



Моделирование кинетики состояния колеса



Андрей САВРУХИН
Andrey V. SAVRUNIN

Алексей НЕКЛЮДОВ
Alexey N. NEKLUDOV



Роман ЕФИМОВ
Roman A. EFIMOV

Саврухин Андрей Викторович — доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

Неклюдов Алексей Николаевич — кандидат технических наук, доцент МИИТ.

Ефимов Роман Александрович — ассистент МИИТ.

Сочетание современных систем диагностики с методами компьютерного моделирования сложных нестационарных процессов, протекающих в элементах конструкций подвижного состава. Учет технологических и эксплуатационных, механических и тепловых воздействий. Возможность получать достоверную информацию об изменении структурного и напряженно-деформированного состояния объекта на любом этапе его жизненного цикла, проводить оценку остаточного ресурса и надежности.

Ключевые слова: железная дорога, подвижной состав, нестационарные процессы, компьютерное моделирование, жизненный цикл конструкции.

Современные методы оценки текущего состояния элементов конструкций подвижного состава ориентированы прежде всего на выявление уже сформировавшегося дефекта (трещины, выщербины, износ и т.д.) и не позволяют в полном объеме провести анализ кинетики нестационарных процессов, происходивших в объекте при технологических и эксплуатационных воздействиях, что снижает достоверность результатов при определении остаточного ресурса или вероятности угроз безопасности движения.

Применяемые сегодня системы диагностики не дают возможности адекватно оценить предысторию нагружения объекта, такие его состояния, которые характеризуются отсутствием выявляемого трещиноподобного дефекта, но зато отличаются наличием сформировавшихся условий для его образования.

Между тем, достаточно полный и объективный анализ кинетики нестационарных процессов в элементах конструкций подвижного состава можно осуществить с помощью компьютерного моделирования последовательных технологических и эксплуатационных воздействий с учетом их взаимного влияния и предыстории нагру-

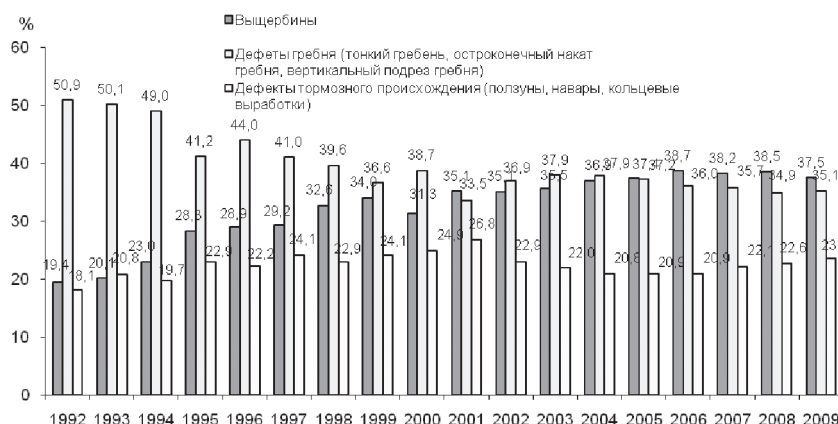


Рис. 1. Основные причины обточек колесных пар грузовых вагонов на сети железных дорог России в 1992–2009 годах.

жения. Такой подход позволяет не только оценить влияние каждого технологического или эксплуатационного фактора на наиболее часто повреждаемые элементы техники, но и выявить периоды нагружений, оказывающие определяющее воздействие на состояние объекта, его остаточный ресурс, уровень надежности.

Таким образом построенная система анализа текущего состояния объекта вполне претендует быть зачисленной в категорию интеллектуального управления. Характеристика текущего состояния транспортных средств обеспечивается в этом случае креативным комплексным подходом, включающим инструментальные методы обследования и качественное моделирование нестационарных процессов, протекающих по ходу изготовления, эксплуатации, ремонта, восстановления, упрочнения деталей и узлов рельсовой машины.

Данный подход авторы статьи предлагают использовать, например, при построении системы управления состоянием цельнокатаного колеса (ЦКК) вагона. Сейчас задачу оценки текущего его состояния берет на себя анализ геометрии элементов колеса, выявляются внешние и внутренние дефекты, в том числе трещиноподобные. Однако существенным недостатком реализованной системы является то, что текущая оценка проводится без учета кинетики тепловых процессов, структурообразования и напряженно-деформированного состояния в колесе, которые протекали в результате технологических операций при термической обработке в ходе изготовления, тепловых и механических

воздействий в период эксплуатации, на этапах ремонта, восстановления и упрочнения столь нагруженной детали вагонной конструкции.

