

К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВОГО ПРОФИЛЯ ПРИ КОПРОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Куклин С.А., Жуков И.А., Санжаровский А.В.

Сибирский государственный индустриальный университет, г.Новокузнецк

Ключевые слова: рельс, напряженно-деформированное состояние, копровые испытания, компьютерное моделирование.

Аннотация. Вопрос анализа напряженно-деформированного состояния рельсового профиля в условиях проведения копровых испытаний является принципиально важным при производстве рельсов. Современные средства компьютерного моделирования позволяют решить поставленную задачу вычислительным экспериментом, основанным на применении метода конечных элементов. Настоящая статья содержит некоторые результаты вычислительного эксперимента, проведенного с применением различного программного обеспечения.

ON THE ISSUE OF MODELING THE STRESS-STRAIN STATE OF A RAIL PROFILE DURING COPRA TESTS

Kuklin S.A., Zhukov I.A., Sanzharovsky A.V.

Siberian state industrial university, Novokuznetsk

Keywords: rail, stress-strain state, copra tests, computer modeling.

Abstract. The issue of analyzing the stress-strain state of the rail profile in the conditions of coping tests is of fundamental importance in the production of rails. Modern computer modeling tools allow us to solve the problem by a computational experiment based on the use of the finite element method. This article contains some results of a computational experiment conducted using various software.

Ударные испытания рельсов на копре выполняют при приемочных испытаниях на рельсопрокатных заводах, так как понижение сопротивления рельсов хрупкому разрушению в пути и повышение вероятности выхода их из строя из-за образования усталостных трещин представляют наибольшую опасность. Копровые испытания дают возможность оценить хрупкую прочность рельсов, изломы которых происходят хрупко под действием динамических нагрузок от колес подвижного состава. Оценивают копровую прочность по результатам испытаний серий полнопрофильных проб (по 5-идентичных проб в серии), которые должны выдержать удар бабы копра массой 1000 кг, падающей с наибольшей заранее выбранной высоты (чтобы рельс не сломался). В качестве критерия принимают работу разрушения (энергоемкость) в джоулях.

Особую роль для характеристики надежности рельсов как элементов пути играет классификация дефектов рельсов. Ее основное назначение - набор

статистических данных и, на основе статистики, выявление наиболее часто встречающихся дефектов для анализа причин их появления и дальнейшего устранения этих причин. К сожалению, действующая нормативно-техническая документация не всегда верно определяет истинные причины появления того или иного дефекта, что наводит на «ложный след», когда требуется принимать конкретные меры для уменьшения выхода рельсов по дефектности.

Проведен анализ разрушения рельса с наличием подошвенных дефектов с помощью системы автоматизированного проектирования Autodesk Inventor Professional 2020. Проанализировано влияние на вероятность разрушения: высоты падающего ударника копра, механических свойств рельсовой стали, формы концентраторов напряжений и поверхностных дефектов.

С целью определения причин разрушения рельсов при испытании их на копровую прочность для анализа представлен протокол №51 технического отдела рельсового производства бюро металловедения и термической обработки [1]. Согласно представленным данным разрушение произошло на подошве рельса из-за наличия дефекта типа «продир» глубиной до 0,08 мм [1]. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ Р 51685 – 2013 [2]. Дополнительно представлены результаты испытаний плавок №10891, 29115.

Схема нагружения, исходные данные и общие замечания со ссылками на первоисточники приведены в источнике [6].

Распределение напряжений по сечению рельса определялось методом конечных элементов с помощью программы Autodesk Inventor Professional 2020. Профиль сечения рельса Р65 построен на основе данных ГОСТ Р 51685 – 2013. При решении использовалась симметрия самого образца относительно плоскости приложения силы F и симметрия сечения рельса, т.е. рассматривалась четверть реального образца. С учетом симметрии расчетная модель имеет длину $l_p/2=500$ мм и прикладывается нагрузка $F/4=230$ кН.

Необходимо определить распределение нормальных напряжений по подошве рельса.

Для решения задачи использовались следующие зависимости и приложение силы:

- точечная нагрузка приложена в точку.
- плоскости симметрии запрещают смещение;
- рельс жестко закреплен, как при копровых испытаниях.

Касательно точечного приложения силы следует сделать замечание, что в реальности, пятно контакта от удара бойка радиусом 125 мм [2] имеет эллипсовидную форму, но, по принципу Сен-Венана, в связи со значительным удалением исследуемой области от точки удара, характер распределения сил в зоне контакта роли не играет.

Полученная в результате решения картина распределения нормальных напряжений σ_z имеет следующий вид (рисунок 1).

Более подробный анализ распределения напряжений по линии $L1$ показан на графике (рисунок 2). Здесь X – расстояние от плоскости симметрии рельса.

