

Фимкин Александр Иванович

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ НЕКОРРЕКТНЫХ ЗАДАЧ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**

05.23.17 – Строительная механика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» (МГУПС (МИИТ)) на кафедре «Строительная механика».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Потапов Вадим Дмитриевич

Официальные оппоненты: **Демьянушко Ирина Вадимовна**,
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Московский
автомобильно-дорожный технический
университет (МАДИ)», кафедра «Строительная
механика», заведующий кафедрой

Емельянова Галина Александровна,
кандидат технических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Московский
архитектурный институт (государственная
академия)» (МАРХИ), кафедра «Высшая
математика и строительная механика», доцент

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Научно-
исследовательский институт транспортного
строительства» (ОАО ЦНИИС)

Защита диссертации состоится « 11 » декабря 2013 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 218.005.05 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» по адресу: 127994, г. Москва, ГСП-4, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 (7-й корпус МИИТа, Минаевский пер. д. 2, ауд. 7618).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГУПС (МИИТ).

Автореферат разослан « » ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Шавыкина Марина Витальевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Среди причин многочисленных отказов элементов строительных и транспортных систем, таких как прокатные профили, железнодорожные рельсы, важное место занимают остаточные напряжения. Возникая в процессе производства (при прокатке, правке, термообработке), эти напряжения оказывают влияние на образование и развитие усталостных трещин в элементах конструкций при их эксплуатации. Задача определения остаточных напряжений – одна из проблем контроля качества конструкций. Эффективность её решения зависит от возможности получить с высокой точностью распределение остаточных напряжений в пределах всего поперечного сечения исследуемого объекта. При этом большое значение имеет оперативность и технологичность метода определения остаточных напряжений.

Определение остаточных напряжений сопровождается значительной трудоемкостью выполнения экспериментальных операций, сложностью обработки данных эксперимента. Решение этой задачи, понимаемой как обратная некорректная задача теории упругости, проводится с применением расчетно-экспериментальной интерполяционной методики и регуляризующего алгоритма, что позволяет добиться сочетания высокой точности получаемых результатов с минимумом затрат труда и времени.

Настоящее исследование может найти применение при разработке усовершенствованных технологий правки и термоупрочнения указанных элементов строительных и транспортных систем.

Цель исследования – разработка метода определения остаточных напряжений в прокатных изделиях, позволяющего обеспечить достаточную точность решения и оперативность достижения результата.

Задачи исследования:

1. Обосновать выбор интерполяционного подхода к задаче построения эпюры остаточных напряжений в поперечном сечении элементов конструкций на основе принципа суперпозиции.

2. Создать конечноэлементную (КЭ) модель исследуемого объекта, провести серии расчётов по определению напряженного состояния на части

поверхности конструкции от набора базисных воздействий, представленных в виде комбинации двумерных функций Котельникова; определить коэффициенты матрицы разрешающей системы уравнений.

3. Разработать метод экспериментального определения напряженно-деформированного состояния на поверхности элемента конструкции вследствие его поперечной разрезки в области, прилегающей к месту разреза;

4. Разработать алгоритм определения остаточных напряжений в объеме элемента конструкции как решение обратной некорректной задачи, полученное с применением метода регуляризации Тихонова.

5. Выполнить численное решение модельных задач для проверки достоверности предложенного метода.

Научная новизна работы:

1. Сформулирована задача определения остаточных напряжений в элементах строительных систем как обратная некорректная задача, описываемая уравнением Фредгольма I рода.

2. Разработана расчетно-экспериментальная методика определения остаточных напряжений с использованием метода регуляризации Тихонова.

3. Обосновано применение при численной реализации расчетно-экспериментальной методики интерполяционного базиса, построенного с использованием двумерных функций Котельникова.

4. Получены эпюры остаточных напряжений в натурных образцах железнодорожных рельсов с использованием разработанной расчетно-экспериментальной методики.

Практическая значимость выполненной работы заключается в возможности применения предложенного метода определения остаточных напряжений в элементах конструкций для контроля их качества при производстве, для оценки влияния остаточного напряженного состояния на образование и развитие дефектов в процессе эксплуатации при анализе причин образования дефектов и разрушения конструкций.

Достоверность результатов, полученных с применением предложенной в работе методики, обеспечивается:

1. Строгостью использования методов КЭ анализа исследуемого объекта.
2. Использованием апробированных методов проведения эксперимента.
3. Решением прямых модельных тестовых задач, в ходе которых с хорошей точностью производится восстановление описанным в работе методом наперед заданной распределенной нагрузки.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации.

Все результаты, изложенные в диссертационной работе, получены лично автором.

На защиту выносятся:

1. Расчетно-экспериментальная методика определения остаточных напряжений в прокатных элементах строительных и транспортных систем на основе постановки и решения обратной некорректной задачи с использованием алгоритма регуляризации Тихонова.
2. Выбор функций Котельникова в качестве базисных при решении задачи интерполяции.
3. Процедура выбора параметра регуляризации.
4. Результаты исследования остаточных напряжений в натурных образцах железнодорожных рельсов с использованием расчетно-экспериментальной методики.

Апробация работы и публикации. Результаты исследований докладывались и обсуждались на научно-практической конференции «Неделя науки в МИИТе» (г. Москва, 1998 г.), секции прочностной надежности 60-й научно-методической и научно-исследовательской конференции Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (г. Москва, 2004 г.), на семинаре кафедры «Строительная механика» Сибирского государственного университета путей сообщения (г. Новосибирск, 22 июня 2009 г.), секции «Конструкция, укладка, ремонт и содержание бесстыкового пути в современных условиях» X научно-технической конференции с международным участием, МГУПС (МИИТ), апрель 2013 г., на заседании кафедры «Строительная механика» МГУПС (МИИТ) 13 июня 2013 г.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в десяти печатных работах, три из которых в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки России.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (110 наименований). Общий объем работы 134 страницы, в том числе 100 страниц основного текста, 96 рисунков, 5 таблиц, 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование выбора предмета исследования, сформулирована цель работы, перечислены задачи, решенные в ходе реализации поставленной цели.

В первой главе на примере железнодорожных рельсов описаны история вопроса и современное представление о причинах образования остаточных напряжений, приведена классификация, дан обзор методов их определения.

