

Impact Factor:

| | | |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 3.117 | SIS (USA) = 0.912 | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | PIHII (Russia) = 0.156 | PIF (India) = 1.940 |
| GIF (Australia) = 0.564 | ESJI (KZ) = 4.102 | IBI (India) = 4.260 |
| JIF = 1.500 | SJIF (Morocco) = 5.667 | |

SOI: [1.1/TAS](http://s-o-i.org/1.1/TAS) DOI: [10.15863/TAS](https://doi.org/10.15863/TAS)

International Scientific Journal Theoretical & Applied Science

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2018 Issue: 11 Volume: 67

Published: 26.11.2018 <http://T-Science.org>

QR – Issue



QR – Article



SECTION 2. Applied mathematics. Mathematical modeling.
UDC 539.4

Michael A. Bubnov
Ph.D., senior scientist,
MERI RAS
aviacapellan@mail.ru

Sergey I. Dubinskiy
Ph.D., senior scientist,
Vice-director of MMC VNIIZHT RZD,
sergdubserg@gmail.com

Evgeny E. Krasnovskiy
PhD, Senior lecturer, Department of Applied Mathematics,
Federal state budgetary institution of higher professional
education. Bauman Moscow State Technical University.
National research university of technology
ee_krasnovskiy@mail.ru

PECULIARITIES OF LIFETIME PREDICTION OF TRACK STRUCTURE FASTENINGS WITH APPLICATION OF NUMERICAL MODELLING

Abstract: ANSYS stress-strain analysis of track structure with track panel fastenings of KB-65 and ARS types was performed and number of cycles before failure was assessed using special software. Influence of load value at different speeds on fastening lifetime was analyzed. Comparison with field measurements was made.

Key words: track structure, number of cycles before failure, stress-strain state, finite element method, track panel fastenings.

Language: Russian

Citation: Bubnov, M. A., Dubinskiy, S. I., & Krasnovskiy, E. E. (2018). Peculiarities of lifetime prediction of track structure fastenings with application of numerical modelling. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 11 (67), 137-146.

Soi: <http://s-o-i.org/1.1/TAS-11-67-22> **Doi:**  <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2018.11.67.22>

ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА СКРЕПЛЕНИЙ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация: Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния верхнего строения участков пути со скреплениями рельсоопальной решетки КБ-65 и АРС посредством программы ANSYS, а также оценка числа циклов до разрушения с помощью специализированного программного обеспечения. Проанализировано влияние величины нагрузки при различных скоростях на ресурс скрепления, произведено сравнение с данными реальных замеров.

Ключевые слова: Верхнее строение пути, скрепление рельсоопальной решетки, физико-математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние, число циклов до разрушения.

Введение

Задача контактного взаимодействия колесо-рельс обладает большой актуальностью, поскольку данные процессы чрезвычайно широко

распространены в технических системах. Важным частным случаем данной задачи является анализ контакта колес железнодорожного подвижного состава с верхним строением бесстыкового пути [1-5].

Impact Factor:

| | | |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 3.117 | SIS (USA) = 0.912 | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | ПИИЦ (Russia) = 0.156 | PIF (India) = 1.940 |
| GIF (Australia) = 0.564 | ESJI (KZ) = 4.102 | IBI (India) = 4.260 |
| JIF = 1.500 | SJIF (Morocco) = 5.667 | |

Целью работы являлось получение картины НДС для различных рельсовых креплений бесстыкового пути при воздействии нагрузки 23.5 тс и 27 тс. Проводилось сопоставление с результатами натурных замеров напряжений. Также выполнены ресурсные расчеты, оценены сроки выхода креплений в зависимости от нагрузки [6-8]. При расчетах рассмотрены два типа крепления - АРС-4, КБ-65, конструктивное исполнение креплений принято согласно действующих нормативных документов РЖД. Неровности и дефекты рельсов в расчетах на данном этапе не рассматриваются. Передача нагрузки на путь производилась через модель колесной пары для кривого участка пути и через модель колеса для прямого участка пути. Вертикальная сила прикладывалась к оси колеса, боковая - к гребню. Расчеты проведены в

квазистатической постановке [9]. В результате моделирования получены напряжения во всех элементах верхнего строения пути в графическом виде. Верификация моделей проведена на основе результатов сопоставления расчетных и фактических напряжений в шейке и подошве рельса.

Расчетная схема

При расчете моделировалось контактное взаимодействие. Параметры контактного взаимодействия зависят от принятой конфигурации профиля колеса и рельса, их номинальных размеров. Во время движения колесо и рельс могут принимать различные взаимные положения. На рисунке 1 представлены варианты расположения зон контакта для различных взаимных смещений колеса и рельса.

