



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт  
подвижного состава (АО "ВНИКТИ")

## **ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

**специализированного заседания**

# **СЕМИНАРА ПО МЕХАНИКЕ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ИМ. И.В. КРАГЕЛЬСКОГО**

по проблематике «колесо – рельс» в рамках мероприятий  
«Десятилетия науки и технологий».

**16 ноября 2022 года**

**Москва**

## **Руководители семинара**

### **От АО «ВНИКТИ»**

*Лунин Андрей Александрович*, заместитель генерального директора по науке, к.т.н.

*Волохов Григорий Михайлович*, заведующий отделением, д.т.н.

### **От ИПМех РАН**

*Солдатенков Иван Алексеевич*, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.

*Торская Елена Владимировна*, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор РАН

### **Ученый секретарь семинара**

*Цуканов Иван Юрьевич*, старший научный сотрудник, к.т.н., ИПМех РАН

## Содержание

1. **Захаров С.М.** Подходы к моделированию контактно-усталостной поврежденности рельсов в том числе в зоне сварного стыка. 4-5
2. **Волохов Г. М., Оганьян Э. С., Князев Д. А.,** Актуальные задачи исследований перевозочного процесса в разрезе проблемы «колесо – рельс» 5-6
3. **Коссов В. С., Протопопов А. Л., Литвинов М. А.** Моделирование электро-контактной сварки и термообработки сварных стыков рельсов 6-7
4. **Цуканов И.Ю., Мещерякова А.Р.** Моделирование напряженного состояния в контакте колеса и рельса в зоне сварного стыка 7-8
5. **Лунин А. А., Спиоров А. В.** Исследование нагруженности участков БАМа с целью увеличения провозной способности 8-9
6. **Краснов О. Г., Акашев М. Г., Никонова Н. М.** Эксплуатационные факторы, определяющие выкрашивания на поверхности катания внутренних рельсов в кривых 9-10
7. **Шкалей И.В., Заграничек К.Л., Муравьева Т.И., Торская Е.В., Шур Е.А., Щербакова О.О.** Исследование материала рельсов в области сварных стыков после эксплуатации. 11-12
8. **Щербакова О.О., Муравьева Т.И., Шкалей И.В.** Изучение изменения микроструктуры и механических свойств рельсовой стали после термической обработки. 12

## **Подходы к моделированию контактно-усталостной поврежденности рельсов в том числе в зоне сварного стыка**

<sup>1</sup>Захаров С.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта»

[zakharov.sergey@vniizht.ru](mailto:zakharov.sergey@vniizht.ru)<sup>1</sup>; [smzakharov@yandex.ru](mailto:smzakharov@yandex.ru)<sup>2</sup>

Имеется несколько групп моделей которые: (а) содержат определение амплитудных значений максимальных касательных или эквивалентных напряжений в условиях циклического нагружения и расчет функции поврежденности с использованием экспериментально определенного закона накопления повреждений для данного материала рельса; б) основаны на получении количественных характеристик приспособляемости материалов к циклическому нагружению в виде показателя повреждаемости устанавливаемого на основе лабораторных испытаний моделирующих взаимодействие колеса и рельса; (в) основаны на применении критериев, имеющих физический смысл энергии выделяющейся на контакте в виде произведения тангенциальной силы на относительное проскальзывание; (г) прогнозируют накопление пластической деформации в условиях циклического нагружения на базе серии стандартных испытаний рельсовых сталей и конечно-элементного моделирования, при котором находится стабилизированный максимум степени исчерпания пластичности материала.

В одной из работ исследование и моделирование накопления пластической деформации в сварных соединениях рельсов включало воспроизведение диапазона микроструктур и механических свойств, экспериментального определения накопления пластической деформации материалов при циклическом нагружении (ratchatting), воспроизведения контактных параметров и динамических воздействий необходимых для создания объемной модели пластической деформации в зоне сварных стыков. Установление границы приспособляемости материала к циклическому нагруженную на основе конечно-элементного моделирования осуществлялось на базе определения стабилизированного максимума степени исчерпания предела пластичности материала. Для воспроизведения неупругого поведения материала и его эволюции под действием многократного контакта качения с проскальзыванием, применялись две последовательно применяемые конечно-элементные модели.

В одной из работ проводилось воспроизведение поверхностных явлений, вызванных качением с проскальзыванием на испытательном стенде, воспроизводящем в натуральную величину взаимодействие колеса и рельса. А для компьютерного моделирования процессов создана двух масштабная конечно-элементная модель, позволяющая исследовать контакт шероховатых

поверхностей на разных масштабных уровнях в условиях качения с проскальзыванием.