Причины образования остаточных напряжений в железнодорожных рельсах связаны с технологией их производства. Отмечены три основных этапа производства рельсов, оказывающих влияние на формирование в них остаточного напряженного состояния: прокатка, правка, термообработка.

После операции прокатки, формирующей требуемое поперечное сечение, рельсы имеют незначительные остаточные напряжения, но при этом недопустимые искривления по длине. Операция правки обеспечивает рельсу требуемую прямолинейность, но при этом формируются высокие остаточные напряжения. Жесткие режимы правки, обеспечивающие минимальные отклонения от прямолинейности по длине, приводят к образованию растягивающих остаточных напряжений в головке и подошве. Это обстоятельство сильно снижает характеристики усталостной прочности и живучести рельсов и, таким образом, ухудшает их эксплуатационные свойства.

Свой вклад в формирование эпюры остаточных напряжений вносит их термообработка. Повышая твердость металла и улучшая тем самым износостойкость рельсов, закалка также может сопровождаться образованием высоких уров-

ней напряжений в трещинопасных зонах профиля рельса. Таким образом, контроль остаточных напряжений очень важен в процессе производства рельсов.

Приведена классификация остаточных напряжений, предложенная Н.Н. Давиденковым. Дан обзор методов определения остаточных напряжений, предложена классификация методов их определения.

Обзор методов определения остаточных напряжений включает историческую справку. Выделены работы 30-х гг. XX в. Х. Майера, исследования, выполненные в 1965 г. в Токийском университете, работы европейского комитета ORE (Отдел испытаний и исследований международного железнодорожного Союза), работы кафедры "Строительная механика" Сибирской государственной академии путей сообщения (НИИЖТ) под руководством Александрова А. Я., Ахметзянова М. Х., Кутового В.П.

Среди методов, использованных ЦНИИ МПС, можно отметить традиционный метод вырезания темплета, расчетно-аналитический метод, метод магнитной анизотропии. Получил дальнейшее развитие метод продольной разрезки. Широкомасштабная апробация этого метода в серии лабораторных экспериментов позволила применять его в практике заводского контроля на Нижнетагильском металлургическом комбинате с 1967 г. Метод продольной разрезки рельсовой пробы и в настоящее время используется для контроля остаточных напряжений на производстве. Этот метод нашел отражение в государственном стандарте на производство рельсов ГОСТ Р 51685-2000.

Исследованием остаточных напряжений и их влияния на эксплуатационные свойства рельсов занимались ученые ВНИИЖТ: Н.П.Щапов, А.Ф. Золотарский, Е.А. Шур, А.Д. Конюхов, В.А. Рейхарт, В.М. Федин и др.

Приведены примеры современных зарубежных исследований остаточных напряжений в рельсах и методах их определения. Большое внимание проблеме остаточных напряжений в рельсах уделяется в Польше. Известны исследования под руководством профессора Р. Радомски (R Radomski), включающие разработку собственной методики определения остаточных напряжений на основании глубокого анализа предшествующего опыта. Отмечена глубокая прора-

ботка вопросов техники эксперимента, решение ряда практических задач, связанных с улучшением технологии производства рельсов.

Вопросы оптимизации технологических операций при производстве рельсов, связанные с исследованиями остаточных напряжений, отражены в работах, выполненных в Германии. Наряду с традиционными аналитическим (с использованием тензометрии) и ультразвуковым методами для качественной оценки остаточных напряжений, возникающих после роликовой правки, использовался геометрический метод, основанный на эффекте Баушингера.

Особый интерес представляет так называемый контурный метод (The Contour Method), применимый в том числе и для определения остаточных напряжений в железнодорожных рельсах. Метод изложен в работах Михаэля Прайма (Michael B. Prime) из Национальной лаборатории Лос-Аламоса, США. Этот метод основан на поперечной разрезке рельса. Возникающая при этом деформация сечения в месте распила подвергается тщательному измерению. Метод обеспечивает хорошую точность определения остаточных напряжений. Однако техника эксперимента требует использования прецизионного оборудования для выполнения поперечного разреза и высокоточного измерения перемещений, что может быть реализовано только в условиях специально оснащенной лаборатории.

Следует отметить, что исследования остаточных напряжений и их влияния на параметры выносливости изучаемых объектов также проводились в МИИТ. Исследованиям усталостной прочности и живучести элементов пролетных строений мостов во взаимосвязи с остаточным напряженным состоянием в них уделялось внимание в работах П.В. Мальцева, В.О. Осипова. Вопросам надежности элементов подвижного состава с экспериментальными исследованиями остаточных напряжений вагонных колес посвящены работы кафедры «Технология сварки, металловедения и износостойкость деталей» под руководством С.Н. Киселева.

Вторая глава посвящена интерполяционной расчётно-экспериментальной методике определения остаточных напряжений в железнодорожных рельсах. Отличительная особенность предлагаемого метода исследо-

вания заключается в том, что область поиска решения не ограничивается только поверхностью исследуемого объекта. Метод позволяет со сравнительно высокой точностью определить остаточное напряжённое состояние в объёме рельса без его детальной разрезки на отдельные фрагменты, основываясь лишь на единственном достаточно легко осуществимом поперечном разрезе (см. рисунок 1).