Цельнокатанные колеса подвижного состава являются элементами ходовых частей, непосредственно определяющими безопасность перевозочного процесса. Анализ данных по отказам таких колес в эксплуатации свидетельствует о том, что наибольшее количество дефектов в последние годы приходится на выщербины поверхности катания (рис. 1).

Обращает на себя внимание тот факт, что доля повреждений выщербинами в общем количестве отказов с 1992 по 2009 год увеличилась примерно в 2 раза и остается стабильной в течение последних десяти лет. В соответствии с «Классификатором неисправностей вагонных колесных пар и их элементов», принятым в ОАО «РЖД», выделяются три вида выщербин: по светлым пятнам, ползунам, наварам; по усталостным трещинам; по термическим трещинам на поверхности катания обода колеса. Все выщербины являются обычно следствием эксплуатационных тепловых и механических воздействий на ЦКК, представляют собой «местное разрушение в виде выкрашивания металла поверхности катания колеса» [1] и могут считаться результатом сложных нестационарных процессов и комплексно-термомеханического влияния.

Следует отметить, что если механические воздействия на ЦКК приводят главным образом к протеканию деформационных процессов и накоплению пластических деформаций в приповерхностных слоях





зоны контакта колеса с рельсом, то тепловые воздействия, связанные с торможениями, могут приводить к сложным нестационарным процессам теплопереноса, структурным и фазовым превращениям, кинетике напряженно-деформированного состояния, сформированного на этапе термической обработки в результате закалки и последующего отпуска, а также способствуют накоплению пластической деформации как на поверхности катания, так и в зоне перехода от обода к диску для ЦКК с прямолинейным диском или в средней части диска — у колес с криволинейным диском независимо от конструкции колеса (европейское, российское).

Нестационарные термодеоформационные процессы, протекающие в ЦКК по ходу эксплуатации, не могут быть проанализированы на нынешнем этапе развития техники инструментальными методами. Оценка их влияния на текущее состояние колеса, надежность, безотказность, ремонтпригодность возможна лишь на основе результатов компьютерного моделирования нелинейных нестационарных процессов теплопереноса, структурных и фазовых превращений, а главное — при решении задачи термовязкоупругопластичности с учетом кинетики фазового и структурного состояния, а также анализа всего комплекса имеющихся у объекта свойств.

Применение данного подхода проиллюстрировано на примере кинетики тепловых процессов и структурных превращений в ЦКК грузового вагона при движении на отрезке участка Грязи-Воронежские — Усмань [4].

Рассмотрен вариант трехкратного последовательного торможения композиционными колодками с параметрами теплового вложения:

1-е торможение: нагрев до 40 с, потом охлаждение до 144-й с, мощность теплового вложения — 174.2 Вт/см^2 ;

2-е торможение: нагрев со 144 до 174 с, охлаждение до 354-й с, мощность теплового вложения — 36.5 Вт/см^2 ;

3-е торможение: нагрев с 354 до 362 с, охлаждение до 398-й с, мощность теплового вложения — 137 Вт/см^2 .

На рис. 2 представлена расчетная осесимметричная конечно-элементная модель

ЦКК с прямолинейным диском и указанием точек, где проводился анализ тепловых процессов, структурных и фазовых превращений, имевших место в результате торможений при движении грузового вагона на указанном участке.

На рис. 3 представлено распределение температур по сечению обода колеса на 40 с первого торможения. Анализ изолиний температур свидетельствует о том, что тепловое воздействие в столь короткий период времени приводит к высокому градиенту температур в приповерхностных слоях. Причем в точках на поверхности катания в зоне воздействия тормозной колодки (узлы 1970—1997 рис. 2) максимальные температуры превышают значения 727°C (рис. 4), что говорит о протекании фазовых и структурных превращений, связанных с переходом феррито-цементитных смесей в аустенит, то есть начале протекания процесса аустенизации стали в зоне контакта колеса с тормозной колодкой.

