

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

*Санжаровский А.В.*

*Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк*

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

**Аннотация.** Анализ напряженно-деформированного состояния рельсового профиля при копровых испытаниях является важным в производстве рельсов. В данной статье рассматриваются известные теоретические методы и подходы решения напряженно-деформируемого состояния рельсового профиля. Описаны ранее проработанные исследования с указанием известных работ ученых. Сформулированы задачи для дальнейшего исследования.

## TO THE QUESTION OF MODELING THE STRESS-STRAIN STATE OF A RAIL PROFILE IN THE CONDITIONS OF COPING TESTS

*Sanzharovsky A.V.*

*Siberian State Industrial University, Novokuznetsk*

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

**Abstract.** Analysis of the stress-strain state of a rail profile in the conditions of coping tests is of important in the production of rails. This article discusses well-known theoretical methods and approaches for solving the stress-strain state of a rail profile. Described early studies with an indication of the well-known works of scientists. The tasks for further research are formulated.

Исследование проблем прочности и разрушения твердых тел в настоящее время представляется актуальной задачей, как в теоретическом, так и в прикладном плане.

Под разрушением твердого тела понимается не только механическое нарушение сплошности тела в результате внешнего воздействия, но и необратимое пластическое течение. Разрушение твердого тела является сложным процессом, который начинается с рождения рассеянных по телу дефектов, развитие которых приведет к появлению и распространению дефектов типа трещин.

Вопросы исследования напряжённо-деформированного состояния рельсов и взаимодействие системы «колесо-рельс» рассматриваются такими исследователями, как Карпущенко Н.И., Грищенко В.А., Коган А.Я., Ромен Ю.С., Марков А.А., Шур Е.А., Третьякова В.В., Богданова В.М., Долгих Л.В., Федин В.М., Хлыст С.В., Бехер С.А., Волков К.В., Полевой Е.В., Темлянец М.В., Покровский А.М., Муравьев В.В., Воронов Ю.В., Третьяков Д.Н., Shailesh Gokhale, El-Sayed H.M., Lotfy M., Akama M., Kiuchi, A., Peixoto D. F. C., de Castro P. M. S. T.

Вопросы применения метода акустоупругости для контроля напряжённо-деформированного состояния рассматриваются такими исследователями как: Аббакумов К.Е., Бобренко В.М., Бобров В.Т., Буденков Г.А., Гузь А.Н. Никитина Н.Е., Куценко А.Н., Углов А.Л., Муравьев В.В., Бехер С.А., Cuixiang PEI, Kazuyuki Demachi, E. Schneider, R. Herzer, R.B. Thompson, S.J. Warmley, J.C. Johnson, D. Utrata.

Дальнейшее развитие теория трещин получила в работах Е. Орована и Дж. Ирвина. Они высказали идею о представлении энергии разрушения в виде суммы поверхностной энергии и работы пластических деформаций.

В монографии В.Н. Цвигун, Е.А. Шур, В.Н. Кузнецов, Р.С. Койнов «Изучение механизмов контактно-усталостных дефектов в рельсах» [1], обобщены экспериментальные исследования по изучению механизмов контактно-усталостных разрушений рельсов, основанные на совместном рассмотрении контактных задач и механики контактного разрушения.

Вопросу моделирования напряженно-деформированного состояния рельсового профиля посвящены несколько работ, выполненных ранее.

1. Кутовой В.П. «Исследование напряженно-деформированного состояния вершины усталостной трещины в головке рельса» [2]. В работе рассмотрена возможность развития усталостных трещин в поле внешних сжимающих напряжений. Авторами выполнена конечно-элементная модель, имеющая узкий трещиноподобный дефект с вершин, очерченными по окружности, которая нагружалась пульсирующей сжимающей нагрузкой;

2. Муравьев В.В., Тапков К.А «Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при изготовлении» [3]. Здесь авторы выполняют расчет модели методом конечных элементов, который проводился в программной среде COMSOL. К головке и подошве рельса в продольном направлении были приложены силы, вызывающие сжимающие напряжения, к шейке рельса – силы, вызывающие растягивающие напряжения. Уровень напряжений, полученный при расчете модели рельса, был сопоставлен с соответствующим расхождением паза, который является информативным параметром при оценке уровня остаточных напряжений согласно действующему стандарту. Экспериментальные

измерения выполнялись акустическим структуроскопом СЭМА, в основе которого лежит использование явления акустоупругости. Измерения выполнялись на пяти полнопрофильных пробах рельса.