Приводятся сведения о сопоставлении моделей возникновения контактно-усталостных повреждений в рельсах, а также об анализе критериев прогнозирования контактно-усталостных повреждений в колесах железнодорожного подвижного состава и рельсах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51005

### **Актуальные задачи исследований перевозочного процесса в разрезе проблемы «колесо – рельс»**

<sup>1</sup>Волохов Г. М.<sup>1</sup>, <sup>1</sup>Оганьян Э. С.<sup>2</sup>, <sup>1</sup>Князев Д. А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»)

[volokhov-gm@vnikti.com](mailto:volokhov-gm@vnikti.com)<sup>1</sup>, [oganian-es@vnikti.com](mailto:oganian-es@vnikti.com)<sup>2</sup>, [knyazev-da@vnikti.com](mailto:knyazev-da@vnikti.com)<sup>3</sup>

Постановка цели достижения ресурса ж. д. полотна 2,5 млрд. тонн брутто пропущенного груза влечёт за собой разработку и верификацию моделей его оценки для всех элементов пути с учётом влияния климатических и эксплуатационных факторов. Это направление исследований актуально также с точки зрения создания инструмента как методологии позволяющей в ускоренном режиме давать прогноз подтверждённого ресурса элементов конструкции пути и принимать решение о допуске на сеть.

Под углом зрения «колесо – рельс» рассмотрены нагруженность и напряженное состояние ее элементов. В докладе приведена модель типовой трёхэлементной вагонной тележки имитирующая её движение по стрелочному переводу:

- 1) КЭ разбиение, геометрия системы: ТЕЛЕЖКА – КОЛЕСО – РЕЛЬС.
- 2) Результаты моделирования: распределения усилий, эквивалентных напряжений по времени.

С использованием приведенной модели исследовать распределение изгибных продольных напряжений в головке рельса при вертикальном нагружении от колес типовой вагонной двухосной тележки при движении в прямой. Исследование влияния «провисания» шпал.

Решение этой же задачи для колеса, потребовало развитие и усложнение модели в системах MSC.Marc, MSC.Patran/Fatigue для

исследования контактно - усталостного ресурса «колесо – рельс» с взаимодействием цельной колёсной парой и выделенный фрагменты КЭ схемы подконструкции для более детального анализа компонент тензора напряжений в рельсе.

Показан расчет НДС в контактной зоне «колесо - рельс», картины изменения эквивалентных напряжений в объёме и эпюры изменения компонент тензора напряжений в рельсе при прохождении колеса через контрольную точку.

Представлены модели оценки живучести рельса при контролируемом росте трещины по механизму отрыва.

Этот подход демонстрирует возможности и тенденции дальнейшего развития моделей к разработке виртуальных методов испытаний объектов подвижного состава и пути.

Даны некоторые обобщения, которые сводятся к нашему предложению об открытии долгосрочной исследовательской темы.

## **Моделирование электро-контактной сварки и термообработки сварных стыков рельсов**

<sup>1</sup>Коссов В.С.<sup>1</sup>, <sup>1</sup>Протопопов А.Л.<sup>2</sup>, <sup>1</sup>Литвинов М.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»)

[vskossov@icloud.com](mailto:vskossov@icloud.com)<sup>1</sup>, [protopopov-al@vnikti.com](mailto:protopopov-al@vnikti.com)<sup>2</sup>, [litvinov-ma@vnikti.com](mailto:litvinov-ma@vnikti.com)<sup>3</sup>

Формирование сварных стыков рельсов и их последующая термообработка, это сложный нелинейный физический процесс.

В результате могут появиться дефекты, поле остаточного напряженно деформированного состояния в зоне сварного шва, что значительно влияет на его сопротивление усталости и статическую прочность и в итоге на безопасность шва в процессе эксплуатации. Поэтому необходимо контролировать эти процессы, через создание виртуальных моделей основанных на методе конечных элементов с использованием современных программных продуктов. В данной работе рассмотрена конечно элементная модель сварного шва, с имитацией электро-контактной сварки рельсовых стыков и их последующую термообработку. При моделировании электроконтактной сварки учтены основные значимые параметры, характеризующие этот процесс. Решён модельный пример по стыковой контактной сварке рельсового стыка. Продемонстрирована возможность решения задач данного класса с использованием технологий компьютерного моделирования в пакете Simufact Welding. При моделировании термообработки сварного шва используются положения газовой динамики. Предварительный индукционный нагрев сварного стыка рельсов выше

температуры его аустенизации имитируется внутренними тепловыми источниками. При дальнейшем обдуве стыка воздухом применялся конвективный теплообмен между ними. Плотность воздуха переменная, то есть моделируется его сжимаемость. По результатам получения нестационарного распределения температур стыка после его охлаждения проведен структурный анализ для определения его остаточного напряженно деформированного состояния. Продемонстрирована возможность решения задач данного класса с использованием технологий компьютерного моделирования в пакете ANSYS.