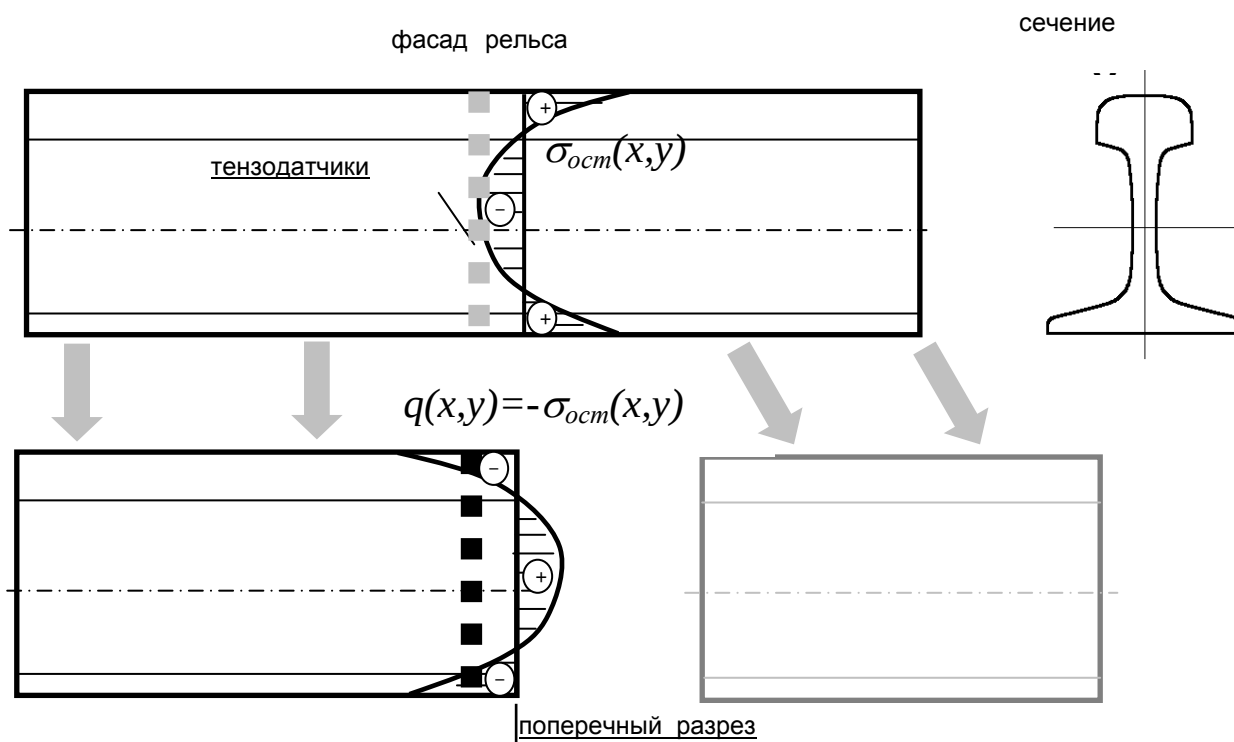


Рисунок 1 – Схема определения остаточных напряжений в рельсе

Сущность метода заключается в восстановлении “обратной” продольной нагрузки $q(x,y)$, отличающейся от эпюры остаточных напряжений $\sigma_{ост}(x,y)$ только знаком, по найденному экспериментально напряженному состоянию на поверхности рельса в группе опорных точек. Поперечная разрезка рельсовой пробы эквивалентна действию этой “обратной” продольной нагрузки $q(x,y)$, приложенной к торцу рельса в месте распила. Деформации на поверхности рельса, возникающие вследствие освобождения поперечного сечения в месте распила от продольных остаточных напряжений, служат входными данными расчетной интерполяционной методики, построенной с помощью МКЭ. Таким образом, задача исследования заключается в том, чтобы определить остаточное напряжённое состояние объекта по его проявлению в виде деформированного состояния на поверхности после единственного поперечного разреза.

Основная трудность поставленной задачи состоит в том, что она относится к классу обратных задач: причинный фактор – остаточное напряженное состояние в объёме тела – определяется по его проявлению: высвобождаемым деформациям на части поверхности исследуемого объекта, определяемым экспериментально. При решении такого рода задач важное значение имеет их устойчивость к вариации исходных данных – погрешностям данных эксперимента. Применительно к определению остаточных напряжений задача считается устойчивой, если малым погрешностям измерения деформированного состояния на поверхности соответствуют малые изменения решения в виде функции распределения остаточных напряжений в объёме тела. В поставленной задаче требование устойчивости нарушается, то есть она является некорректно поставленной обратной задачей. Развитие теории и решение такого рода задач нашли отражение в трудах М. М. Лаврентьева, В.А. Морозова, А.Н. Тихонова, В.К. Иванова, А.Б. Бакушинского, В.Н. Вапника, многих других учёных.

Математическая постановка задачи связана с интегральным уравнением Фредгольма I-го рода:

$$\int_{\Omega} H_{ij}^{(k)}(s, x) \sigma(x) d\Omega = u(s) \quad s \in S; \quad x \in \Omega, \quad (1)$$

где S – часть поверхности рельса, содержащая точки измерения деформаций;

Ω - поперечное сечение рельса, в котором ищется распределение остаточных напряжений;

$H_{ij}^k(s, x)$ - ядро интегрального оператора, тензорная функция напряжений Грина;

$\sigma(x)$ -искомое распределение напряжений в пределах поперечного сечения.

Задача, описываемая уравнением (1), относится к классу некорректно поставленных задач. Понятие корректности постановки задач было впервые сформулировано Ж. Адамаром. Задача является корректно поставленной (по Адамару), если выполняются три условия: 1)решение существует; 2)решение однозначно; 3)решение устойчиво по отношению к вариации исходных данных. Третье условие корректности по Адамару – условие устойчивости решения – не выполняется. Опыт решения обратных задач подсказывает, что даже незначительным вариациям исходных данных, найденных в ходе прямых измерений, могут соответствовать сколь угодно большие возмущения решения.

Для решения уравнения (1) строится его дискретный аналог. Вокруг области поперечного сечения рельса формируется прямоугольная сетка, с узлами которой связан набор базисных функций. Функция распределения остаточных напряжений в пределах поперечного сечения находится как линейная комбинация базисных функций F_i .

$$\sigma(x, y) = \sum_i^N X_i \cdot F_i(x, y) \quad (2)$$

В работе приводится обоснование выбора базисных функций. На основе анализа результатов исследования остаточных напряжений, проведенных в НИИЖТ, была установлена возможность применения интерполяционной методики для возможно более точной аппроксимации поверхности функции напряжений с привлечением минимального конечного базиса интерполяционных функций. Выбор системы интерполяционных функций был основан таким образом на установленном факте, что в пределах области поперечного сечения рельса интерполируемая функция представляется непрерывной квазипериодической функцией координат двумерной плоскости, заданной в ограниченном числе точек этой плоскости и значениями на контуре.

