



Улыбин Алексей Владимирович

**МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ**

Специальность: 05.11.01 Приборы и методы измерения
(измерения механических величин)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель,
доктор технических наук

доктор технических наук,
Ватин Николай Иванович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор,
Мазин Валерий Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент
Павлов Игорь Валерьевич

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный
университет информационных технологий,
механики и оптики,
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Защита состоится " 30 " декабря 2010 года в 15-30 на заседании диссертационного совета Д 212.229.10 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.229.10
Кандидат технических наук, доцент



Кудряшов Э.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

В настоящее время в России и других странах строится и эксплуатируется большое количество зданий и сооружений с несущими строительными конструкциями, выполненными из стали. В связи с большим сроком эксплуатации существующих конструкций, а также большой неопределенностью совокупности факторов, влияющих на их работу, имеется необходимость проведения мониторинга их состояния. Необходимость проведения работ по мониторингу обосновывается требованиями ФЗ РФ № 384 от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», ГОСТ Р 53778-2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» и других документов.

Одним из основных параметров, контроль которых производится при мониторинге технического состояния, являются эксплуатационные механические напряжения в элементах стальных конструкций. Известные методы неразрушающего контроля напряженного состояния в ряде случаев не могут быть использованы достаточно полно, либо их использование затруднено, экономически нецелесообразно или неэффективно.

Для особо важных зданий и сооружений актуальным является разработка и применение альтернативных средств мониторинга. Совокупное применение исследуемого в настоящей работе резистивного электроконтактного метода с другими традиционными методами контроля приведет к повышению безопасности строительных объектов и срока их эксплуатации.

Целью работы является повышение надежности, эксплуатационной безопасности и срока службы стальных строительных конструкций за счет применения резистивного электроконтактного метода для контроля механических напряжений.

Основные задачи исследования

1. Теоретически исследовать и определить зависимость электрического сопротивления, измеряемого в поверхностном слое стальных элементов при пропускании через него электрического тока, от эксплуатационных одноосных механических напряжений растяжения-сжатия.

2. Провести экспериментальные исследования влияния внешних факторов, имеющих место при мониторинге напряженного состояния строительных конструкций, на результаты измерений.
3. Разработать технологию применения и внедрить резистивный электроконтактный метод для мониторинга напряжений в стальных конструкциях.

Объектом исследования являются элементы стальных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений.

Предметом исследования является метод измерения механических напряжений в стальных элементах строительных конструкций посредством измерения электрического сопротивления.

Методы исследования

Зависимость электрического сопротивления от механических напряжений исследовалась теоретико-экспериментальным методом.

Задачи исследования решались на основе применения апробированных разрушающих и неразрушающих методов контроля, численных методов расчета, прикладной статистики и интерпретации статистических данных. Экспериментальные данные получены в ходе исследования физических моделей.

Научная новизна

1. Обнаружена и исследована аномально высокая чувствительность электро-резистивного эффекта в ферромагнитных конструкционных материалах с коэффициентом чувствительности $\Delta R/R$, достигающим $2 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{-1}$.
2. Теоретически выявлена и экспериментально подтверждена линейная зависимость между электрическим сопротивлением (R), измеряемым на переменном токе, и одноосными механическими напряжениями растяжения – сжатия (σ) при деформировании конструкционных сталей, обусловленная изменением магнитной проницаемости стали.
3. Разработан, апробирован и внедрен метод неразрушающего контроля одноосных напряжений в элементах стальных конструкций, основанный на измерении электрического сопротивления стали.

Практическая значимость работы

Использование результатов работы позволяет применять резистивный электроконтактный метод для кратковременного и длительного мониторинга напряжений в стальных элементах эксплуатируемых конструкций зданий и сооружений.

Результаты работы внедрены в ведущих организациях Санкт-Петербурга, специализирующихся на техническом обследовании и экспертизе промышленной безопасности зданий и сооружений: ООО «Высокие экспертные строительные технологии», ЗАО «НПО Ленкор», ПНИПКУ «Венчур».

Результаты исследования использованы при совершенствовании и разработке модификаций прибора СИТОН-ТЕСТ в ООО «Полюс-Тест» (Санкт-Петербург).