Для получения точных результатов для реальных задач необходимы точные исходные данные и результаты натурных экспериментов для калибровки расчётных моделей. Основываясь на предложенной методике можно решать реальные практические задачи.

В заключение можно отметить, что моделирование может позволить получать знания о том, что мы делаем и управлять эти процессом.

## **Моделирование напряженного состояния в контакте колеса и рельса в зоне сварного стыка**

<sup>1,2</sup>Цуканов И.Ю.<sup>1</sup>, <sup>1,2</sup>Мещерякова А.Р.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

<sup>2</sup> НТУ «Сириус»

[ivan.yu.tsukanov@gmail.com](mailto:ivan.yu.tsukanov@gmail.com)<sup>1</sup>, [mif-almira@yandex.ru](mailto:mif-almira@yandex.ru)<sup>2</sup>

В зонах сварных соединений рельсов при прохождении подвижного состава со временем образуются дефекты (чаще всего в виде седловины). Причиной их образования является локальное смятие головки рельса под действием контактных напряжений вследствие наличия участков пониженной твёрдости в зоне сварного соединения. При циклических нагрузках в подповерхностных слоях рельса в области дефекта накапливаются контактно-усталостные повреждения. В качестве одного из критериев разрушения при моделировании накопления контактно-усталостных повреждений рельсов и колёс используется величина максимальных касательных напряжений. Цель работы – на основе моделирования взаимодействия колеса и рельса провести анализ влияния условий контакта и геометрии неровности на контактные и внутренние напряжения рельса в зоне сварного стыка. В рамках разработанного подхода были реализованы следующие этапы моделирования: расчет коэффициента динамичности нагрузки при прохождении колесом участка рельса с дефектом; решение контактной задачи о качении колеса по рельсу с учетом

формоизменения рельса в области смятия; определение максимальных касательных напряжений в условиях качения с проскальзыванием.

Анализ геометрии дефектов рельсов в зоне сварных стыков на контактной поверхности (седловин) показал, что при прохождении колеса чаще реализуется динамический безударный режим взаимодействия. Для определения коэффициента динамичности нагрузки была составлена и решена система уравнений движения колеса по рельсу. Результаты расчетов показали, что коэффициент динамичности главным образом определяется глубиной седловины и жёсткостью системы. При смятии происходит выполаживание поверхности катания головки рельса, т.е. область контакта из эллиптической становится близкой к прямоугольной. Задача нахождения касательных контактных напряжений решалась с помощью вариационного метода. Результаты анализа напряженного состояния показали, что с ростом глубины седловины максимальное контактное давление и касательное напряжение уменьшаются, а распределение максимальных касательных напряжений по глубине становится более равномерным.

Исследование выполнено по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А20-120011690132-4) и частично при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51005.

## **Исследование нагруженности участков БАМа с целью увеличения провозной способности**

<sup>1</sup>Лунин А.А.<sup>1</sup>, <sup>1</sup>Спиров А. В.<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»)

[lunin-aa@vnikti.com](mailto:lunin-aa@vnikti.com)<sup>1</sup>, [timakov-mv@vnikti.com](mailto:timakov-mv@vnikti.com)<sup>2</sup>

В 2021-2022 году учеными и специалистами АО «ВНИКТИ» совместно с учеными и специалистами АО «ВНИИЖТ» в соответствии с Календарным планом работы НТР ОАО «РЖД» «Оптимизация взаимодействия в системе «колесо-рельс», выполнены исследования на участках пути Байкало–Амурской магистрали в следующем объеме:

- аналитическая работа по изучению характеристик конструкций пути, его состояния, с последующим выбором участков для проведения испытаний;
- экспериментальная часть, включающая 4 этапа испытаний по воздействию на путь на Дальневосточной ж.д. и специальные эксперименты на территории АО «ВНИКТИ»;



- теоретические исследования методами компьютерного моделирования, включающие разработку моделей подвижного состава и верхнего строения пути.