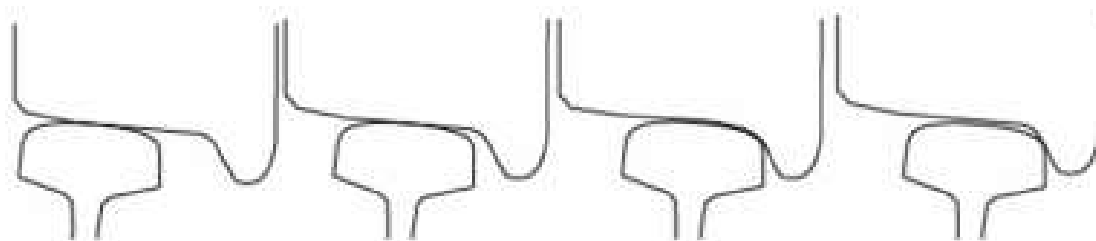
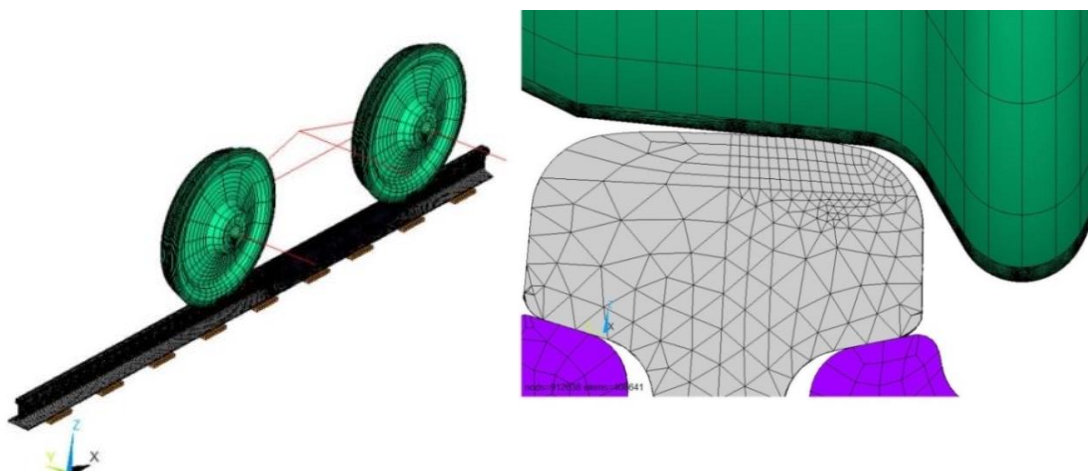


Рисунок 1 – Варианты взаимного расположения колеса и головки рельса

Обычно контактные напряжения на поверхности катания колеса грузового вагона находятся в пределах 1300 – 1700 МПа. Увеличение осевой нагрузки приводит к возрастанию герцевских контактных напряжений пропорционально степени 1/3 от ее величины [8]. На рис.2 представлены используемые расчетные

модели в среде ANSYS Mechanical APDL, на рис.3 – уточненная расчетная модель в среде ANSYS Workbench, результаты расчетов по которой передавались в модуль ANSYS NCode Design Life для оценки усталостной долговечности. Параметры кривых Веллера для колеса и рельса были взяты из [10].



Impact Factor:

| | | |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 3.117 | SIS (USA) = 0.912 | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | ПИИЦ (Russia) = 0.156 | PIF (India) = 1.940 |
| GIF (Australia) = 0.564 | ESJI (KZ) = 4.102 | IBI (India) = 4.260 |
| JIF = 1.500 | SJIF (Morocco) = 5.667 | |

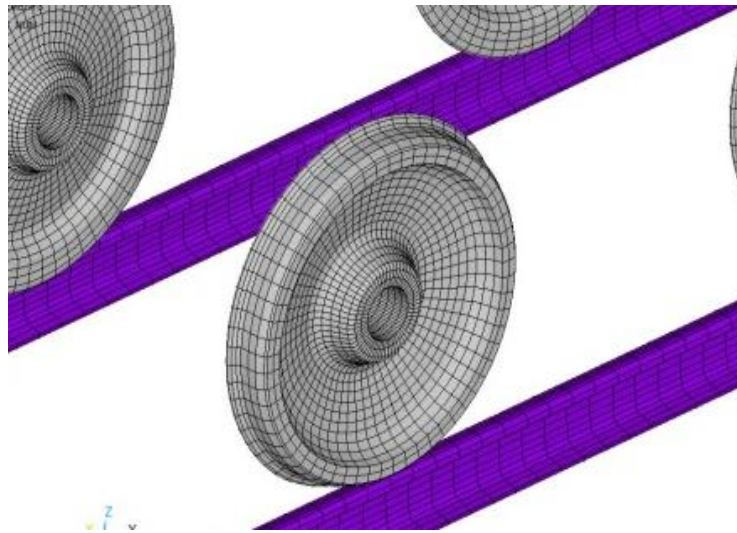


Рисунок 2 – Модель для оценки напряженно-деформированного состояния в зоне контакта колеса-рельса.

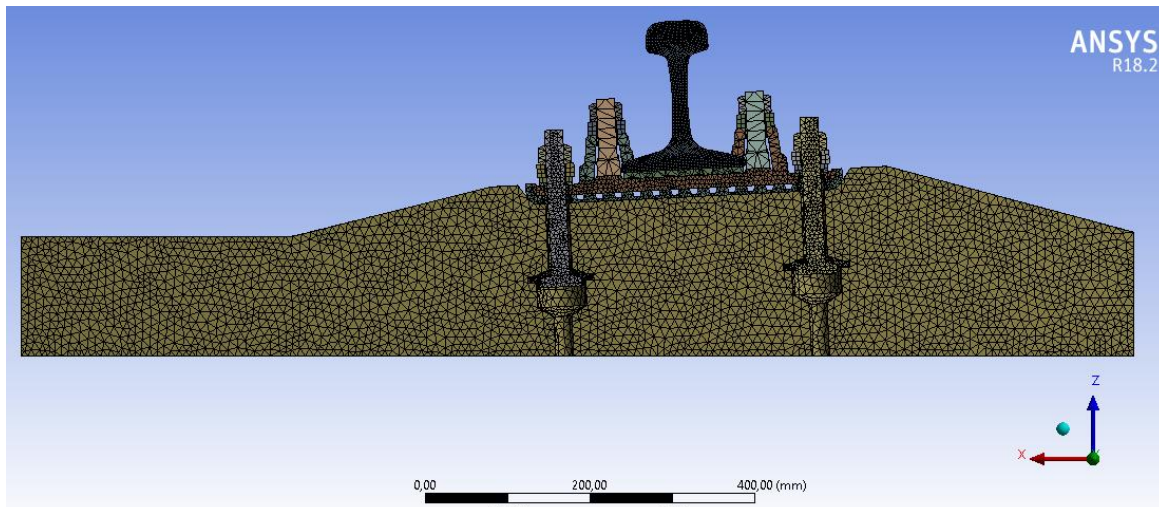


Рисунок 3. Модель верхнего строения пути со креплением КБ-65 в ANSYS Workbench и ANSYS nCode.