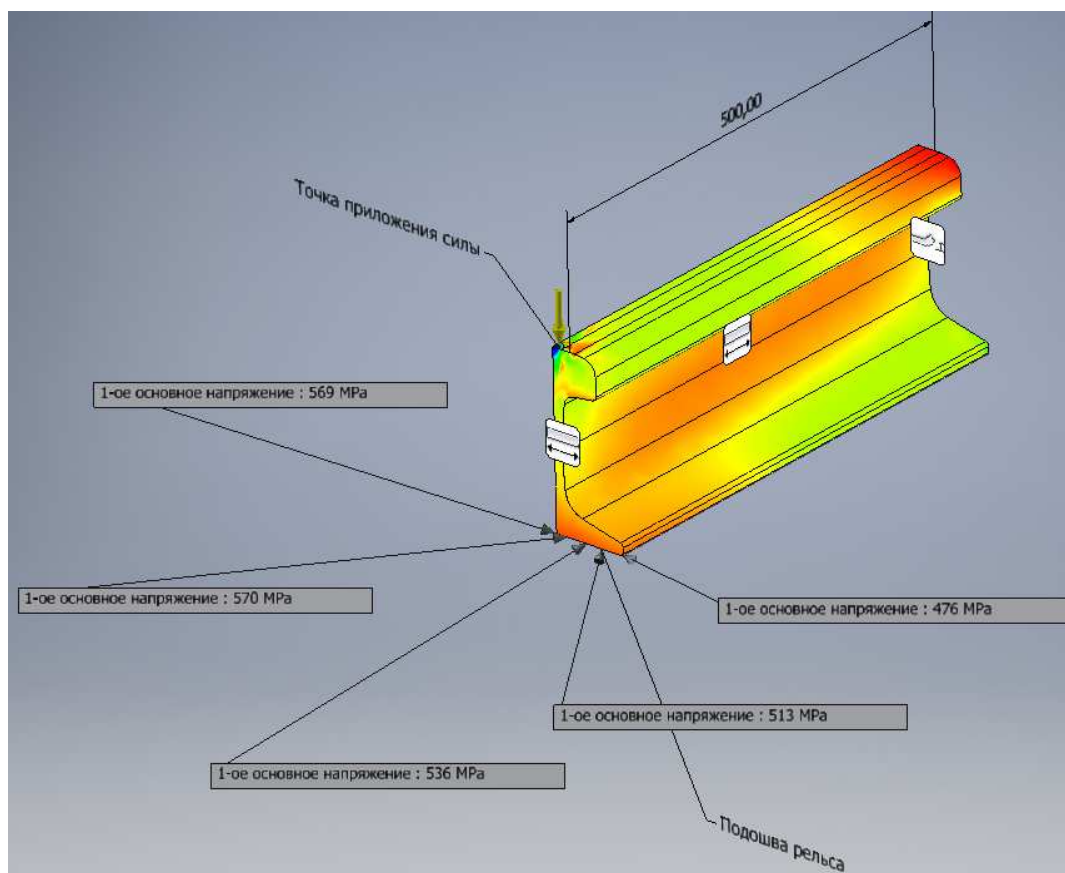


Рис. 1. Распределение нормальных напряжений по образцу

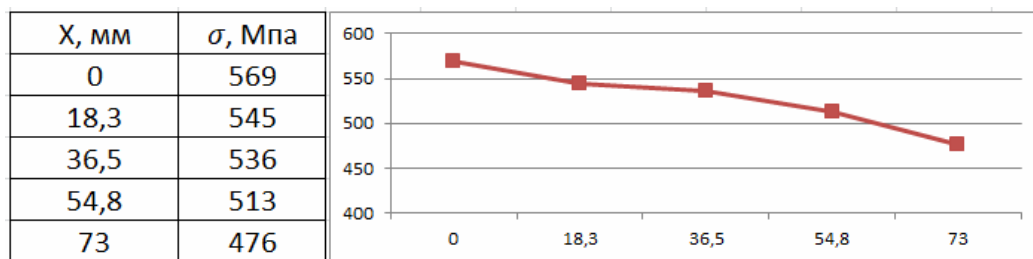


Рис. 2. Распределение нормальных напряжений по подошве рельса

Из графика видно, что максимальное напряжение растяжения ($\sigma_{\max}=569\text{МПа}$) на оси симметрии рельса убывает по направлению к боковой грани рельса на величину 1,3 МПа на каждый миллиметр ($k=1,3\text{ МПа/мм}$).

$$\sigma_z = \sigma_{\max} - kx.$$

Согласно графику несколько более опасными являются дефекты находящиеся посередине рельса (на оси симметрии). Дефекты, находящиеся на периферии, примерно на 10% менее опасны.

Согласно протоколу разрушение началось на удалении 12 мм от боковой грани [1]. Для рассматриваемого случая, согласно формуле, напряжение в точке $x=75-12=63\text{ мм}$ составит

$$\sigma_z = 559 - 1,3 \cdot 63 = 484 \text{ МПа.}$$

Для оценки напряжений в подошве рельса в общем случае (при других нагрузках и коэффициентах ударной вязкости) можно воспользоваться тем, что максимальное напряжение σ_{\max} и коэффициент k линейно зависят от нагрузки F . Энергия линейно связана с коэффициентом вязкости, поэтому для экспериментальных коэффициентов вязкости KCU напряжения можно определять по формуле

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{KCU}{15}} \cdot (569 - 1,3x),$$

где KCU – Дж/см² (KCU ГОСТ=15 Дж/см²), x – мм, σ_z – МПа.

