, инвариантности, комплексности, информационного единства, совместимости, стандартности. Так как основное место в подсистеме занимает программное обеспечение, в работе изложены общие требования и даны рекомендации по его разработке.

Проектирование и введение в эксплуатацию новых, модернизация существующих конструкций несущих элементов тележек, должно сопровождаться расчетами с использованием методов оценки усталостной прочности и надежности, которые учитывают условия эксплуатации, конструктивные особенности и физическую сущность отказов. Эти предпосылки были положены в основу разработки алгоритмов и пакета программ подсистемы "Надежность". Назначение пакета определяется как специализированного, ориентированного на проведение оценки усталостной прочности, надежности несущих деталей тележек грузовых вагонов при проектировании и обработке. Условия и область применения: пакет создан для ЭВМ с операционной системой ОС ЕС ЭВМ и может применяться в подсистемах САПР грузового вагона при обеспечении надежности проектируемых конструкций несущих элементов тележек грузовых вагонов и для прогнозирования надежности существующих при модернизации их или при изменении условий эксплуатации.

Алгоритм расчета определяется набором математических моделей в зависимости от вида решаемой задачи. Так, определение характеристик сопротивления усталости на этапах проектирования осуществляется по критерию подобия усталостного разрушения и характеристикам сопротивления усталости образцов и моделей, а на стадии экспериментальных исследований - методами математической статистики по данным натурных испытаний. Эта задача решается с использованием программ I уровня. Назначение нижней границы допустимых напряжений при оценке ресурса конструкции осуществляется при помощи программы II уровня. Алгоритм определения срока службы для заданной вероятности разрушения реализован в программе II уровня, а оценки показателей надежности по критерию усталостного повреждения получаются в результате расчета по программам III уровня.

Описания структуры и схемы функционирования пакета приводятся с указанием входных и выходных величин, связей между модулями, структуры и функционального наполнения отдельных модулей.

НТ
ДНУЖТ

Входные и выходные формы представлены на листах стандартного размера в удобном для конструктора виде – графическом и табличном.

Пакет прикладных программ при создании системы автоматизированного проектирования первой очереди САПР-ГВІ прошел опытную эксплуатацию и внедрен ПО "Уралвагонзавод" им.Ф.Э.Дзержинского и Днепродзержинским вагоностроительным заводом им. газеты "Правда".

В заключение главы отмечается, что апробация алгоритмов и пакета программ осуществлена на серийных конструкциях надрессорной балки и боковой рамы. Достоверность результатов расчета подтверждается хорошим согласованием их с экспериментальными и эксплуатационными данными.

В четвертой главе приведены результаты исследования напряженного состояния от статической нагрузки и оценки статистических характеристик нагруженности серийных и опытных конструкций надрессорных балок, боковых рам тележки ЦНИИ-ХЗ. Описаны результаты исследования сопротивления усталости этих деталей при осевых нагрузках 200, 228 и 245 кН. На примере расчета серийной надрессорной балки при осевой нагрузке 200 кН оценена достоверность результатов.

Напряженное состояние несущих деталей тележек от статической нагрузки исследовалось с применением в расчетах МКЭ. Конечные-элементные модели надрессорной балки и боковой рамы представлялись пространственными схемами из плоских прямоугольных и треугольных элементов, соединенных в узлах, и отражающих в совокупности конструктивные особенности детали. По эпюрам напряжений определено опасное сечение надрессорных балок (серийной и опытной) – у шкворня: наибольшее расчетное напряжение в растянутых волокнах нижнего пояса серийной балки составило 76 МПа, а боковой – 54 МПа при осевой нагрузке 228 кН. Эти значения принимались в расчетах в качестве среднего динамического напряжения в эксплуатации. Относительный градиент напряжений в опасном сечении серийной балки составил $7,039 \cdot 10^{-3}$ 1/мм, а для балки новой конструкции – $5,741 \cdot 10^{-3}$ 1/мм. В результате исследования напряженного состояния опытной боковой рамы (усиленной) при этой осевой нагрузке получено, что наиболее нагруженным является сечение внутреннего угла буксового проема – максимальное напряжение растяжения на нижней полке – 52 МПа, $G = 13,0 \cdot 10^{-3}$ 1/мм.