В предлагаемой работе в качестве базисных функций было признано целесообразным использование функций Котельникова:

$$F_i(x, y) = \frac{\sin(\pi(x - k \cdot \Delta_x) / \Delta_x)}{\pi(x - k \cdot \Delta_x) / \Delta_x} \times \frac{\sin(\pi(y - l \cdot \Delta_y) / \Delta_y)}{\pi(y - l \cdot \Delta_y) / \Delta_y} \quad (3)$$

где k, l – числовые значения, определяющие положение базисной функции на координатной плоскости; Δ_x, Δ_y – шаг по осям x и y сетки, на которой задана система базисных функций.

Функции, предложенные В.А. Котельниковым, широко используются в теории связи и передачи информации. Задача восстановления сигнала по его отклику в регистрирующем устройстве с помощью этих функций аналогична решаемой задаче, а именно: восстановлению значений функции в узлах интерполяции по информации о значениях на контуре поперечного сечения рельса. Известна теорема Котельникова, которую применительно к решаемой задаче можно сформулировать следующим образом: любая непрерывная функция $f(x)$, спектр которой ограничен значением $\omega_B = 2\pi \gamma_B$, может быть без потерь информации

представлена своими дискретными значениями $\{f(k\Delta)\}$, взятыми с интервалом Δ , удовлетворяющим следующему неравенству:

$$\Delta \leq 1/(2\gamma_B) = \pi / \omega_B.$$

Восстановление исходной непрерывной функции $f(x,y)$ по набору N его дискретных значений производится по формуле

$$f(x,y) = \sum_{n=1}^N f_n \frac{\sin(\pi \frac{x - k\Delta_x}{\Delta_x})}{\pi \frac{x - k\Delta_x}{\Delta_x}} \cdot \frac{\sin(\pi \frac{y - l\Delta_y}{\Delta_y})}{\pi \frac{y - l\Delta_y}{\Delta_y}}. \quad (4)$$

Здесь в отличие от традиционной формулировки теоремы Котельникова в качестве независимой переменной вместо времени используется пространственная координата.

Формула (4) представляет собой разложение функции в ряд по системе функций Котельникова. На рисунке 2 схематично показана продольная нагрузка, распределенная по закону одной из базисных функций Котельникова.

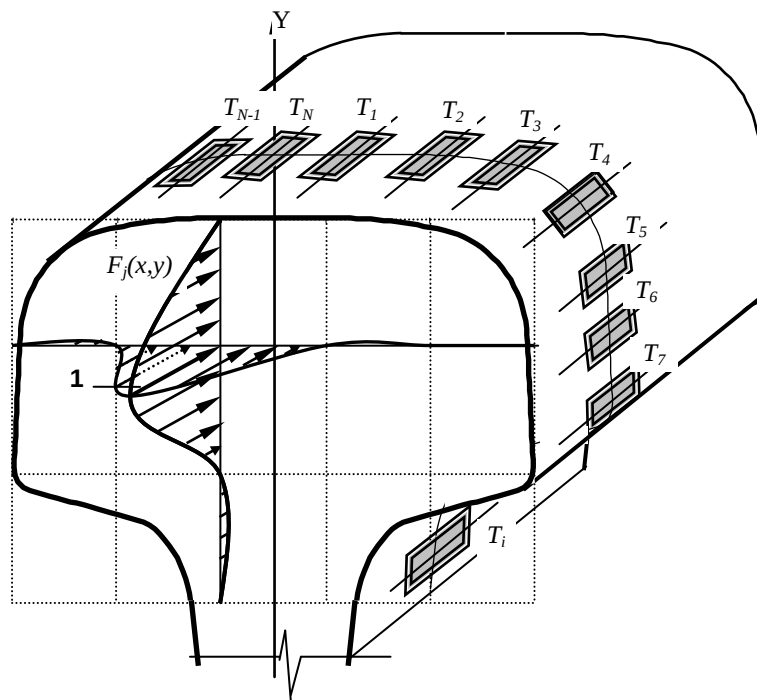


Рисунок 2– Схематичное изображение продольной нагрузки, распределенной по закону одной из базисных функций

Построение разрешающей системы уравнений можно проследить на основе формирования одного из уравнений. В соответствии с уравнением (2) напряжения в точке T_i вывода экспериментальной информации (рисунок 2)

можно представить как линейную комбинацию напряжений в этой точке от каждой базисной функции:

$$\sigma_{i1} \cdot X_1 + \sigma_{i2} \cdot X_2 + \dots + \sigma_{ij} \cdot X_j + \dots + \sigma_{iM} \cdot X_M = \sigma_i^{\vartheta}. \quad (5)$$

где X_j – множители к соответствующим базисным функциям, неизвестные системы уравнений;

$\sigma_{i1}, \sigma_{i2} \dots$ – напряжения в точке T_i на поверхности рельса от нагрузки в виде первой, второй и т.д. базисных функций;

σ_i^{ϑ} – напряжения в точке T_i на поверхности рельса, найденные экспериментально.

Составляя для каждой точки вывода экспериментальной информации выражение, аналогичное (5), получаем систему N линейных алгебраических уравнений с M неизвестными. Элементы матрицы разрешающей системы уравнений находятся путём решения объёмной задачи теории упругости. Объектом является фрагмент натурального рельсового профиля, к которому последовательно прикладываются нагрузки в виде набора базисных функций. Задача заключается в нахождении напряжённо-деформированного состояния на поверхности рельса в группе заданных точек, совпадающих с точками вывода экспериментальной информации. Аналитическое решение поставленной задачи затруднительно, во-первых, из-за размерности решаемой задачи, во-вторых, из-за сложности геометрии объекта исследования. В работе был использован метод конечных элементов, получивший широкое распространение в практике расчётов конструкций и сооружений на силовые воздействия.

На основе серии расчетов КЭ модели формируется прямоугольная матрица $\mathbf{A}$ размерами $M \times N$ ($M \geq N$), которая является КЭ аналогом ядра интегрального оператора. Столбцы матрицы $\mathbf{A}$ являются векторами деформаций в ряде точек на поверхности объекта при последовательном загрузении расчетной модели набором нагрузок, M – количество строк матрицы $\mathbf{A}$ – совпадает с числом выбранных точек на контуре поперечного сечения рельса, N – количество столбцов матрицы $\mathbf{A}$ – число загрузений модели.