Ось координат X направлена по движению, Z -вертикально вверх. Значение $X=0$ соответствовало центру межрельсового зазора (принят здесь 10 мм), $Z=0$ - центру подошвы рельса.

Предусмотрена возможность задания различных типов контакта (не менее четырех вариантов), в зоне контакта введено сгущение сетки, достаточное для определения напряжений в зоне болтовых соединений с практической точностью. Модель формировалась с различными величинами фасок у дополнительного отверстия.

Поскольку при замерах на различных участках пути свойства грунтового основания отличались, при моделировании использованы условные физико-механические свойства материалов слоев рассматриваемого типа балластной призмы:

- щебень (фракция 25-60 мм) в уплотненном состоянии с толщиной слоя в балластной призме в диапазоне от 0,4 до 0,45 м; с плотностью в диапазоне 1,6-1,8 т/м³; модуль упругости от 200 до 260 МПа; коэффициент Пуассона от 0,26 до 0,29;

Impact Factor:

| | | |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 3.117 | SIS (USA) = 0.912 | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | РИИЦ (Russia) = 0.156 | PIF (India) = 1.940 |
| GIF (Australia) = 0.564 | ESJI (KZ) = 4.102 | IBI (India) = 4.260 |
| JIF = 1.500 | SJIF (Morocco) = 5.667 | |

- защитный слой из щебеночно-гравийно-песчаной смеси (фракция 0,05-40 мм) в уплотненном состоянии 0,3 м (и более для высокоскоростного движения); с плотностью в диапазоне 1,8-2,4 т/м³; модуль упругости от 150 до 200 МПа; коэффициент Пуассона от 0,3;
 - грунт состоит из следующих фракций: песок с плотностью в диапазоне 1,4-1,7 т/м³; модуль упругости от 25 до 110 МПа; коэффициент Пуассона от 0,3 до 0,35; супесь с плотностью в диапазоне 1,3-1,6 т/м³; модуль упругости от 25 до 100 МПа; коэффициент Пуассона от 0,25 до 0,35; глина с плотностью в диапазоне 1,75-2,3 т/м³; модуль упругости от 50 до 100 МПа; коэффициент Пуассона от 0,38 до 0,4.
- Максимальная размерность модели составила около 1 миллиона узлов и примерно 600 тысяч конечных элементов для участка прямого пути, 4 миллиона узлов и 2 миллиона конечных элементов для кривого участка пути.

Основные результаты моделирования

По результатам предварительных расчетов для вариантного анализа режима тарировки была выбрана модель, включающая две шпалы с наложением граничных условий симметрии (то есть фактически четыре шпалы на участке 2 м.). При тарировке модель нагружалась вертикальной силой 100 кН при различных точках ее приложения к колесу на прямом участке пути. Опираие в грунте выполнялось заданием коэффициентов постели, определенных из решения тестовой задачи. Расчетная схема при тарировке с наложением конечно-элементной сетки представлена на рис.4, результаты моделирования напряженного состояния в участке пути – на рис.5. По результатам моделирования выполнено сравнение с данными замеров ВНИИЖТ, приведенное в таблице 1. Анализ результатов свидетельствует о хорошем совпадении расчетных и экспериментальных значений напряжений для различных точек на головке, шейке и подошве рельса.

IAT NUM

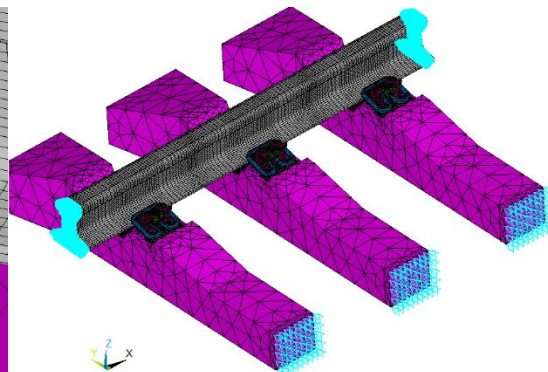
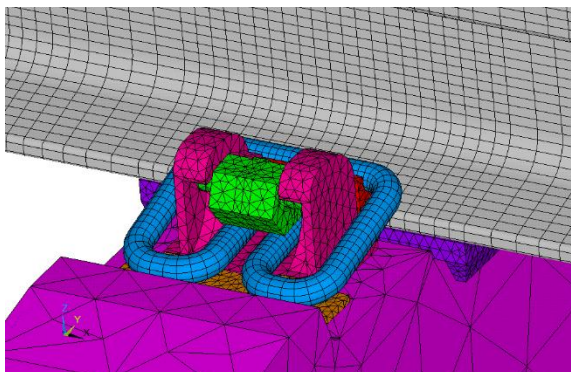
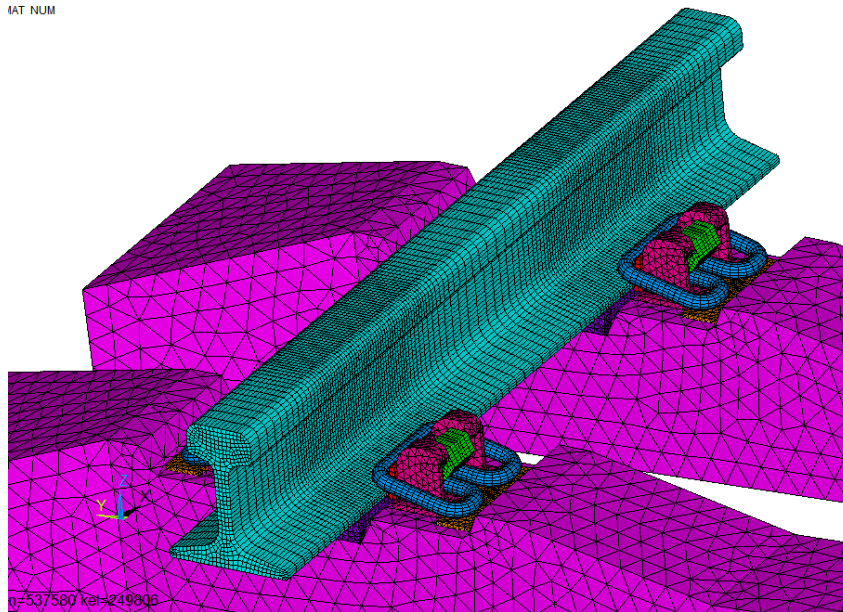