После завершения торможения нагретая область поверхности колеса подвергается интенсивному охлаждению за счет теплоотвода в обод и диск колеса. Результаты компьютерного моделирования, проведенного на основе методического и программного обеспечения, разработанных в МИИТ, свидетельствуют о том, что в контрольных точках (рис. 2) скорости охлаждения превысили критические, и это привело к образованию мартенсита на поверхности катания колеса, процентное содержание которого зависит от максимальной температуры нагрева и интенсивности охлаждения (рис. 5).

Максимальные значения температур получены в узле с номером 1987, который находится на поверхности катания колеса в средней части зоны контакта колеса с тормозной колодкой. После охлаждения колеса в этой зоне максимальное количество мартенсита составило 86%.

На рис. 6 представлены графики изменения температур в рассматриваемых точках при движении грузового вагона по участку при реализации трехкратного торможения с параметрами, приведенными выше.

Анализ полученных результатов показывает, что максимальные значения температур в точках на поверхности катания

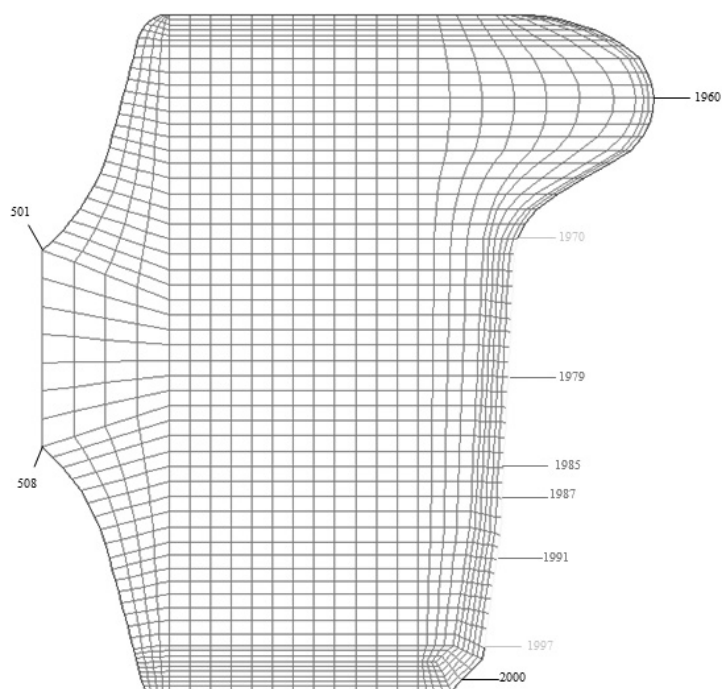


Рис. 2.
Осесимметричная
конечно-
элементная модель
цельнокатаного
колеса.

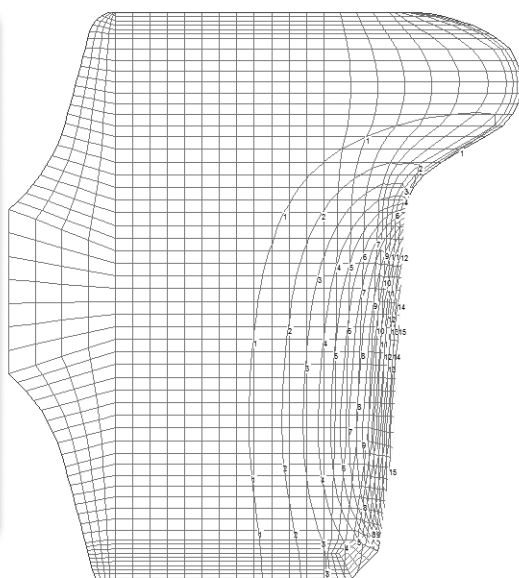
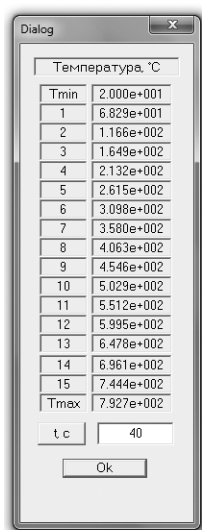


Рис 3. Распределение
температур в сечении
обода ЦКК в момент
окончания первого
торможения (40 с).