В этом случае задача сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений

$$AX = B, \quad (6)$$

где X – вектор неизвестных коэффициентов к системе базисных функций,

B – вектор относительных деформаций, полученный экспериментально.

Анализ матрицы A с помощью процедуры сингулярного разложения SVD математического пакета MATLAB в ряде решенных задач показал, что она является плохо обусловленной. Это подтверждает то обстоятельство, что поставленная задача относится к классу некорректно поставленных задач: незначительные вариации вектора правой части приводят к существенным изменениям решения системы. Таким образом, не выполняется третье условие корректности по Адамару – условие устойчивости решения. Методы решения некорректных задач основываются на построении регуляризующих алгоритмов, позволяющие получать приближенные решения, устойчивые к вариациям исходных данных и сопоставимые с ними по точности. Решение системы (6) предлагается осуществить с использованием метода регуляризации Тихонова

$$(A^T A + \alpha E)X = A^T B \quad (7)$$

где X – вектор неизвестных коэффициентов к системе базисных функций;

B – вектор деформаций, полученный экспериментально;

A – матрица коэффициентов системы линейных алгебраических уравнений (6),
КЭ аналог ядра интегрального уравнения (1);

α – параметр регуляризации.

Таким образом, предлагается следующий алгоритм определения остаточных напряжений в рельсах с использованием интерполяционной методики:

1. Выполнить поперечный распил рельса. Зафиксировать относительные деформации в группе опорных точек вблизи места распила.
2. Создать КЭ модель отрезка рельса. Произвести расчеты модели на серию базисных воздействий.
3. Сформировать систему линейных алгебраических уравнений. Матрицу коэффициентов системы построить с использованием относительных деформаций в группе опорных точек, полученных по результатам КЭ расчетов модели на

базисные воздействия. Правую часть системы уравнений сформировать на основе результатов эксперимента.

4. Выполнить решение системы линейных алгебраических уравнений с использованием регуляризующего алгоритма Тихонова. Подобрать параметр регуляризации из условия минимума невязки решения на контуре рельса.
5. Используя полученное решение системы уравнений, построить поле остаточных напряжений в пределах поперечного сечения рельса.

В главе 3 представлена практическая реализация интерполяционной методики определения остаточных напряжений в объеме рельса.

Для реализации этой методики осуществлен расчет методом конечных элементов отрезка натурального рельса типа Р65 длиной 240 мм. Модель рельса сформирована из объемных 20-узловых конечных элементов серендипова семейства. Топология модели представляет собой регулярную структуру в виде набора слоев элементов в направлении оси Z модели (продольной оси рельса) со сгущением сетки к плоскости приложения нагрузок. Подробность разбивки на элементы в плоскости поперечного сечения определялась из условия согласования сетки конечных элементов и сетки узловых точек базисных функций.

Проведен расчет модели на серию загрузок нагрузками в направлении продольной оси рельса, распределенными в плоскости поперечного сечения рельса по законам, описываемым двумерными функциями Котельникова. Для реализации загрузок в КЭ анализе была составлена процедура замены распределенной нагрузки эквивалентной системой сосредоточенных сил в узлах торцевого сечения модели рельса. Общее количество загрузок модели – 84, причём число загрузок с максимумом в области головки – 24, в области шейки – 24, в области подошвы рельса – 36.

В ходе расчета от каждого нагружения нагрузкой по закону соответствующей базисной функции были получены значения продольных относительных деформаций в узловых точках вывода данных эксперимента. Эти значения составили коэффициенты матрицы A системы линейных алгебраических уравнений. Количество строк матрицы A совпадает с числом выбранных узловых точек вывода данных эксперимента, количество столбцов соответствует числу загрузок.

Результаты расчета представлены графически в виде распределений относительных деформаций по контуру сечения рельса от серии загрузений модели базисными воздействиями.

Существенным разделом работы является экспериментальная часть исследования. Здесь выделяется три основных этапа.

Этап № 1 – снятие информации с регистрирующей аппаратуры. Для регистрации результатов эксперимента используется многоканальная тензометрическая система серийного производства, позволяющая провести измерения показаний тензорезисторов с точностью $2 \cdot 10^{-6}$ единиц относительных деформаций. К этой системе подключалось до пятидесяти тензорезисторов базой 3-5 мм, наклеенных на поверхность рельса в предварительно намеченных точках. Данные эксперимента сохранялись на жёстком диске ЭВМ.

Этап № 2 – первичная обработка результатов эксперимента. Процедура включает в себя анализ данных эксперимента, оценку степени достоверности этих данных, отбрасывание данных, содержащих грубые ошибки эксперимента. Целью первичной обработки является получение "выходных результатов", или "выходной кривой" эксперимента, которая представляет собой распределение продольных деформаций на контуре исследуемого поперечного сечения рельса. Построение "выходной кривой" эксперимента в виде непрерывной функции криволинейной координаты контура рельса на основе полученной дискретной информации осуществлялась с помощью сплайн-аппроксимации. Степень гладкости этой кривой позволяла судить о достоверности полученных экспериментальных данных и при необходимости проводить дополнительную фильтрацию входных данных. Такая обработка экспериментальной информации позволяет провести согласование точек вывода данных эксперимента с узлами сетки конечноэлементной модели.

Этап № 3 – представление результатов, полученных на втором этапе обработки, в удобной для дальнейшего анализа форме. Оно состоит в формировании вектора правой части разрешающей системы линейных алгебраических уравнений.

Приведена оценка погрешности эксперимента. Верхняя граница погрешности с учетом всех случайных составляющих – 14 МПа.

Проверка достоверности предложенной методики осуществлена путем решения прямой модельной задачи численными методами. С этой целью выбирался линейно протяженный модельный объект с поперечным сечением простой геометрической формы. На него оказывалось заданное заранее силовое воздействие в виде распределенной нагрузки, моделирующей остаточное напряженное состояние объекта. С помощью КЭ анализа определялось напряженно-деформированное состояние в группе опорных точек на поверхности объекта от заданного силового воздействия. Эти результаты служили входными данными интерполяционной методики, с помощью которой осуществлялось восстановление заданного воздействия. Соответствие заданной и восстановленной нагрузок позволяло сделать вывод о достоверности предложенной интерполяционной методики решения обратной некорректной задачи.