Рисунок Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует. – Расчетная модель для режима тарировки.

Impact Factor:

| | | |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 3.117 | SIS (USA) = 0.912 | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | ПИИЦ (Russia) = 0.156 | PIF (India) = 1.940 |
| GIF (Australia) = 0.564 | ESJI (KZ) = 4.102 | IBI (India) = 4.260 |
| JIF = 1.500 | SJIF (Morocco) = 5.667 | |

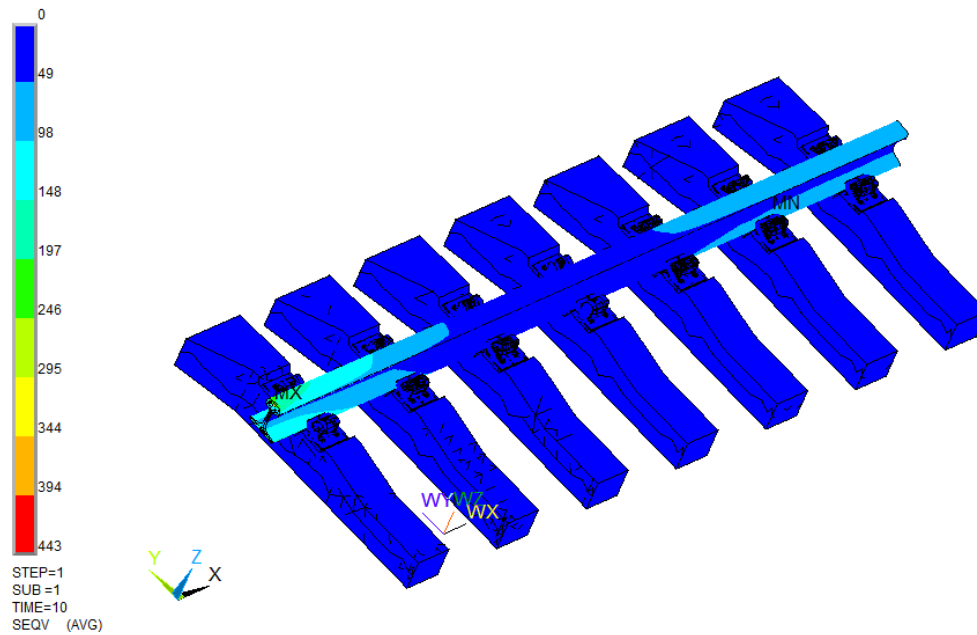


Рисунок 5 – результаты моделирования напряженного состояния.

Таблица 1 – Кромочные напряжения (МПа) при тарировке.

| Вариант | Внутренняя кромка | | Наружная кромка | |
|---------|--------------------------|---------|-----------------|---------|
| | Диапазон в экспериментах | Расчеты | Эксперименты | Расчет |
| 1 | 78-106 | 80-90 | 78-80 | 70-75 |
| 2 | 4-11 | 0-5 | 171-180 | 140-160 |
| 3 | 83-103 | | 72-86 | |
| 4 | 83-106 | | 66-82 | |

Деформируемая модель железнодорожного пути для расчетного анализа его напряженно-деформированного состояния построена при различных нагрузках от колес подвижного состава. Нагрузки от колес заданы в виде распределенных по площади контакта сил, эквивалентных осевой нагрузке от 6 тонн/ось до 30 тонн/ось, при расстоянии между колесами тележки грузового вагона 1850 мм.

Для удержания рельса в скреплениях, в зависимости от конструкции, непосредственно заданы нормативные моменты затяжки болтов и шурупов, а также положение фиксирующих монорегуляторов в нормативном положении. Между элементами верхнего строения пути, а также земляного полотна заданы контактные взаимодействия.

Нагружение модели выполнялось в два этапа:

1) моделирование прижатия рельса к подрельсовым опорам с помощью затяжки клеммных и закладных болтов, шурупов, изменения положения монорегулятора, а также учет деформаций, возникающих вследствие собственного веса конструкции

железнодорожного пути (ускорение свободного падения);

2) моделирование нагрузки от подвижного состава за счет приложения распределенных по площади контакта сил.

Граничные условия модели:

1 – нижняя площадка земляного полотна упруго закреплена;

2 – три ограничивающие плоскости пути закреплены как плоскости симметрии.