Оценка динамической нагруженности несущих деталей тележки

при повышенной осевой нагрузке осуществлялась по результатам ходовых испытаний конструкций-аналогов при осевой нагрузке 200кН (проведены ВНИИЖТ) с учетом изменения условий эксплуатации и конструкции их. По имеющимся в литературе данным распределение амплитуд напряжений несущих деталей тележки за срок службы описывается законом Рэлея, параметр которого при среднем динамическом напряжении в сечении нижнего пояса серийной наддрессорной балки 59 МПа составлял 25 МПа², а в опасном сечении серийной боковой рамы - 196 МПа² при среднем напряжении 65 МПа (осевая нагрузка 200 кН). По данным расчета МЭ при осевой нагрузке 228 кН получено, что для серийных наддрессорной балки и боковой рамы значения параметра составляют 41 и 253 МПа² соответственно, а для опытных - 21,1 и 125 МПа². При повышении осевой нагрузки до 245 кН значения параметра распределения увеличатся на 10 %. Процессы изменения напряжений в несущих деталях тележки рассматриваются как узкополосные с эффективной частотой 4,5 Гц.

Оценка сопротивления усталости несущих элементов тележки выполнялась по результатам расчета с использованием разработанного пакета прикладных программ. Поэтому сначала на примере серийной наддрессорной балки была показана достоверность расчетных оценок. Сравнение оценок усталостной прочности, полученных с использованием критерия подобия усталостного разрушения и по опубликованным данным натуральных испытаний показало, что использование методов, положенных в основу алгоритмов пакета, дает удовлетворительные результаты.

Далее в этой главе приводятся полученные расчетом с использованием критерия подобия усталостного разрушения оценки характеристик сопротивления усталости серийных и опытных наддрессорных балок и боковых рам, изготовленных из различных конструкционных материалов (сталь 20Л, 20ФЛ, 20ГЛ, 20ГФЛ) при осевых нагрузках 228 и 245 кН. По этим данным предел ограниченной выносливости бесконечной и серийной наддрессорных балок из стали 20Л на базе 10⁶ циклов выше, чем у балок, изготовленных из сталей 20ФЛ, 20ГЛ. Но с увеличением базы испытаний эффект снижения предела выносливости конструкций из стали 20Л проявляется сильнее, чем при изготовлении их из низколегированных сталей, что свидетельствует о преимуществах низколегированных сталей в отношении сопротивления трещинообразованию по сравнению с углеродистыми в условиях эксплуатации при асимметричном нагружении. Количественно это характеризуется уменьшением параметра m кривой усталости.

Так, параметр m кривой усталости серийной надрессорной балки из стали 20Л равен 1,95, а для балки без опорной колонки из стали 20ГЛ $m = 2,90$; параметр C для этих балок составляет $2,4 \cdot 10^9$ и $36,4 \cdot 10^9$ МПа ($F = 0,5$). Средние значения пределов выносливости надрессорных балок на базе 10^7 циклов различаются незначительно и составляют 16,6 – 17,7 МПа при осевой нагрузке 228 кН в зависимости от конструкции и материала.

Отмечается, что увеличение осевой нагрузки незначительно влияет на сопротивление усталости крупногабаритных деталей тележки. Так, предел выносливости серийной боковой рамы из стали 20Л при увеличении осевой нагрузки от 200 до 245 кН снижается всего на 2 %. Как показали расчеты, предел выносливости усиленной боковой рамы из стали 20Л при осевой нагрузке 228 кН составит 38,8 МПа, а применение для отливки боковых рам стали 20ГДЛ позволит повысить сопротивление усталости этой конструкции – предел выносливости боковой рамы увеличится на 10 % (43,0 МПа). Спрямленная в логарифмических координатах кривая усталости её имеет больший наклон ($m = 4,3$) и значения параметра C ($10,57 \cdot 10^{13}$ МПа) на порядок выше, чем эта же рама из стали 20Л ($m = 3,9$; $C = 1,9 \cdot 10^{13}$ МПа).

Результаты проведенных исследований использовались ВНИИТ при разработке новой конструкции надрессорной балки тележки ШНИИ-ХЗ.

В заключение отмечается, что, принимая более совершенные конструктивные решения и используя прогрессивные конструкционные материалы, можно повысить сопротивление усталости несущих элементов тележки. Окончательный вывод о прочностной надежности их может быть получен в результате сопоставления характеристик сопротивления усталости и нагруженности в эксплуатации.