В качестве первой модельной задачи представлено решение плоской задачи теории упругости. Выполнено исследование пластинки в форме прямоугольника, вытянутого в одном направлении. Сначала решается прямая задача нахождения компонент тензора напряжений в группе опорных точек от заданной самоуравновешенной нагрузки путем расчета конечноэлементной модели пластинки. Далее с использованием интерполяционной методики производится восстановление приложенной к модели нагрузки по найденным на первом этапе напряжениям в опорных точках. Проверка достоверности методики заключается в определении соответствия заданной и восстановленной нагрузок. Особый интерес при решении плоской задачи представляет демонстрация регуляризующего эффекта применения в качестве базиса функций Котельникова. Приведены результаты применения методики в случае искусственного «зашумления» результатов расчета, моделирующего погрешности экспериментальных данных. Так, при уровнях погрешности в 5%, 10% и 15% отклонения восстановленной нагрузки от заданной составил соответственно 5%, 8% и 11%, что говорит о соответствии невязки решения вариации квазиэкспериментальных данных и, следовательно, об устойчивости полученного решения и устойчивости метода в целом.

Другая задача использует в качестве объекта объемное тело: вытянутый в одном направлении прямоугольный параллелепипед. В этой задаче методом численного эксперимента восстанавливается заданная заранее поверхность, моделирующая распределение остаточных напряжений в объеме тела. Как и в первой модельной задаче, к объекту прикладывается нагрузка, распределенная по заданному заранее закону, соответствующему распределению остаточных напряжений в прямоугольном бруске. Производится восстановление этой нагрузки на основе информации о напряженно-деформированном состоянии по результатам расчетов КЭ модели объекта. Полученное соответствие заданной и восстановленной нагрузок свидетельствует о достоверности предложенной интерполяционной методики. Особенность второй модельной задачи заключается в том, что размерность используемого в ней объекта соответствует размерности физической задачи восстановления остаточного напряженного состояния в рельсе.

В четвертой главе приведены результаты применения описанной методики для нахождения остаточных напряжений в натурных рельсах.

В целях практической реализации разработанной интерполяционной методики было исследовано остаточное напряженное состояние двух рельсов Р65 серийного производства, правленных с использованием роликовой рельсоправильной машины и термоупрочненных с применением различных режимов термообработки. Исследовались две пробы, представлявших собой отрезки натуральных рельсов длиной 1,2 м.

Первая рельсовая проба содержала в информационном сечении 30 тензорезисторов, симметрично расположенных по контуру поперечного сечения относительно его вертикальной оси. Поперечный разрез рельсовой пробы на расстоянии 20 мм от сечения с датчиками сопровождался измерением относительных деформаций, которые служили входными данными интерполяционной методики.

На основе полученной экспериментальной информации с использованием интерполяционной методики определяются остаточные напряжения в объеме рельса. Продольные деформации на контуре после поперечной разрезки и поле продольных остаточных напряжений показаны на рисунке 3.

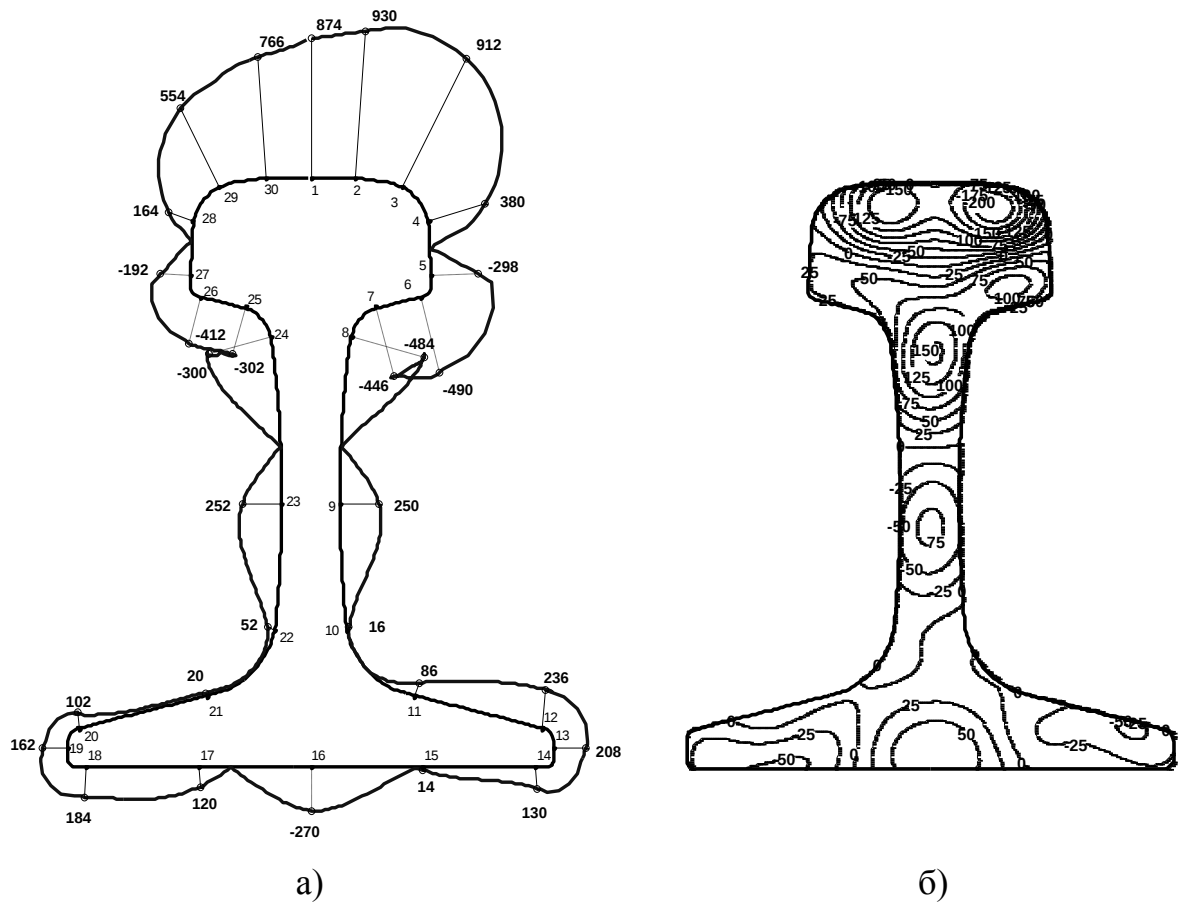


Рисунок 3 – Продольные деформации на контуре после поперечной разрезки, мкм/м (а) и поле продольных остаточных напряжений в рельсе №1, МПа (б)

Второй эксперимент был проведен более подробно. Схема проведения эксперимента приведена на рисунке 4.