Нагрузка прикладывалась для случая нахождения колеса между скреплениями как более критичного, имела вертикальную составляющую 149 кН, боковую составляющую 58,4 кН и прикладывалась по поверхности катания с учетом внутреннего бокового контакта. Данный вариант соответствует движению в кривой со скоростью 80 км/ч по наружному рельсу, что представляет собой наиболее жесткий случай нагружения пути.

По боковым граням рельса действует условие симметрии, физически состоящее в запрете перемещений в направлении нормали к поверхности.

Такое же условие приложено по

Impact Factor:

| | | | | | |
|------------------|---------|----------------|---------|--------------|---------|
| ISRA (India) | = 3.117 | SIS (USA) | = 0.912 | ICV (Poland) | = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) | = 0.829 | ПИИЦ (Russia) | = 0.156 | PIF (India) | = 1.940 |
| GIF (Australia) | = 0.564 | ESJI (KZ) | = 4.102 | IBI (India) | = 4.260 |
| JIF | = 1.500 | SJIF (Morocco) | = 5.667 | | |

перпендикулярной оси к серединам шпал.

На рис.6 представлено распределение напряжений по Мизесу во всей конструкции, на рис.7 – отдельно в подошве рельса, где

наблюдается максимум 203 МПа. На рис.8. представлено распределение перемещений в узле скрепления.

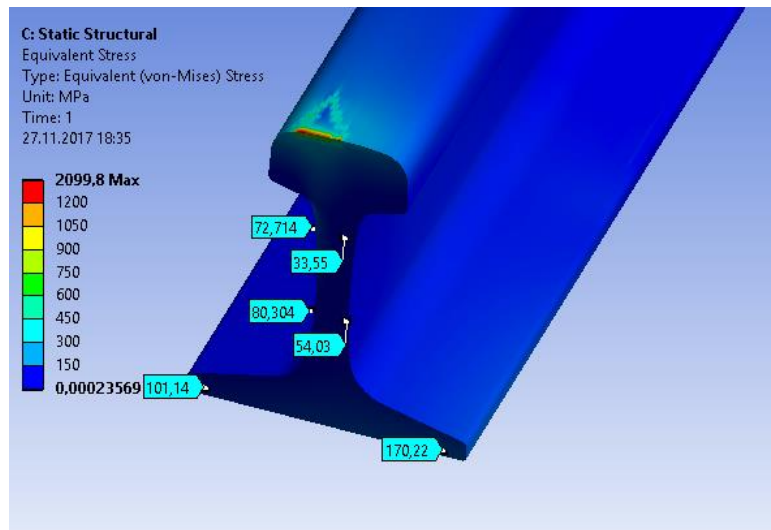
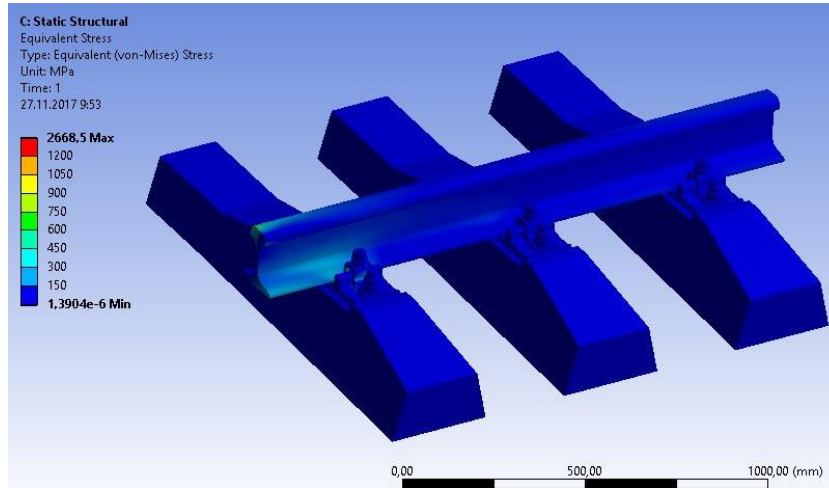


Рисунок 7. Распределение напряжений в участке пути.

Impact Factor:

| | | | | | |
|------------------|---------|----------------|---------|--------------|---------|
| ISRA (India) | = 3.117 | SIS (USA) | = 0.912 | ICV (Poland) | = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) | = 0.829 | ПИИЦ (Russia) | = 0.156 | PIF (India) | = 1.940 |
| GIF (Australia) | = 0.564 | ESJI (KZ) | = 4.102 | IBI (India) | = 4.260 |
| JIF | = 1.500 | SJIF (Morocco) | = 5.667 | | |