3. Тапков К.А. «Научное обоснование методики оценки остаточных напряжений в дифференцированно-упрочненных рельсах на основе явления акустоупругости и математического моделирования». В работе автор установил наличие обратной линейной зависимости между значениями напряжений, получаемых методом акустической тензометрии при прозвучивании со стороны поверхности катания, и напряжениями в шейке рельса, оцениваемых по расхождению прорезанного паза в образце рельса.

4. Куклин С.А. «Моделирование напряженно-деформированного состояния рельсового профиля при копровых испытаниях» [4]. В данной работе автор провел анализ разрушения рельса с наличием подошвенных дефектов, также провел аналитический и численный анализ в программе ANSYS для получения влияния пластических деформаций на прочность.

Анализ литературы показал, что вопросы исследования напряженно-деформированного состояния рельсов при копровых испытаниях являются актуальными и недостаточно изучены.

Работа Куклина С.А. [4] является основой для дальнейшего исследования в области моделирования напряженно-деформированного состояния рельсового профиля при копровых испытаниях.

С помощью Федерального института промышленной собственности (ФИПС) были обнаружены патентные документы, которые описывают копры для ударных испытаний. В таблице 1 представлены результаты патентного поиска.

Табл. 1. Результаты патентного поиска

| Название; № патента  | Дата публикации | Автор(ы)   |
|--|-----------------|--|
| Копер для ударных испытаний [5];<br>SU 712720                      | 30.01.1980      | Стихановский Б.Н., Павлович Э.Г., Кузьминов С.Т., Смирнов В.Г., Крячков Ю.Н. |
| Копер для ударных испытаний [6];<br>SU 842441                      | 30.06.1981      | Залмансон В.М.   |
| Копер для испытания образцов на ударную прочность[7];<br>SU 879382 | 07.11.1981      | Голобков С.Н., Виноградов А.Е., Захаров В.Е.                                 |
| Копер для ударных испытаний [8];<br>SU 1538080                     | 23.01.1990      | Воронкин В.В., Горбачев С.Г., Ченчов А.Н., Лисенков Д.Б., Лисенков В.В.      |

Копры, предоставленные в данной таблице, предназначены для испытания на ударные нагрузки образцов рельсов, толстого листа и других образцов прокатного производства металлургических заводов. 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 5-8 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 (1 Дж = 0,1 кгс-м).

Копер для ударных испытаний по патенту SU 712720 [5], содержит корпус, ротор, размещенный на периферии ротора держатель, вставленный в держатель боек и узел крепления испытуемого объекта. Достижимое при использовании изобретения исключение возможности попадания отскочившего после удара бойка в полость корпуса предотвращает поломку ротора и повышает тем самым надежность копра.

Копер для ударных испытаний по патенту SU 842441 [6], содержит корпус, ротор, размещенный на периферии ротора держатель, вставленный в держатель боек, выполненный в виде шара, связанный с корпусом конусный ствол, ось которого расположена по касательной к траектории бойка, узел крепления испытуемого объекта, установленный на срезе ствола. Цель изобретения – повышение точности испытаний. Цель достигается тем, что ротор установлен на приводном валу шарнирно, с возможностью поворота в плоскости, перпендикулярной плоскости его вращения, один конец каждого волновода установлен в полости корпуса в положении, обеспечивающем центральный удар по ним бойками, зафиксированными в держателях, каждый из держателей выполнен в виде подпружиненного рычажного захвата, на рычагах которого образованы опорные призмы для бойка, а ось ролика закреплена на роторе.

Копер для испытания образцов на ударную прочность по патенту SU 879382 [7], содержит основание, на котором размещена каретка с опорами для образца, шток с бойком, установленный над образцом с возможностью вертикального перемещения, груз с механизмами захвата, подъема и освобождения на заданной высоте, установленный в направляющих вертикальной шахты. Цель изобретения - расширение эксплуатационных возможностей. Эта цель достигается тем, что средства передачи остаточной энергии груза выполнены в виде двух гидрокамер, полости которых сообщены между собой через обратный клапан и управляемый байпас, и пневмокамеру, в одной из гидрокамер установлен элемент, воспринимающий остаточную энергию груза, а другая сообщена посредством вертикального канала с индикатором.

Копер для ударных испытаний по патенту SU 1538080 [8], содержит ротор, на котором закреплен держатель бойка, конусный ствол, ось которого расположена по касательной к траектории бойка, тормозное устройство, взаимодействующее с держателем и обеспечивающее отделение бойка в точке, лежащей на оси ствола. Держатель выполнен в виде маятника, ось вращения которого параллельна оси вращения ротора. Целью изобретения является расширение эксплуатационных возможностей за счет увеличения скорости удара.