Например, для значения $KCU=43$ Дж/см² [1, таблица 2] в точке подошвы рельса, удаленной от боковой грани на 12 мм ($x=63$ мм), нормальные напряжения

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{43}{15}} \cdot (569 - 1,3 \cdot 63) = 818 \text{ МПа.}$$

Для той же точки в испытаниях №10891

– при $KCU=34$ Дж/см²: $\sigma_z=727$ МПа,

– при $KCU=26$ Дж/см²: $\sigma_z=637$ МПа.

Из расчетов видно, что для стали Э76ХФ, из которой изготовлены рельсы величина, полученная при $KCU=43$ Дж/см² довольно высока, выше предела текучести $\sigma_T=800$ МПа и для разрушения достаточно незначительных дефектов.

Заключение

Проведено компьютерное моделирование напряженно-деформируемого состояния рельсового профиля в условиях копровых испытаний с помощью системы Autodesk Inventor Professional 2020.

Для сравнительного анализа расчета НДС рельсового профиля рассчитано в двух разных программных обеспечениях. Первый расчет производился в программе ANSYS [6]. Второй, предоставленный в данной статье, с помощью САПР Inventor.

Расчеты, полученные в двух разных программах, имеют 4% отклонения, это представляется весьма приемлемы для конечно-элементного анализа.

Система Autodesk Inventor дает возможность проектировщику оперативно выполнять прочностной анализ модели, задавая параметры их геометрии, свойства материала, различные условия нагружения и закрепления. Результаты прочностного анализа могут служить не только основанием для внесения изменений в конструкцию, но и одновременно помогают определить, какие именно изменения необходимо внести в модель в каждой конкретной ситуации. Для данной системы анализ напряжений подходит для расчета металлоконструкций, деталей типа кронштейна и т.п. Здесь более упрощенный анализ напряжения и он является быстрым, из-за этого при рассмотрении точечного момента, как анализ НДС рельса

возникают большие трудности. Проблема Inventor – это невозможность преобразования в простую модель для расчета, лучше всего с этим справляется Ansys. И такие анализы расчета напряженно-деформируемого состояния необходимо проводить в программном продукте Ansys. В программе Ansys можно разложить все элементы модели, предобразования в простую 2D проекцию, провести расчет в определенных точках, что показывает более точные результаты.

Список литературы

1. Протокол №51 от 11.04.18. Исследование причины разрушения двух копровых проб рельсов типа Р65 категории ДТ350 стали марки Э76ХФ плавков 22043 (А401) и 22044 (А401) при испытании на копровую прочность.
2. ГОСТ Р 51685 – 2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия (с Изменением N 1)
3. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т.: Т.1. – М.: Машиностроение, 2001. – 920с.
4. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах (с Изменениями N 1, 2).
5. Партон В.З. Механика упругопластического разрушения / В.З. Партон, Е.М. Морозов.– М.: Наука, 1985. – 504с.
6. Моделирование напряженно-деформированного состояния рельсового профиля при копровых испытаниях: Отчет по НИР / М.В. Темлянецев, С.А. Куклин, И.А. Жуков. – Новокузнецк: СибГИУ, 2018. – 36с.

References

1. Protocol No. 51 of 11.04.18. Investigation of the cause of destruction of two copra samples of rails of type P65 of the DT350 category of steel of the E76F brand of melts 22043 (A401) and 22044 (A401) during testing for copra strength.
2. GOST R 51685 – 2013. Railway rails. General technical conditions (with Change N 1)
3. Anuriev V.I. Reference book of the designer-machine-Builder: in 3 volumes: Vol. 1. – М.: Machine-building, 2001. – 920p.
4. GOST 9454-78. Metals. Test method for impact bending at low, room and elevated temperatures (with Changes N 1, 2)
5. Parton V.Z. Mechanics of elastic-plastic destruction / V.Z. Parton, E.M. Morozov. – М.: Science, 1985. – 504p.
6. Modeling of the stress-strain state of the rail profile at copra tests: Report on research / M.V. Temlyantsev, S.A. Kuklin, I.A. Zhukov. – Novokuznetsk: SibSIU, 2018. – 36p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Куклин Сергей Александрович – к.т.н., доцент	Kuklin Sergei Aleksandrovich – candidate of technical sciences, associate professor
Жуков Иван Алексеевич – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой механики и машиностроения	Zhukov Ivan Alekseevich – doctor of technical sciences, associate professor, Head of Department of mechanics and mechanical engineering
Санжаровский Александр Владимирович – магистрант	Sanzharovsky Aleksandr Vladimirovich – student
Сибирский государственный индустриальный университет, г.Новокузнецк, Россия	Siberian state industrial university, Novokuznetsk, Russia

Получена 30.06.2020