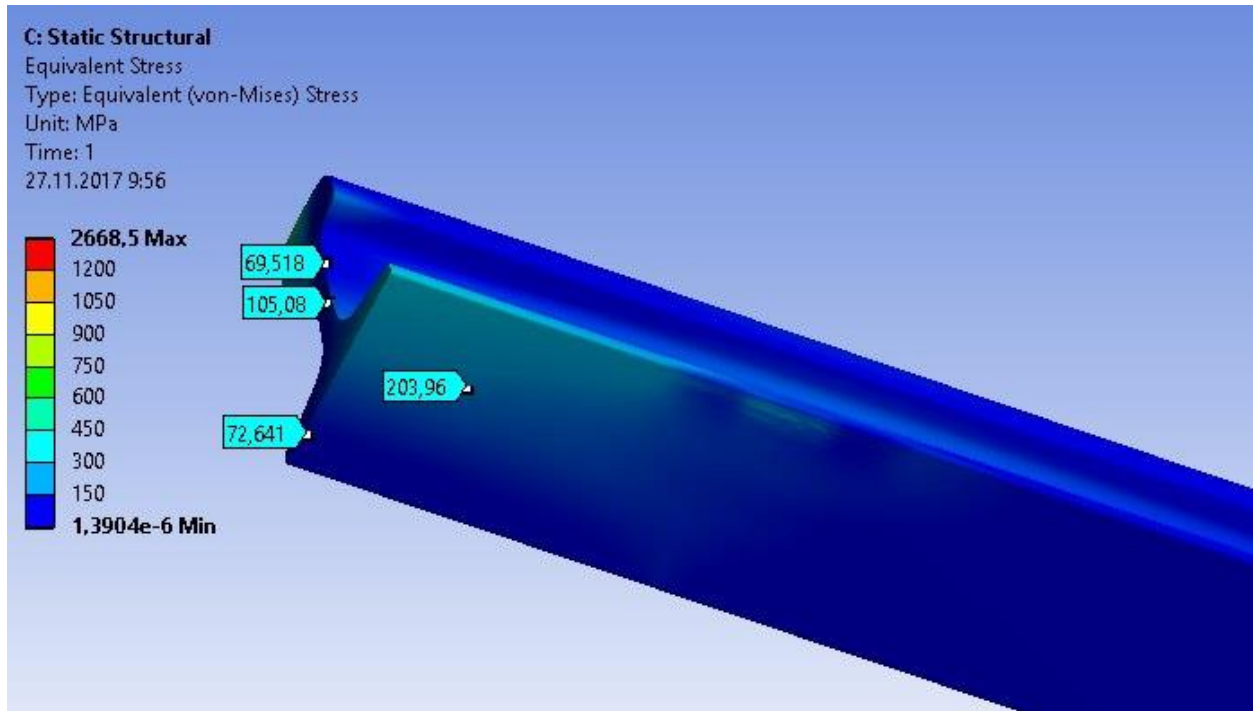


Рисунок 8. Распределение напряжений в подошве рельса.

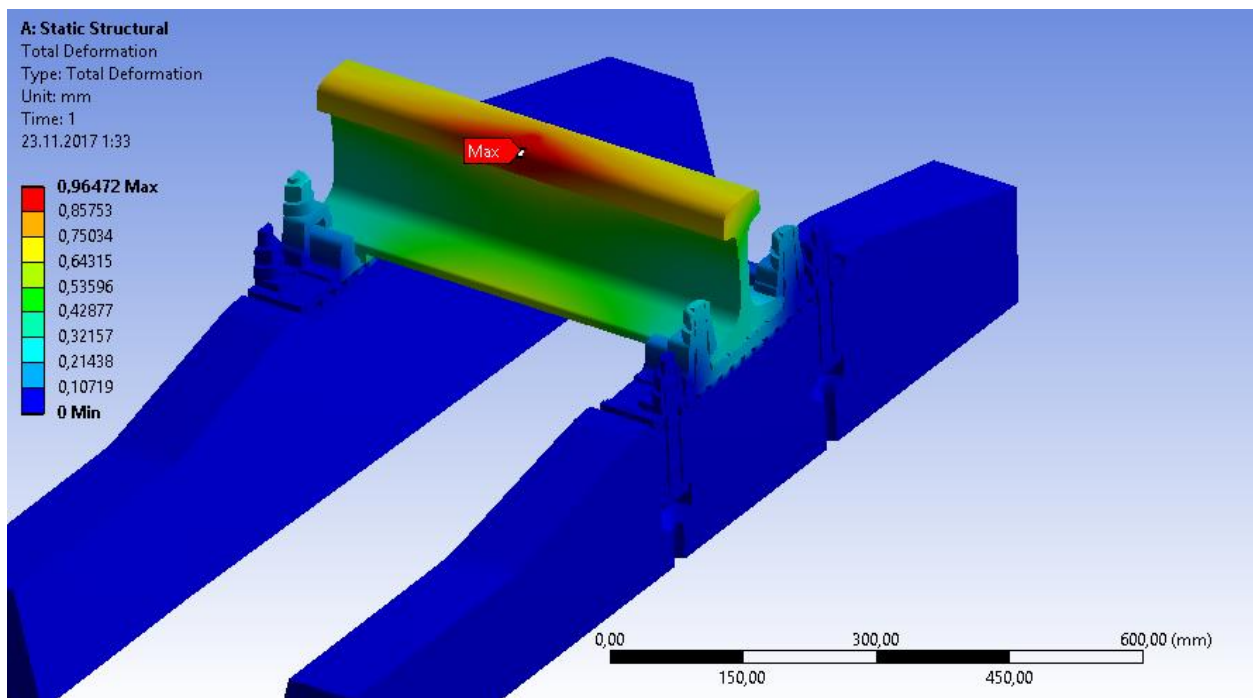


Рисунок 9. Распределение перемещений в модели крепления КБ-65 (показан фрагмент участка пути).

Следует отметить, что данные замеров для данного случая нагружения дают значения напряжений в наружной кромке рельса в наиболее нагруженных сечениях от 87 до 115 МПа, среднее расчетное 101 МПа. Максимальные напряжения в подошве рельса составляют до 203 МПа при нормативе до 240 МПа. Таким образом,

наблюдается хорошая сходимость расчетных данных и опытных замеров.

Данные прочностного расчета передавались в программу анализа усталостной долговечности ANSYS NCode Design Life. Для материалов рельса и креплений использовалась кривая

Impact Factor:

| | | |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 3.117 | SIS (USA) = 0.912 | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | ПИИЦ (Russia) = 0.156 | PIF (India) = 1.940 |
| GIF (Australia) = 0.564 | ESJI (KZ) = 4.102 | IBI (India) = 4.260 |
| JIF = 1.500 | SJIF (Morocco) = 5.667 | |

Веллера для материала с прочностью 900 МПа, близкого по свойствам к стали Р76.