В пятой главе на примере серийной надрессорной балки показана возможность применения при проектировании математического и программного обеспечения подсистемы САПР для расчета характеристик сопротивления усталости и показателей надежности несущих элементов тележек грузовых вагонов. Приведены результаты оценки надежности серийных и опытных конструкций надрессорной балки и боковой рамы для назначенного срока службы 30 лет при нормативной и повышенной осевых нагрузках.

В связи с повышением осевой нагрузки на перспективу до 245 кН в настоящее время принимаются меры по обеспечению необхо-

димого уровня надежности ходовой части вагонов – совершенствуется конструкция и технология, исследуется применение новых конструкционных материалов. В частности, разработан вариант надрессорной балки без опорной колонки, проводится усиление конструкции боковой рамы, для отливки этих деталей предложена низколегированная сталь и необходимо определить надежность опытных конструкций, оценить эффективность этих мероприятий. Необходимо определить также соответствие серийных конструкций условиям эксплуатации при осевых повышенных нагрузках.

Оценка показателей надежности осуществлялась в работе расчетным методом по критерию усталостного повреждения. В качестве математической модели описания наработки до отказа использовался логарифмически-нормальный закон, параметры которого оценивались на основе расчетных значений ресурса (или срока службы) для различных вероятностей разрушения.

Расчет осуществлялся при помощи разработанного пакета прикладных программ. Поэтому на примерах серийных надрессорной балки и боковой рамы тележки ЦНИИ-ХЗ-0 сначала была проведена апробация предложенной методики расчета, математического и программного обеспечения подсистемы "Надежность" и показана достоверность полученных результатов. В результате сравнения расчетных, экспериментальных и эксплуатационных данных получено, что оценки среднего срока службы боковой рамы при определении параметров кривой усталости по критерию подобия усталостного разрушения и по данным натурных испытаний отличаются незначительно (35 и 37 лет), а расчетные функции распределения наработки до отказа находятся в 98 % -ом доверительном интервале эмпирической.

Надежность серийных и опытных конструкций несущих деталей тележки ЦНИИ-ХЗ оценивалась для условий эксплуатации при осевых нагрузках 228 и 245 кН. В этой главе приводятся оценки среднего и гамма-процентного ресурсов, сроков службы, параметры распределения наработки до отказа и зависимости вероятности безотказной работы $P(t)$, вероятности отказа $F(t)$, интенсивности отказов от времени эксплуатации: надрессорных балок (рис.1) – серийных из сталей 20Л (линия 1) и 20ФЛ (линия 3), опытных из сталей 20Л (линия 2) и 20ГЛ (линия 4); боковых рам (рис.2) – серийной и опытной из стали 20Л (линия 1,2), опытной из стали 20ГЛ (линия 3). Надрессорная балка без опорной колонки из стали 20ГЛ характеризуется высоким уровнем надежности: средний срок службы её при осевой нагрузке 228 кН составит 59 лет, тогда как средний

НТ
ДНУЖТ

Зависимости показателей надежности надпрессорных балок от времени эксплуатации: при осевой нагрузке 228 кН

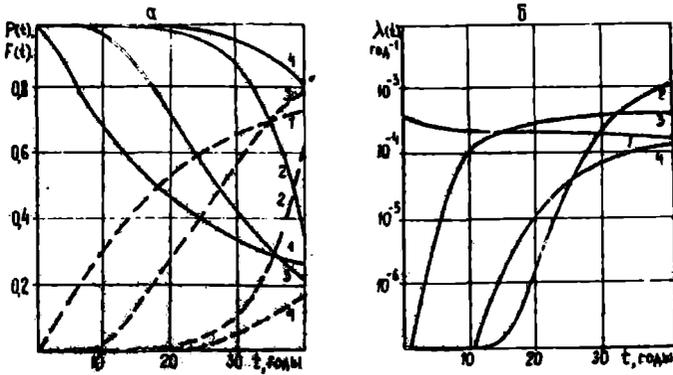


Рис. 1

Зависимости показателей надежности боковых рам от времени эксплуатации при осевой нагрузке 228 кН