По результатам проведенных комплексных исследований установлено:

1. Существенного отличия по воздействию на путь грузовых поездов массой 7100 т по сравнению с поездами массой до 6300 т не выявлено (на пути как с деревянными, так и железобетонными шпалами).

2. При несоответствии скорости движения поездов и превышения наружного рельса минимальное значение непогашенного ускорения в кривых участках пути ниже рекомендуемого для грузового движения, что приводит к повышенному вертикальному износу внутреннего рельса (преимущественно на пути с железобетонными шпалами).

3. Наличие сочетаний отступлений в плане (рихтовки) и перекоса 2 степени на пути как с деревянными, так и железобетонными шпалами приводит к значительному увеличению боковых сил от колес на рельсы, которые могут превышать допустимое значение 100 кН.

4. Усиление кривых участков пути скреплениями КД через 4-5 шпал со скреплениями ДО снижает интенсивность роста отступлений в плане.

В заключении следует отметить, что накоплен массив данных для последующего использования его в построении и верификации моделей в системе «колесо-рельс». На основе представленных разработанных моделей предполагается создание цифрового двойника Восточного полигона «подвижной состав – путь».

## **Эксплуатационные факторы определяющие выкрашивания на поверхности катания внутренних рельсов в кривых**

<sup>1</sup>Краснов О.Г.<sup>1</sup>, <sup>1</sup>Акашев М.Г.<sup>2</sup>, <sup>1</sup>Никонова Н.М.<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»)

[krasnov-og@vnikti.com](mailto:krasnov-og@vnikti.com)<sup>1</sup>, [akashev-mg@vnikti.com](mailto:akashev-mg@vnikti.com)<sup>2</sup>, [nikonova-nm@vnikti.com](mailto:nikonova-nm@vnikti.com)<sup>3</sup>

Исследования по воздействию на путь проведены на горно-перевальном участке перегона Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской ДИ показали:

1. Средние величины вертикальных сил от полувагонов с осевыми нагрузками 230 кН составили 118,8 кН при средних квадратических отклонениях  $\pm 17,9$  кН, при этом максимальные наблюдаемые значения достигали 163 кН.

2. Средние значения боковых сил составили 37,9 кН при среднеквадратических отклонениях  $\pm 16,9$  кН. Характер изменения боковых

сил носил знакопеременный характер, максимальные наблюдаемые значения достигали +80,2 кН, - 45кН.

3. Средние значения вертикальных сил от полувагонов с осевыми нагрузками 245 кН составили 133,3 кН со среднеквадратическими отклонениями  $\pm 19,9$  кН, средние значения боковых сил составили 43,7 кН при среднеквадратических отклонениях 16,6 кН, максимальные наблюдаемые значения боковых сил достигали +85 кН, -45 кН.

Анализ динамики изменения подуклонки в кривых малых радиусов по данным проездов ПУТЕОБСЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМПЛЕКСА показал:

1. Изменение подуклонки на внутренних и наружных рельсах представляет случайный характер и определяется величиной и направлением уклонов:

2. На подъемах более интенсивно расстраивается подуклонка внутреннего рельса, имеет знакопеременный характер и в среднем изменяется в диапазоне от 1/15 до 1/30;

3. На спусках имеет место изменение подуклонки как наружного, так и внутреннего рельсов. Наблюдается более интенсивное расстройство подуклонки наружного рельса, которое характеризуется резкими одиночными отступлениями в сторону увеличения до 1/12...1/13. На внутреннем рельсе изменение подуклонки имеет знакопеременный с изменением в диапазоне от 1/15 до 1/30.

В результате моделирования установлено:

1. Нормальные давления, касательные напряжения и площадь поверхности катания зоны взаимодействия колес с рельсами внутренних нитей в кривых малого и среднего радиусов являются величинами переменными и зависят от ширины колеи, подуклонки рельсов, уровней непогашенного ускорения, степени изношенности колес и рельсов, величины возвышения наружного рельса. Наиболее значимыми факторами является ширина колеи для нового профиля колеса и подуклонка рельсов.

2. Увеличение ширины колеи при одновременном движении колесной пары с наклоном, определяемым возвышением наружного рельса, приводит к смещению КП к наружному рельсу, что изменяет геометрию контакта уменьшая его площадь и приводит к росту как максимальных, так и касательных напряжений.

3. Отклонение подуклонки от номинального значения приводит к сокращению площади пятна контакта и интенсивному росту нормальных и касательных напряжений. При увеличении подуклонки рост напряженного состояния зоны контакта колеса с рельсом происходит более интенсивно, чем при уменьшении подуклонки.