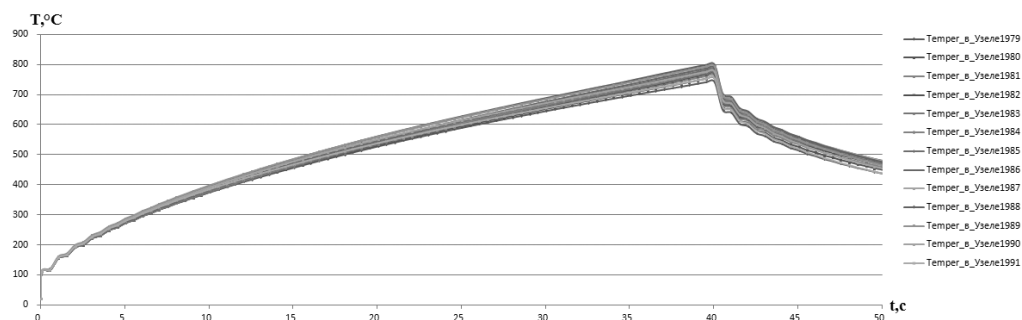


Рис. 4. График максимальных температур в контрольных точках в момент окончания торможения на 40 с.





Рис. 5. Распределения мартенсита и максимальных температур в точках на поверхности катания (толщина обода колеса 70 мм).

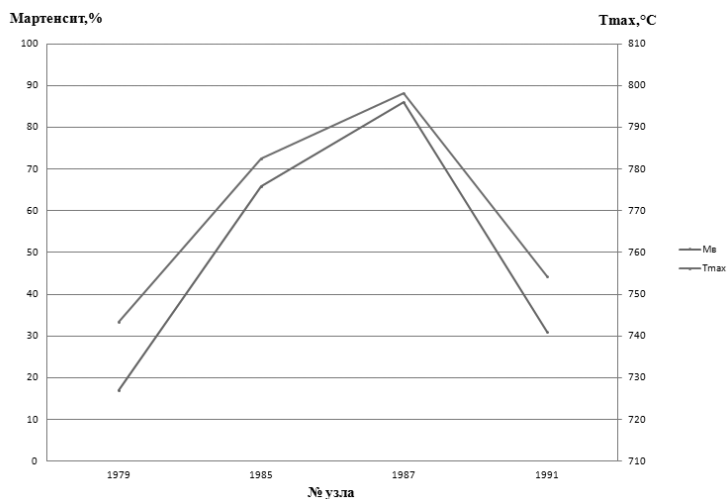
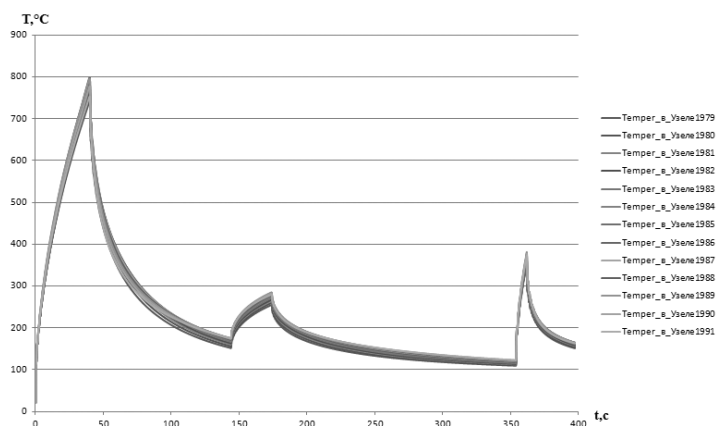


Рис. 6. Графики изменения температур в рассматриваемых точках при движении грузового вагона при реализации трехкратного торможения.



колеса в момент окончания второго торможения не превысили 300°C , а третьего торможения — 400°C . То есть повторной аустенизации стали в этих зонах не происходило. Однако нагрев до этих температур обеспечил возможность распада мартенсита, сформировавшегося после первого торможения.

На рис. 7 представлена кинетика структурного состава в узле с номером 1987 в процессе движения грузового вагона по рассматриваемому участку. В результате нагрева при первом торможении наблюдается переход феррито-цементитной смеси (исходной структуры) в аустенит (до 86%). При последующем охлаждении образовавшийся аустенит переходит в мартенсит.

Повторный нагрев (второе торможение) приводит к распаду мартенсита на феррито-цементитные смеси высокой степени дисперсности — троостит. При третьем

тепловом воздействии фазовых и структурных изменений не наблюдается. Следует отметить, что в результате первого торможения на поверхности колеса образуется смесь мартенсита с феррито-цементитной смесью (исходной структурой колеса), которая характеризуется повышенной твердостью и хрупкостью, пониженной пластичностью, что создает благоприятные условия при движении колеса и наличии динамических воздействий для образования микротрещин.