объему верхнего строения пути. Типовое распределение представлено на рис.10.

По результатам расчета были построены зависимости числа циклов до разрушения по

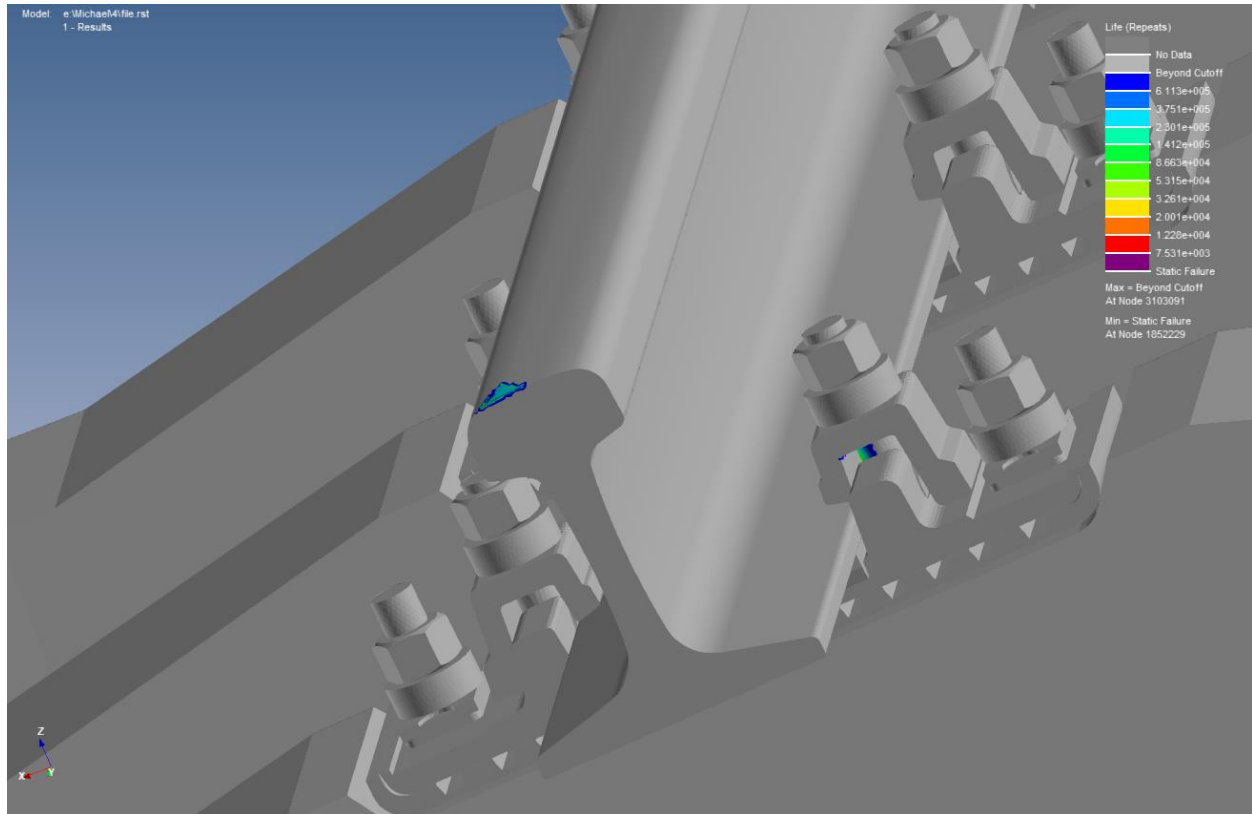


Рис.10. Число циклов до разрушения в программе NCode.

По результатам расчетов большая часть конструкции верхнего строения пути находится в зоне бесконечного количества циклов до разрушения. Исключения составляют зона контакта колесо-рельс, в которой имеет место сингулярность напряжений и оценка долговечности в которой некорректна, и поверхность прижимной шайбы скрепления КБ-

65, показанная на рис.10 справа. Для нее в случае нагружения силой 149,5 кН при боковой силе 58,4 кН число циклов до разрушения составило около 141 000, для подошвы рельса – от 611 000 до бесконечности.

В таблице 2 приведены значения для различных вариантов нагружения верхнего строения прямого пути.

Табл.2 - Различные варианты нагружения верхнего строения прямого пути.

| Вертикальная нагрузка, кН | Боковая нагрузка, кН | Напряжения в подошве рельса, диапазон, МПа | | Напряжения в шейке рельса, диапазон, МПа | Ресурс для скрепления, циклов |
|---------------------------|----------------------|--------------------------------------------|--------|------------------------------------------|-------------------------------|
| | | расчет | замеры | | |
| 149,5 | 58,4 | 87-115 | 110 | 69-105 | 141000 |
| 124,5 | 19,2 | 71-87 | 80 | 64-82 | 182 000 |
| 130,8 | 15,3 | 74-91 | 84 | 66-87 | 167 000 |

На рис.11.показано характерное напряженное состояние для кривого участка

пути. Сравнение с данными замеров [12] имеет вид, близкий к данным табл.2.