Степень достоверности результатов исследований

Достоверность результатов исследований подтверждается:

- проверкой теоретически установленной зависимости экспериментальным путем и метрологическим анализом результатов;
- применением оборудования, приборов и инструментов, прошедших метрологическую поверку и калибровку;
- использованием апробированных методов, методик и способов контроля, достоверностью исходных, расчетных и экспериментальных данных;
- использованием фундаментальных и общепринятых в физике и механике твердого тела положений, теорий, гипотез и допущений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Линейная связь между электрическим сопротивлением (R), измеряемым на переменном токе, и одноосными механическими напряжениями растяжения – сжатия (σ) при деформировании конструкционных сталей.
2. Аномально высокая чувствительность электрического сопротивления при изменении механических напряжений, характеризующаяся коэффициентом $\eta = \Delta R/R$, достигающим $2 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{-1}$, и обусловленная изменением магнитной проницаемости стали.
3. Применимость резистивного электроконтактного метода для мониторинга напряженно-деформированного состояния элементов эксплуатируемых стальных конструкций перекрытий.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 6 научно-практических конференциях, в том числе в ГОУ СПбГАСУ, ГОУ СПбВИТУ и ГОУ СПбГПУ.

Публикации. Основные положения диссертационной работы изложены в опубликованных в открытой печати 7 трудах. Из них 3 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, основных выводов, списка используемой литературы и 2 приложений. Объем работы составляет 115 страниц машинописного текста, 49 рисунков, 9 таблиц и 2 приложения. Список литературы состоит из 75 наименований, из них 66 на русском языке.

Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, отмечена научная новизна, практическая ценность и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена современной ситуации в области исследования.

Описаны основные параметры, характеризующие напряженно-деформированное состояние стальных конструкций, приведена классификация механических напряжений по их видам. Кратко рассмотрены стадии работы стальных элементов под нагрузкой и современные представления о процессе разрушения. Указаны ученые, труды которых внесли основополагающий вклад в развитие данной отрасли науки.

Во второй части главы проанализированы основные достижения в области неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния металлов, в том числе стали, применимые к исследованию эксплуатируемых стальных конструкций.

Наибольший вклад в развитие методов неразрушающего контроля внесли советские ученые Р.И. Янус, Л.Г. Меркулов, С.Т.Назаров, С.В.Румынцев, М.Н.Михеев, С.Я. Соколов и многие другие.

Основным широко применяемым методом контроля напряженно-деформированного состояния конструкций является тензометрия с помощью тензорезистивных датчиков. Данный метод имеет ряд недостатков, таких как трудоем-

кость, выборочность контроля и других.

Рассмотрены основные применяемые методы неразрушающего контроля: механические (тензометрические), магнитные, акустические, радиационные, а также метод упругих колебаний. Описаны основные преимущества методов, а также их недостатки. Проанализированы основополагающие зависимости, используемые для контроля и измерения напряжений различными неразрушающими методами.

Так при использовании рентгеновской дифрактометрии в работах С.А.Иванова, И. Крауса и др. применяется уравнение дифракции (уравнение Вульфа-Брега):

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

В результате исследований В.Е.Гордиенко по применению магнитоферрозондового метода для измерения механических напряжений выявлена зависимость напряженности магнитного поля рассеяния H_p от действующих в стали напряжений вида

$$\frac{H_p}{H_{po}} = \left(a + c \left[\frac{\sigma}{\sigma_m} \right] + e \left[\frac{\sigma}{\sigma_m} \right]^2 \right) / \left(1 + b \left[\frac{\sigma}{\sigma_m} \right] + d \left[\frac{\sigma}{\sigma_m} \right]^2 \right) \quad (2)$$

В работах М.С.Бахарева и М.Г.Баширова описаны зависимости коэрцитивной силы H_c , измеряемой вдоль приложения напряжений, от их величины:

$$H_c = [H_c^0 - A_1(1 - e^{-\beta_1\sigma})] \cdot (1 + m_1\sigma) \quad (3)$$

При применении ультразвуковых методов контроля механических напряжений используются следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \sigma_3 - \sigma_2 &= \left(\frac{C_{sx_3} - C_{s0}}{C_{s0}} - \frac{C_{sx_2} - C_{s0}}{C_{s0}} \right) A, \\ \sigma_3 + \sigma_2 &= \left(\frac{C_{sx_3} - C_{s0}}{C_{s0}} + \frac{C_{sx_2} - C_{s0}}{C_{s0}} \right) B, \end{aligned} \quad (4)$$

где C_{s0} , C_{sx_2} , C_{sx_3} – скорости распространения ультразвуковых поперечных волн. Всестороннее исследование данного эффекта приведено в работах А.А.Самокрутова и В.Т.Боброва.