## Исследование материала рельсов в области сварных стыков после эксплуатации

<sup>1,2</sup>Шкалей И.В.<sup>1</sup>, <sup>3</sup>Заграничек К.Л., <sup>1</sup>Муравьева Т.И.<sup>1</sup>, <sup>1,2</sup>Торская Е.В., <sup>3</sup>Шур Е.А.,  
<sup>1,2</sup> Щербакова О.О.

<sup>1</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

<sup>2</sup> НТУ «Сириус»

<sup>3</sup>АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта»

[ioann\\_shiva@list.ru](mailto:ioann_shiva@list.ru)<sup>1</sup>

Рельсовая сталь в зоне сварного электроконтактного стыка характеризуется локальным понижением твердости, которое обусловлено процессом сварки и термической обработкой после сварки. В результате в этой области многократная пластическая деформация в процессе эксплуатации приводит к изменению формы, а именно происходит образование протяженной лунки разной геометрической формы. В области лунки зафиксированы случаи разрушения поверхностных слоев рельса, в том числе по контактно-усталостному механизму.

В данной работе представлены экспериментальные данные об изменении механических свойств и структуры образцов рельсов после эксплуатации, отличающихся главным образом значением пропущенного тоннажа с момента первичной укладки до изъятия. Исследования проводились на подготовленных металлографических шлифах продольного вертикального сечения профиля рельса в области сварного стыка. Методы сканирующей электронной микроскопии и метод измерения твердости на микроуровне выступали в качестве основных применяемых методов. На основе полученных данных моделируется процесс накопления контактно-усталостных повреждений в приповерхностных слоях головки рельса.

Показано, что каждой зоне сварного стыка свойственны свои структурные особенности, что соотносится с локальными изменениями твердости материала. Установлено, что в процессе сварки происходит локальное обезуглероживание, приводящее к образованию зерен феррита на границах перлитных колоний. На поверхности обнаружен деформированный слой с признаками различных стадий разрушения материала, в том числе с зарождающимися с поверхности усталостными трещинами. В результате моделирования установлено, что сочетание формоизменения (уплощения) головки рельса и наличия начальной поврежденности приводит к тому, что максимальная поврежденность и зарождение усталостной трещины имеет место на поверхности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51005.

## **Изучение изменения микроструктуры и механических свойств рельсовой стали после термической обработки**

<sup>1,2</sup>Щербакова О.О.<sup>1</sup>, <sup>1</sup>Муравьева Т.И., <sup>1,2</sup>Шкалей И.В.

<sup>1</sup>Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

<sup>2</sup> НТУ «Сириус»

[shcherbakovaoo@mail.ru](mailto:shcherbakovaoo@mail.ru)<sup>1</sup>

В работе исследовали рельсовую сталь в зоне сварных стыков. В этой зоне имеет место локальное понижение твердости, которое обусловлено как процессом сварки, так и термической обработкой после сварки. Микроструктура и механические свойства сварного стыка существенно зависят от типа сварочного устройства, химического состава рельсовой стали, удаленности от сварного шва.

Объектами исследования являлись образцы, вырезанные из рельсов в зоне сварных стыков. Для данных образцов были проведены измерения твердости головки (на глубине 10 мм от области катания) на продольной дорожке, захватывающей зону сплавления и основной металл. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что на всех исследуемых образцах в зоне сварного стыка присутствуют «провалы» по показателям твердости. Изменение твердости объясняется закономерностями структурных превращений при термическом воздействии в процессе сварки.

Для исследования структурных изменений в исследуемых образцах в работе использовали растровый электронный микроскоп (РЭМ), особое внимание уделялось зонам с максимальным разупрочнением. Микроструктура стали представляет собой пластинчатый перлит. При сварке сталь подвергается термическому воздействию, и пластинчатая структура может вырождаться в так называемую зернистую (сфероидизированную) структуру. При этом структура зернистого перлита обладает пониженными характеристиками твердости по сравнению с пластинчатой структурой и располагается в зоне, которая не прошла аустенитизацию, а прошла высокий отпуск. Таким образом в зоне с наименьшей твердостью наблюдается наибольшее сосредоточения зернистого перлита, которая локализована в области около границы зоны термического влияния от сварки (или термообработки) и основного металла рельса, который не был подвержен нагреву до температур перекристаллизации.

Исследование выполнено по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А20-120011690132-4) и частично при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51005.