Таким образом, механические характеристики колеса (например, твердость) на поверхности катания к моменту завершения всех трех тепловых воздействий не будут существенно отличаться от первоначальных значений. Однако формирование мартенситной структуры в процессе торможения и механические воздействия при движении могут явиться достаточным условием для образования микротрещин

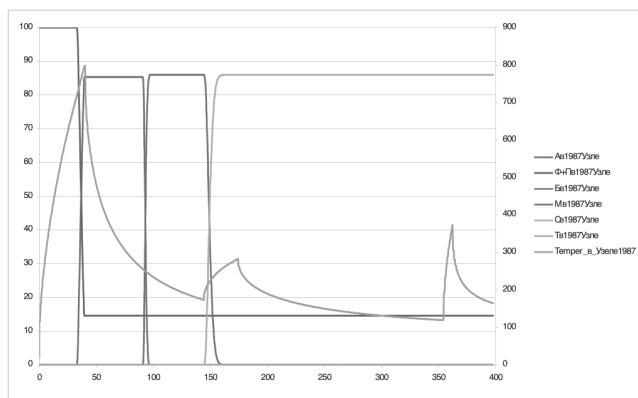


Рис. 7. Кинетика структурного состава в узле с номером 1987 в процессе движения грузового вагона по рассматриваемому участку.

на поверхности катания колеса, которые, в свою очередь, при определенных условиях могут приводить к выкрашиванию металла — образованию выщербин.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты подтверждают, что компьютерное моделирование в отличие от инструментальных методов позволяет получать достоверную информацию об изменении структурного и напряженно-деформированного состояния объекта в результате технологических и эксплуатационных воздействий на любом этапе жизненного цикла, проводить оценку остаточного ресурса и надежности с учетом предыстории нагружения и анализа процессов, имевших место.

Разработка и применение новых методов компьютерного моделирования и анализа нестационарных процессов в элементах конструкций подвижного состава при различных видах эксплуатационных и технологических воздействий в течение всего жизненного цикла в сочетании с ме-

тодами неразрушающего контроля обеспечивают проведение объективной оценки текущего состояния конструкции, выявление условий, которые могут способствовать образованию трещин с последующим разрушением объекта в короткие сроки. Важно и то, что это связано с анализом накопления остаточных деформаций, кинетики структурного состава и предпосылок к зарождению трещиноподобных дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Классификатор неисправностей вагонных колесных пар и их элементов/ОАО «РЖД». — М., 2007.
2. Цельнокатанные железнодорожные колеса. Изготовление, эксплуатация, восстановление, обеспечение надежности: Монография/Киселев С. Н., Киселев Алексей С., Киселев Александр С., Неклюдов А. Н. Саврухин А. В. — Казань: Печать — Сервис XXI, 2009.
3. Колеса локомотивов. Изготовление, эксплуатация, упрочнение, обеспечение надежности: Монография/Киселев С. Н., Киселев Алексей С., Киселев Александр С., Неклюдов А. Н. Саврухин А. В. — М.: Печать — Сервис XXI, 2010.
4. Саврухин А. В., Неклюдов А. Н., Терехов А. В. Гарантии безопасности и состояния ПС// Мир транспорта. — 2011. — № 5.

SIMULATION OF THE KINETICS OF THE WHEEL

Savruhin, Andrey V. — D.Sc. (Tech), professor, head of research department of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

Nekludov, Alexey N. — Ph. D. (Tech), associate professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

Efimov, Roman A. — Ph. D. assistant lecturer at the department of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

The article deals with the problems of conjunction of modern systems of troubleshooting with the methods of computer-aided simulation of compound non-steady processes in the subunits of rolling stock. The authors take into account engineering, operative, mechanical and heat impacts. The simulation gives opportunity to receive reliable information on the changes of structural and deflected mode of an studied object at any stage of its life cycle and to assess its remaining life and infallibility.

Key words: railway, rolling stock, non-steady process, computer-aided simulation, life-cycle of a structure.

Координаты авторов (contact information): Саврухин А. В. — savruhin@niit-miit.ru, Неклюдов А. Н. — alexis_skin@mail.ru