Большой вклад в развитие и исследование метода магнитной памяти металла внес А.А.Дубов вместе с коллегами. В работах В.Л. Венгриновича, А.М.Народицкого и др. предлагается использовать эффект Баркгаузена для контроля механических напряжений.

На основе анализа источников выявлены причины, по которым вышеперечисленные методы не применяются для контроля напряжений в стальных строи-

тельных конструкциях, либо их применение сопровождается рядом ограничений.

В завершении главы описан исследуемый в работе резистивный электроконтактный метод неразрушающего контроля, который разработан для оценки остаточных механических напряжений сохраняющихся в металлических изделиях после их изготовления. Метод не применялся для контроля эксплуатационных механических напряжений, вызываемых внешними воздействиями. основополагающие исследования данного метода произведены в конце XX века С.Ю.Ивановым, Д.В.Васильковым и В.Э.Хитриком. Исследованием метода в последние несколько лет, а также разработкой аппаратуры для его применения занимается С.Д. Васильков.

Метод основан на измерении электрического сопротивления на участке поверхностного слоя металла при подаче к нему переменного тока. Если рассмотреть участок плоского проводника с протекающим по нему током I от какого-либо внешнего устройства, то сопротивление $R_{ак}$ такого проводника при постоянном токе выражается формулой:

$$R_{ак} = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{b \cdot h}, \quad (5)$$

где: ρ - удельное электрическое сопротивление материала; l - длина участка, по которому проходит ток; $S = b \cdot h$ - площадь поперечного сечения проводника.

Как известно, при переменном токе к активной составляющей сопротивления R добавляется реактивная часть, состоящая из индуктивной и емкостной составляющей. Учитывая, что при исследованиях резистивным электроконтактным методом измерения проводятся при постоянной частоте тока и база между электродами неизменна, примем как допущение, что реактивная составляющая сопротивления постоянна, то есть не изменяется при изменении механических напряжений.

Далее по тексту общее сопротивление участка проводника на переменном токе, измеряемое в ходе исследований, будет обозначаться R .

Отмечены факторы, указывающие на перспективность применения данного метода для контроля эксплуатационных механических напряжений в стальных конструкциях, среди которых: портативность, быстрота и низкая трудоемкость измерений, относительно низкая стоимость оборудования и другие.

Во второй главе изложены теоретические основы применения резистивного электроконтактного метода для контроля эксплуатационных механических напряжений в стальных конструкциях.

Изменение электрического сопротивления при деформировании материала согласно зависимости (5) может быть обусловлено тремя эффектами.

1. Изменением удельного сопротивления материала (ρ) при изменении его напряженного состояния. Данный эффект называется пьезорезистивным и используется в различных датчиках высоких давлений. Одним из видов датчиков, работающих за счет пьезорезистивного эффекта, являются манганиновые датчики давления, коэффициент эластосопротивления которых достигает значений $\pi = \Delta\rho/\rho = 2.5 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}$. Влияние данного эффекта в обычных металлических проводниках, в том числе стальных, настолько мало, что им обычно пренебрегают.

Таблица 1. Параметры проводниковых материалов, применяемых в тензометрии, и стали

Материал	Коэффициент тензочувствительности, $(\Delta R/R)/\varepsilon$	Удельное электрическое сопротивление, мкОм*м	Температурный коэффициент сопротивления $10^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
Константан	2,0	0,44-0,52	0,05
Нихром	2,1-2,3	1,0-1,1	0,1
Манганин	2,0	0,40-0,48	0,002-0,01
Сталь	не изучен	0,10-0,40	1,0-4,0

2. Изменением длины и сечения проводника (l) при его деформировании. Данный эффект используется в тензорезисторах. Датчики, основанные на данном эффекте, имеют коэффициент тензочувствительности равный примерно 2 (табл. 1). Это означает, что при напряжениях соответствующих пределу упругости, например в стали С 235, относительная деформация (ε) составит около 0,1 %, а изменение сопротивления около 0,2% от абсолютного значения.