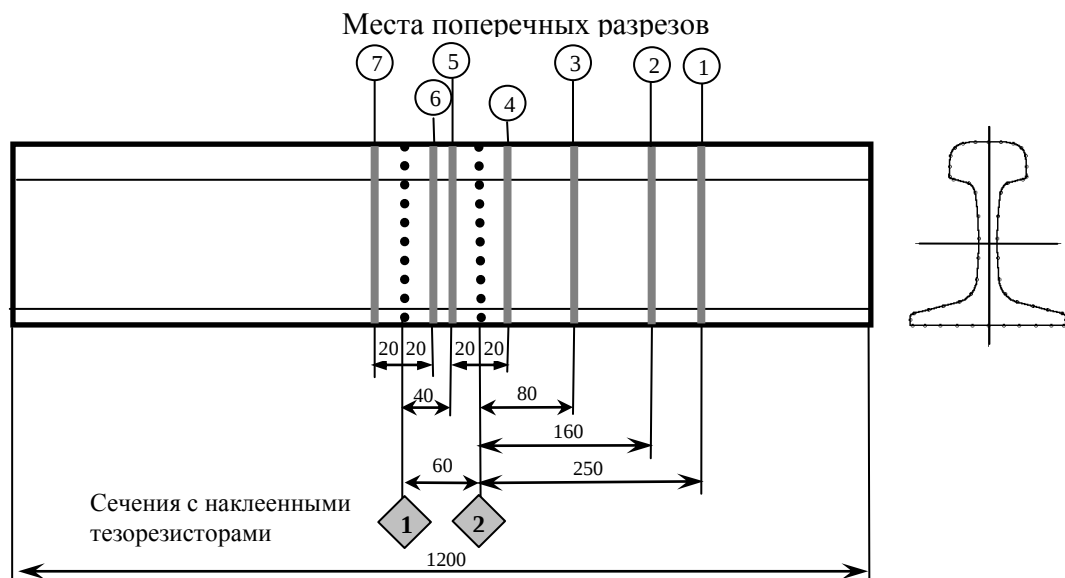


Рисунок 4 – Последовательность разрезки второй рельсовой пробы (нумерация разрезов приведена в кружочках)

Одна из задач при исследовании второй рельсовой пробы – определить степень информативности экспериментальной части работы в зависимости от близости зоны сбора опытных данных к месту поперечного разреза. С этой целью было осуществлено несколько поперечных разрезов рельсовой пробы с постепенным приближением к сечению с наклеенными датчиками. Анализ эпюр относительных деформаций, построенных по результатам показаний тензорезисторов, подтверждает обоснованность выбора расстояния между сечением с датчиками и местом поперечного распила рельса в 20 мм.

Еще одна задача, решаемая в ходе исследования второй рельсовой пробы, состояла в уточнении параметра регуляризации. С этой целью производился еще один поперечный разрез рельса, который отделял от исследуемой рельсовой пробы узкий темплет, содержащий в средней части сечение с датчиками. Последний разрез сопровождался практически полным высвобождением в темплете остаточных напряжений. Экспериментальная информация, полученная в этом случае, наиболее адекватно соответствует остаточному напряженному состоянию на поверхности рельсовой пробы и распределению остаточных напряжений в объеме рельса (рисунок 5).

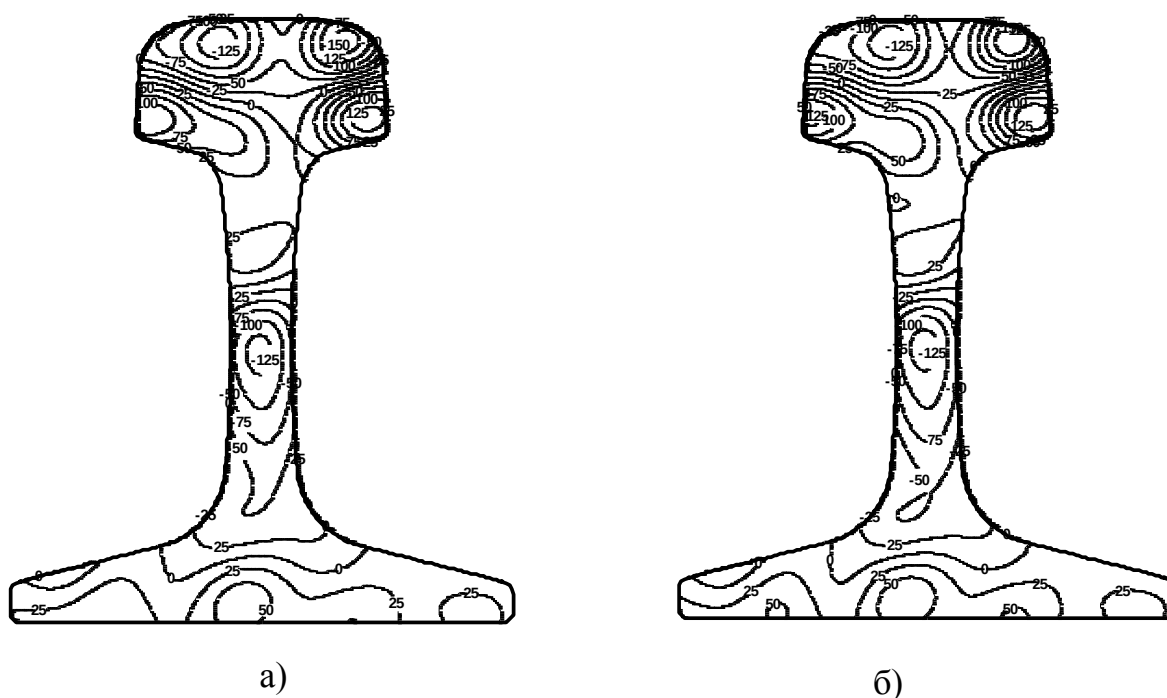


Рисунок 5 – Распределение продольных остаточных напряжений
в сечениях 1 (а) и 2(б) рельса №2, МПа

Выбор двух сечений, расположенных вблизи друг друга и оснащенных датчиками, позволил проследить повторяемость эпюры остаточных напряжений на поверхности и в объеме и подтвердил гипотезу о неизменности эпюры по длине рельса.