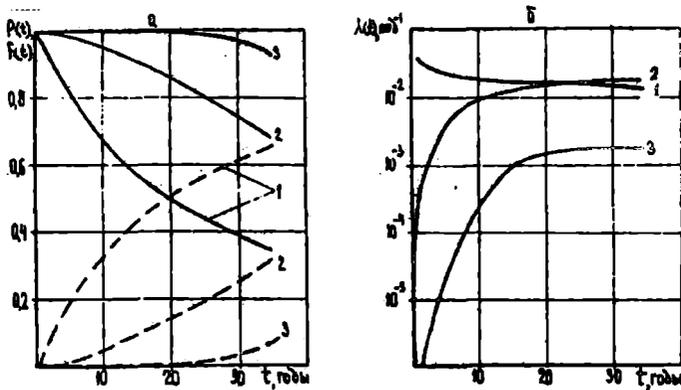


Рис. 2

НТБ
ДНУЖТ

5013a

срок службы серийных наддресорных балок составит 18 и 27 лет (сталь 20Л и 20ЭЛ). Таким образом, изменение конструкции позволит увеличить долговечность этого элемента тележки более, чем в 2 раза, а применение низколегированных сталей - в 1,5 раза. При повышении осевой нагрузки до 245 кН срок службы наддресорной балки новой конструкции снизится на 25 %.

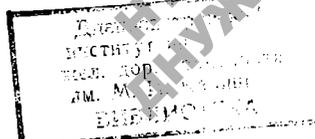
Сопротивление усталости боковой рамы тележки грузового вагона выше по сравнению с наддресорной балкой, но условия работы её значительно жестче. Так, максимальное напряжение в зоне внутреннего угла буксового проема серийной рамы может превысить в эксплуатации при осевой нагрузке 245 кН допустимое Нормами ($\sigma_{max} = 142 \text{ МПа}$). Оценка напряженного состояния опытной рамы показала, что усиление конструкции позволило снизить нагруженность в опасном сечении; средний срок службы её увеличился более, чем в 3 раза по сравнению с серийной, средний срок службы которой при осевой нагрузке 228 кН по результатам расчета составляет 20 лет. Применение нового конструкционного материала позволит повысить долговечность опытной боковой рамы более, чем на 40 %. Повышение осевой нагрузки до 245 кН приведет к увеличению количества отказов - интенсивность отказов усиленных боковых рам после 15 лет эксплуатации составит 0,001 1/год, серийных - 0,03 1/год, а средний срок службы их снизится на 15-25 %. Интенсивность отказов несущих элементов тележки возрастает в зависимости от времени, а после 10-15 лет эксплуатации намечается наибольший выход из строя их в результате появления трещин и необходимо установить тщательный осмотр и контроль состояния боковых рам и наддресорных балок по опасным зонам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработано математическое и программное обеспечение оценки усталостной прочности и надежности несущих элементов ходовой части грузовых вагонов при проектировании и эксплуатации.

2. Достоверность результатов расчета показана на примере серийных конструкций наддресорной балки и боковой рамы сравнением расчетных данных с экспериментальными и эксплуатационными.

3. Показано, что на стадии проектирования расчет можно выполнять по конструкторской документации и расчетной статической нагрузке с использованием критерия подобия усталостного разрушения, результатов усталостных испытаний образцов и моделей, изготовленных по единой технологии из того же материала, что и конструкция.



4. Предложенная методика и пакет прикладных программ применены для оценки сопротивления усталости и надежности опытных и серийных конструкций наддресорной балки, боковой рамы при нормативной и повышенной осевых нагрузках.

5. Исследовано напряженное состояние и получены оценки статистических характеристик нагруженности серийных и опытных конструкций наддресорной балки, боковой рамы тележки ЦНИИ-ХЗ при повышенных осевых нагрузках.

6. Получены характеристики сопротивления усталости серийных и опытных конструкций наддресорной балки, боковой рамы и показатели надежности их для назначенного срока службы 30 лет при нормативных и повышенных осевых нагрузках в эксплуатации. Построены зависимости вероятности безотказной работы, вероятности отказа и интенсивности отказов от времени эксплуатации.

7. Показано, что изменение конструкции и применение новых конструкционных материалов позволяет существенно повысить надежность несущих элементов тележки. В соответствии с принятыми в работе критериями оценки наддресорная балка без опорной колонки и усиленная боковая рама, изготовленные из низколегированной стали, характеризуются высоким уровнем надежности в эксплуатации при осевых нагрузках 228 кН, тогда как серийные из стали 20Л этим условиям не удовлетворяют. После 10-15 лет эксплуатации намечается наибольший выход из строя несущих деталей тележки в результате появления трещин в опасных зонах и необходимо установить тщательный осмотр и контроль их состояния.