3. Известно, что при подаче к поверхности проводника переменного тока высокой частоты имеет место скин-эффект, при котором токи высокой частоты сосредотачиваются у той поверхности проводника, которая является ближайшей к источникам поля, вызывающим появление токов.

Глубина проникновения тока h в проводнике определяется выражением:

$$h = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \gamma}}, \quad (6)$$

где f – частота тока, Гц; μ – абсолютная магнитная проницаемость материала, Гн/м; γ – удельная электропроводность материала, См/м.

Магнитная проницаемость материала является переменной величиной и, в

том числе, зависит от напряженного состояния. На данном явлении основан ряд магнитных методов неразрушающего контроля напряжений, в частности в работах М.С.Бахарева имеется зависимость:

$$\mu = \frac{\mu_n}{1 - \mu_n \lambda_0 \sigma / \pi}, \quad (7)$$

где μ_n - начальная относительная проницаемость материала; λ_0 - константа магнитострикции ферромагнетика; σ - одноосные напряжения растяжения – сжатия (при растяжении имеют положительную величину).

С использованием вышеуказанных выражений (5-7), автором получена зависимость следующего вида:

$$R = \rho \frac{l}{b} \sqrt{\frac{\pi \cdot f \cdot \mu_n}{(1 - \mu_n \lambda_0 \sigma / \pi) \rho}}. \quad (8)$$

С учетом магнитной постоянной ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м), константы магнитострикции стали ($\lambda_0 = 5 \cdot 10^{-6}$ МПа⁻¹), того, что удельная электрическая проводимость $\gamma = 1/\rho$ (для стали $\rho = 140$ мОм*мкм), приняв $\mu_n = 200$, пренебрегая незначительным изменением ρ и считая частоту тока постоянной, получим зависимость, представленную на рис.1.

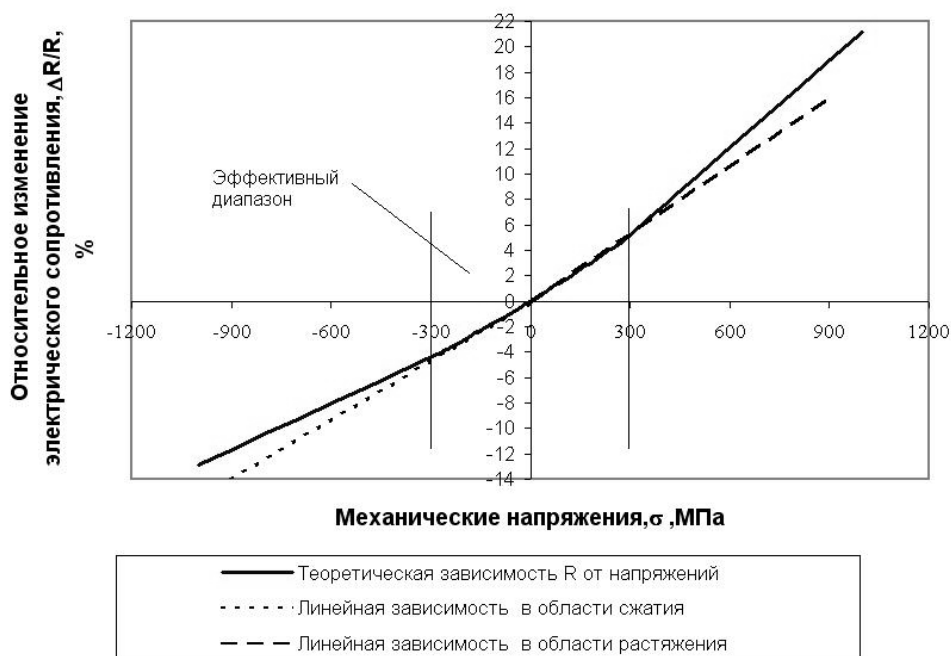


Рис. 1 Теоретическая зависимость электрического сопротивления от напряжений растяжения-сжатия

Отмечено, что по результатам исследований М.Г.Баширова, после перехода стали в пластическую зону работы величина магнитной проницаемости уменьшается и, соответственно, зависимость ($R-\sigma$) должна измениться на обратную.