Impact Factor:

| | | |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 3.117 | SIS (USA) = 0.912 | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | ПИИЦ (Russia) = 0.156 | PIF (India) = 1.940 |
| GIF (Australia) = 0.564 | ESJI (KZ) = 4.102 | IBI (India) = 4.260 |
| JIF = 1.500 | SJIF (Morocco) = 5.667 | |

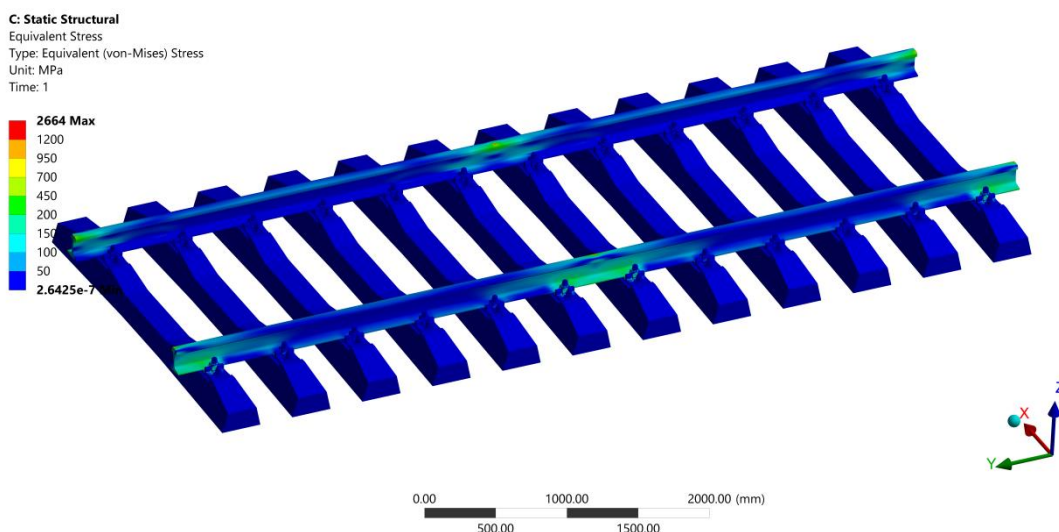


Рисунок 11. Напряженное состояние для кривого участка пути.

Выводы:

1. Разработана и апробирована конечно-элементная модель железнодорожного пути, полностью повторяющая геометрию реальной конструкции пути, а также физико-механические свойства элементов верхнего строения пути и земляного полотна.

2. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути при воздействии подвижного состава для различных типов промежуточных рельсовых скреплений: подкладочное рельсовое скрепление КБ-65 и бесподкладочное анкерное рельсовое скрепление АРС-4.

3. Получены напряжения и деформации железнодорожного пути, возникающие при воздействии подвижного состава:

4. Проведена верификация конечно-элементной модели и результатов расчета напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути с помощью сравнительного анализа полученных выходных данных с результатами тарифовочных и натурных замеров. Сходимость полученных результатов подтверждает адекватность разработанной модели.

5. Расчеты в физически нелинейной постановке могут быть выполнены на следующих стадиях исследований для оценки усталостных эффектов и накопления повреждений в скреплениях и шпалах, для оценки накопления осадок пути.

References:

1. Sladkovskij, A. V. (2004). K voprosu kontaktного vzaimodejstviya koles i rel'sov. Sbornik nauchnyh trudov NGU. Dnepropetrovsk: *Nacional'nyj gornyj universitet, №19, t. 4.*
2. Sladkovskij, A. V., Sitazh, M., & Martynenko, J. R. (2002). Reshenie zadach mehaniki zheleznodorozhnogo transporta s pomoshh'ju MKJe. Dnepropetrovsk: *Novaja ideologija.*
3. Kogan, A. J. (1997). Dinamika puti i ego vzaimodejstvie s podvizhnym sostavom. M.: *Transport*, p. 326.
4. Kogan, A. J., & Gorbunov, M. A. (2010). Opredelenie maksimal'nyh i minimal'nyh naprjazhenij cikla pod prohodjashhim vagonom dlja ocenki ostatochnogo resursa rel'sov s defektami. Perspektivnye zadachi razvitija zheleznodorozhnogo transporta: sb. nauch. tr. OAO «VNIIZhT». M.: *Intekst*, pp. 216–228.
5. (2002). Obobshhenie peredovogo opyta tjazhelovesnogo dvizhenija: voprosy vzaimodejstviya kolesa i rel'sa: Per. s angl. / U. Dzh.Harris, S. M.Zaharov, Dzh. Landgren, H. Turne, V. Jebersen. M.: *Intekst*, p. 408.

Impact Factor:

| | | | | | |
|-------------------------|----------------|-----------------------|----------------|---------------------|----------------|
| ISRA (India) | = 3.117 | SIS (USA) | = 0.912 | ICV (Poland) | = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) | = 0.829 | PIHII (Russia) | = 0.156 | PIF (India) | = 1.940 |
| GIF (Australia) | = 0.564 | ESJI (KZ) | = 4.102 | IBI (India) | = 4.260 |
| JIF | = 1.500 | SJIF (Morocco) | = 5.667 | | |

6. Mahutov, N. A. (2008). Prochnost' i bezopasnost': fundamental'nye i prikladnye issledovanija. Novosibirsk: *Nauka*, p. 528.
7. Mahutov, N. A. (2005). Konstrukcionnaja prochnost', resurs i tehnogennaja bezopasnost'. - Novosibirsk: *Nauka*, Ch. 1. p. 494; Ch. 2. – p.610.
8. (1981). GOST 23.207-78. Soprotivlenie ustalosti. Osnovnye terminy, opredelenija i oboznachenija. M.: *Izd-vo standartov*, p.48.
9. Morozov, E. M., & Nikishkov, G. P. (1980). Metod konechnyh jelementov v mehanike razrushenija. M.: *Nauka*, p. 256.
10. (2017). ANSYS 18.2. Theory Manual. *ANSYS Inc.*