8. Исследовано влияние величины осевой нагрузки на усталостную прочность и надежность несущих элементов тележек. При изменении осевой нагрузки от 200 до 245 кН сопротивление усталости крупногабаритных деталей меняется незначительно (предел выносливости боковой рамы снижается на 2 %, наддресорной балки - на 10%), а срок службы уменьшится в 1,2 - 1,5 раза. Вероятность безотказной работы опытной наддресорной балки за 10 лет эксплуатации при осевой нагрузке 245 кН составит 0,9999, а боковой рамы - 0,996, а через 30 лет ожидается выход из строя по трещинам в опасных сечениях около 10 %.

Результаты исследований использованы ВНИИЖТ при разработке опытных конструкций наддресорной балки тележки ЦНИИ-ХЗ. Пакет прикладных программ прошел опытную эксплуатацию и внедрен ПО "Уралвагонзавод" им.Ф.Э.Дзержинского в системе автоматизированного проектирования первой очереди САПР-ГВИ(П этап) и ДВЗ им.г-ты "ПРАВДА".

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Методы расчета надежности конструкций с учетом динамики и прочности их элементов. - В кн.: Тезисы Всесоюзной конференции по вибрационной технике (Кутаиси, ноябрь 1981г.) - Тбилиси, 1981, с.70 (соавтор Приходько А.П.).

2. Применение ЭВМ для прогнозирования усталостной прочности конструкций вагонов. - Днепропетровск, 1983. - 20 с. - Рукопись представлена Днепропетр. ин-том инж. ж.-д. трансп. Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 15.12.83, № 2459 (соавторы Блохин Е.П., Приходько А.П., Юрченко А.В.).

3. Применение ЭВМ для прогнозирования ресурса конструкций вагонов по критерию усталостного разрушения. - Днепропетровск, 1983. - 29 с. - Рукопись представлена Днепропетр. ин-том инж. ж.-д. трансп. Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 15.12.83, № 2460 (соавторы Блохин Е.П., Приходько А.П., Юрченко А.В.).

4. Автоматизация прогнозирования сопротивления усталости конструкций вагонов. - В кн.: Проблемы динамики и прочности железнодорожного подвижного состава: Межвуз. сб. научн. тр. - Днепропетровск: Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп., 1984, с. 3-11 (соавторы Блохин Е.П., Юрченко А.В.).

5. Пакет прикладных программ для расчета усталостных характеристик и ресурса проектируемых деталей вагонов. - В кн.: Проблемы механики железнодорожного транспорта. Повышение надежности и совершенствование конструкций подвижного состава: Тезисы докладов Всесоюзной конференции (Днепропетровск, май 1984 г.) - Днепропетровск: Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп., 1984, с. 202-203 (соавторы Гаркави Н.Я., Акатова И.Г.).

6. Пакет прикладных программ для расчета показателей надежности конструкций вагонов по критерию усталостного разрушения. - Днепропетровск, 1984. - 22 с. Рукопись представлена Днепропетр. ин-том инж. ж.-д. трансп. Деп. в ЦНИИТЭИтяжмаш 25.01.85 № 1403 (соавторы Гаркави Н.Я., Юрченко А.В.).

7. Прогнозирование с помощью ЭВМ надежности деталей вагонов по критерию усталостного разрушения. - В кн.: Динамика, нагруженность и надежность подвижного состава: Межвуз. сб. научн. тр. - Днепропетровск: Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп., 1985, с.102-112 (соавторы Блохин Е.П., Юрченко А.В.).

Нариус Надежда Григорьевна
РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ
УСТАЛОСТИ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ
НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

05.22.07. – Подвижной состав железных дорог и тяга поездов

Подписано к печати 5.II.86. БТ 70230.

Формат 60x84 1/16. Бумага для множительных аппаратов. Ротапринт.
Усл. печ. л. I. Уч.-изд. л. I. Тираж 100 экз. Зак. 1776. Бесплатно.

Участок оперативной полиграфии ДИИТа
320700, ГСП, Днепропетровск, Ю, ул. Акад. В.А.Лазаряна, 2

Сканировала Камьянская Н.А.

НТБ
ДНУЖТ