При упругой работе конструкционных сталей в строительных конструкциях механические напряжения обычно не превышают значений ± 300 МПа. Поэтому для данного диапазона значений можно пренебречь нелинейностью зависимости в зонах от 0 до σ_T при растяжении и от 0 до σ_T при сжатии с погрешностью до 2,0% от величины напряжений. Однако надо учитывать, что чувствительность зависимости при растягивающих и сжимающих напряжениях не одинакова.

В результате теоретического исследования, проведенного в работе выявлен эффект изменения электрического сопротивления при изменении напряженного состояния за счет изменения магнитной проницаемости. Назовем его **магниторезистивный тензоэффект**, а коэффициент чувствительности, характеризующий зависимость относительного сопротивления $\Delta R/R_0$ от механических напряжений σ , **коэффициент чувствительности магниторезистивного тензоэффекта** и обозначим η .

Для рассматриваемого примера (рис.1) в диапазоне до ± 300 МПа, $\eta_p = 1,7 \cdot 10^{-4}$ МПа⁻¹ при растяжении и $\eta_c = 1,5 \cdot 10^{-4}$ МПа⁻¹ при сжатии.

Таким образом, выявленная автором зависимость изменения электрического сопротивления на переменном токе от механических напряжений, обусловленная изменением магнитной проницаемости стали, имеет чувствительность приблизительно в 20 раз превышающую чувствительность проводниковых тензорезисторов. Этот фактор доказывает перспективность исследования данной зависимости ($R-\sigma$) для применения в ходе мониторинга механических напряжений в строительных конструкциях при их упругой работе.

В третьей главе рассмотрены используемые в ходе экспериментальных исследований модели и оборудование, а также приведена информация о прочих условиях эксперимента. Эксперимент проводился для подтверждения теоретической зависимости электрического сопротивления от механических напряжений, возникающих в стальных конструкциях при их эксплуатации. Для выполнения поставленных задач проведено более 200 экспериментов.

Исследования зависимости ($R-\sigma$) выполнялись методом физического моделирования на 18 образцах - моделях, отобранных из прокатных стальных профи-

лей, и на крупномасштабной балке двутаврового сечения. В ходе исследования зависимости сопротивления от одноосных напряжений растяжения сжатия использовались конструкционные стали ВСтЗсп, ВСтЗпс и 09Г2С, выбранные как наиболее часто используемые в строительных конструкциях (табл.2). Для выявления влияния на зависимость вида металла помимо вышеуказанных материалов в исследованиях использованы образцы из сталей 60С2 и 08Х18Н10Т, а также образцы из меди марки ММ.

Таблица 2. Марки сталей, применяемых в строительстве

Наименование строительных сталей	Группа конструкций по СНиП II-23-81*	Марка стали по ГОСТ 27772-88
С235	3	Ст3 кп
С245	2,3	Ст3 пс, Ст3 сп
С255	1,2,3	Ст3 пс, Ст3 сп
С275	2,3	Ст3 пс
С285	1,2,3	Ст3 пс, Ст3 сп
С345	1,2,3	09Г2С, 12Г2С
С375	1,2,3	09Г2С, 12Г2С
С390	1,2,3	14Г2АФ, 10ХСНД
С440	1,2,3	16Г2АФ
С590	2,3	12Г2СМФ

Параметры применяемого в ходе измерений оборудования приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры применяемого в экспериментах оборудования

№	Наименование	Применение	Зав.№	Диап. изм.	Погрешность измер.
1	Разрывная машина Р-20	Растяжение моделей	805	200 кН	0,4кН
2	Динамометр ДР-2	измерение силы, изгибающей балку	3670	20 кН	0,5кН
3	Измеритель температуры воздуха ТЦ-1У	Измерение температуры воздуха	0564	-55 +125 °С	0,1 °С
4	Индикатор ИЧЦ(3)-50	Измерение прогиба моделей при изгибе	05080 04	50 мм	0,01мм
5	Микрометр МК-25	Измерение толщины моделей	02056	25 мм	0,01 мм
6	Штангенциркуль ШЦ-III-400/0,05	Измерение длины моделей	174401	400 мм	0,05 мм
7	Оптический дальномер Leica Disto A5	Измерение длины двутавровой балки	10603 52380	200м	1 мм

Для создания растягивающих напряжений в исследуемых моделях применялась разрывная машина Р-20. Механические напряжения определялись по формуле

$$\sigma = F/A=P/(a*b), \quad (9)$$

где σ - максимальные механические напряжения, возникающие в поверхностном слое сечения модели, МПа, F – растягивающее усилие, создаваемое разрывной машиной, кН, a – ширина сечения модели, мм, b - толщина сечения модели, мм.