Для исследования напряженно-деформированного состояния рельсового профиля при копровых испытаниях необходимо выполнить ряд следующих задач:

- исследовать разрушение рельса при копровых испытаниях;
- проанализировать разрушения рельса с наличием дефектов;
- проанализировать характер распределения напряжений в зоне дефекта;
- провести анализ результатов компьютерного моделирования.

В дальнейшей работе будет использован комплексный метод, включающий теоретические и экспериментальные исследования. Работа будет выполняться с применением компьютерного моделирования методом конечных элементов в различных программах, также в теоретических исследованиях будет использован аналитический метод.

В основе экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния использованы копровые испытания. Для уточнения методов исследования необходимо разработать модель, которая позволит выполнить анализ напряжений, происходящих в рельсе, и связать эти напряжения с требованиями ГОСТа 51685-2013 [8], также рассчитать распределение напряжений по сечению рельсового профиля и дефектов.

Для получения результатов необходимо провести многовариантный анализ разрушения рельса с наличием дефектов и проанализировать влияние на вероятность разрушения: высоты падающего ударника копра, механических свойств рельсовой стали, формы концентраторов напряжений и поверхностных дефектов.

В заключительном этапе провести аналитический и численный анализ влияния пластических деформаций на прочность и вывести методику расчета дефектов на основе эмпирических формул.

### Список литературы

1. Цвигун В.Н. Изучение механизмов контактно-усталостных дефектов в рельсах: монография / В.Н. Цвигун, Е.А. Шур, В.Н. Кузнецов, Р.С. Койнов ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. – 133 с.
2. Кутовой В.П. Исследование напряженно-деформированного состояния вершины усталостной трещины в головке рельса / В.П. Кутовой, А.П. Шабанов, М.М. Шакиртов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – №1(13). – С. 88-94.
3. Муравьев В.В. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при изготовлении / В.В. Муравьев, К.А. Тапков // Приборы и методы измерений. 2017. – Т. 8, № 3. С. 263-270.
4. Моделирование напряженно-деформированного состояния рельсового профиля при копровых испытаниях: Отчет по НИР / М.В. Темлянецв, И.А. Жуков, С.А. Куклин. – Новокузнецк: СибГИУ, 2018. – 36с.
5. Пат. 712720 СССР, МПК G01M 7/00. Копер для ударных испытаний / Стихановский Б.Н., Павлович Э.Г., Кузьминов С.Т., Смирнов В.Г., Крячков Ю.Н.; заявитель и патентообладатель Фрунзенский политехнический институт. – № 2639519/25-28; заявл. 07.07.1978; опубл. 30.01.1980, Бюл. № 4.
6. Пат. 842441 СССР, МПК G01M 7/00. Копер для ударных испытаний / Залмансон В.М.; заявитель и патентообладатель Фрунзенский политехнический институт. – № 2755168/25-28; заявл. 12.04.1979; опубл. 30.06.1981, Бюл. № 24.
7. Пат. 879382 СССР, МПК G01N 3/30. Копер для испытания образцов на ударную прочность / Голобков С.Н., Виноградов А.Е., Захаров В.Е.; заявитель и патентообладатель Ждановский филиал Украинского государственного института по проектированию металлургических заводов. – № 2817734/25-28; заявл. 17.09.1979; опубл. 07.11.1981, Бюл. № 41.

8. Пат. 1538080 СССР, МПК G01M 7/00. Копер для ударных испытаний / Воронкин В.В., Горбачев С.Г., Ченцов А.Н., Лисенков Д.Б., Лисёнков В.В.; – № 4318208/25-28; заявл. 19.10.1987; опубл. 23.01.1990, Бюл. № 3.
9. ГОСТ Р 51685 – 2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия (с Изменением N 1).
10. Ахметзянов М.Х. Исследование причин развития поперечных усталостных трещин в железнодорожных рельсах (дефект 21) / М.Х. Ахметзянов, П.Г.Суровин // Экспериментально-расчетные методы исследования задач прочности: Сб. науч. тр. / Сибирский гос. ун-т путей сообщения. – Новосибирск, 2002. – С. 4-9.

Сведения об авторе:

*Санжаровский Александр Владимирович* – аспирант, СибГИУ, г. Новокузнецк.

---

---