Большее количество датчиков в сечении (50 шт.) позволило подробнее изучить поведение кривой распределения остаточных напряжений на контуре рельса для оптимизации их количества.

По результатам разрезки второй рельсовой пробы было проведено исследование влияния погрешности измерения относительных деформаций на поверхности рельса на характер распределения остаточных напряжений в поперечном сечении (решение задачи) с помощью численного эксперимента. Экспериментальные данные были искусственно зашумлены, то есть был смоделирован их разброс с помощью датчика случайных чисел. Было выбрано три уровня вариации выходной кривой эксперимента, в процентах от максимального по модулю значения измеренных напряжений: $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ и $\pm 20\%$. Модифицированные таким образом опытные данные использовались в качестве входных данных интерполяционной методики, в результате чего был получен ряд результатов с соответствующей степенью возмущения решения задачи. Сравнение полученных результатов свидетельствует об устойчивости решения некорректной задачи по отношению к уровню зашумления исходных данных.

Основные результаты и выводы

1. Создана новая методика, позволяющая определять с достаточной точностью остаточные напряжения в объеме исследуемого линейно-протяженного элемента системы в пределах всего поперечного сечения на основании результатов единственного поперечного разреза. Благодаря простоте исполнения методика применима в лаборатории, на производстве и в полевых условиях.

2. Сформулирована и решена задача расчетно-экспериментального определения остаточных напряжений в железнодорожных рельсах. С этой целью разработана КЭ модель рельса, выполнена серия расчётов напряжённого состояния на поверхности от воздействия набора продольных нагрузок, распределенных на торцевой поверхности модели по законам двумерных базисных функций

Котельникова. Решена задача восстановления остаточного напряженного состояния в объеме рельса с применением регуляризующего алгоритма на основе метода регуляризации Тихонова. Поиск параметра регуляризации был осуществлен на основе минимизации разности вычисленных и экспериментально найденных напряжений на поверхности рельса. Методика опробована на полнопрофильных рельсовых пробах типа Р65.

3. Экспериментально определено напряженное состояние на поверхности рельса. Примененный метод тензометрии в сравнении с другими экспериментальными методами обеспечивает наименьшую погрешность в определении относительных деформаций. С учетом согласования погрешностей результата с погрешностями исходных данных в регуляризованном решении подтверждена высокая точность метода в целом. На основе экспериментального исследования, проведенного с более детальной разрезкой рельса, обосновано значение параметра регуляризации, обеспечивающее оптимальное соответствие получаемого решения условиям на контуре сечения рельса.

4. Подтверждена достоверность предложенной интерполяционной методики путем численного решения прямой задачи с использованием в качестве объекта исследования модели прямоугольного параллелепипеда.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Фимкин, А.И. Применение метода регуляризации Тихонова для определения остаточных напряжений / А.И. Фимкин // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2009. – №4. – С. 48-55.
2. Фимкин, А.И. Оценка достоверности расчетно-экспериментальной интерполяционной методики определения остаточных напряжений с помощью численного эксперимента / А.И. Фимкин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2013. – №5. – С. 29-35.
3. Фимкин, А.И. Использование функций Котельникова при численном решении обратных некорректных задач / А.И. Фимкин // Строительство и реконструкция. – 2013. – №5. – С. 54-58.

В иных изданиях:

4. Фимкин, А.И. Разработка интерполяционной методики определения остаточных напряжений в железнодорожных рельсах / А.И. Фимкин, И.Е. Степанов // Неделя науки – 98: тезисы докладов научно-практической конференции – М. : МИИТ, 1998. – С. 40.
5. Фимкин, А.И. Построение расчетной модели для определения остаточных напряжений в железнодорожных рельсах / А.И. Фимкин // Неделя науки – 98: тезисы докладов научно-практической конференции. – М. : МИИТ, 1998. – С. 41.
6. Фимкин, А.И. Расчётно-экспериментальный метод определения продольных остаточных напряжений в железнодорожных рельсах / А.И. Фимкин, Д.Б. Долотказин // Вестник Московского института инженеров ж.-д. транспорта (МИИТ) – 2001. – Вып. №6. – С. 28-39.
7. Фимкин, А.И. Расчётно-экспериментальный метод определения остаточных напряжений в протяжённых объектах // А.И. Фимкин, Д.Б. Долотказин // Вопросы прочности, динамики и проектирования конструкций: сборник научных трудов МАДИ (ГТУ). – 2004. – С. 130-138.
8. Фимкин, А.И. Реализация интерполяционной методики определения остаточных напряжений в железнодорожных рельсах с помощью метода конечных элементов / А.И. Фимкин // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: труды X научно-технической конференции. Москва, 4-5 апреля 2013. – М. : МГУПС (МИИТ). – С. 229–232.
9. Фимкин, А.И. Дифференцированная закалка сварных стыков рельсов / В.А. Резанов, В.М. Федин, А.В. Башлыков, А.И. Фимкин, С.К. Земан // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2013. – № 2. – С. 28-34.
10. Фимкин, А.И. Термическое упрочнение сварных стыков рельсов на промышленном транспорте / Л.А. Андреева, В.М. Федин, А.В. Башлыков, А.И. Фимкин, В.А. Резанов // Промышленный транспорт XXI век . – 2013. – №1. – С. 19 – 20.

Фимкин Александр Иванович

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ НЕКОРРЕКТНЫХ ЗАДАЧ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Специальность 05.23.17 – Строительная механика

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано к печати

Формат 60x80 1/16

Объем 1,5 п.л.

Заказ №

Тираж 80 экз.

УПЦ ГИ МИИТ, Москва, 127994, ул. Образцова, д. 9, стр. 9