При этом расчетная погрешность создаваемых эксплуатационных механических напряжений не превышает

$$\gamma_{\sigma} = \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} = \frac{0,4}{150} + \frac{0,05}{30} + \frac{0,01}{10} = 0,7\%$$

Для создания в поверхностном слое моделей растягивающих и сжимающих напряжений производился их поперечный изгиб, для чего использовался стенд, изготовленный в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский институт машиностроения». Расчетная схема модели – консольная балка. Напряжения, возникающие в поверхностном слое моделей, определялись по зависимости

$$\sigma = 3fEI / Wl = 3fEb / 2l, \quad (10)$$

где f – прогиб свободного конца модели, мм, E -модуль упругости стали, МПа, l – длина балки, мм.

Погрешность создаваемых механических напряжений не превышает

$$\gamma_{\sigma} = \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta E}{E} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta l}{l} = \frac{0,01}{5} + \frac{2000}{200000} + \frac{0,01}{10} + \frac{0,1}{200} = 1,35\%$$

Для создания в поверхностных слоях балки переменного сечения (балки равного сопротивления) механических напряжений растяжения и сжатия к ее свободному концу при консольном опирании прикладывалась изгибающая сила с помощью грузов известной массы. Напряжения, возникающие в поверхностном слое балки, определялись по зависимости

$$\sigma_{\text{макс}} = N \cdot l / W = 6N \cdot l / ab^2, \quad (11)$$

где N - усилие, прилагаемое к концу консоли, навешиваемыми грузами, кН.

При этом расчетная погрешность величины создаваемых механических напряжений не превышает

$$\gamma_{\sigma} = \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta a}{a} + 2 \frac{\Delta b}{b} = \frac{0,1}{1000} + \frac{0,1}{400} + \frac{0,1}{40} + 2 \frac{0,01}{10} = 0,48\%$$

Для создания напряжений в сечениях крупномасштабной модели использо-

вался стенд, сконструированный автором для проведения экспериментов в лаборатории кафедры ТОЭС ГОУ «СПбГПУ». Данный стенд (рис.2) позволяет упруго деформировать крупномасштабную стальную балку за счет приложения к ней ступенчатой нагрузки при поперечном изгибе, а также производить ее пошаговую разгрузку. Максимальные напряжения, возникающие в поверхностном слое верхней и нижней полок двутавра в середине пролета, определялись по зависимости

$$\sigma = P \cdot l / 4W, \quad (12)$$

где P - сила, прилагаемая к балке в середине пролета, кН, W - момент сопротивления двутавровой балки, см³.

При этом расчетная погрешность величины создаваемых механических напряжений не превышает

$$\gamma_{\sigma} = \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta W}{W} = \frac{0,2}{20} + \frac{1,0}{3100} + 0,006 = 1,6\%$$

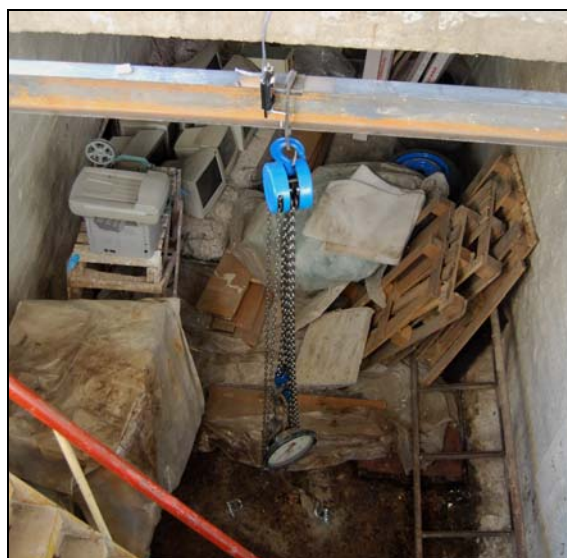
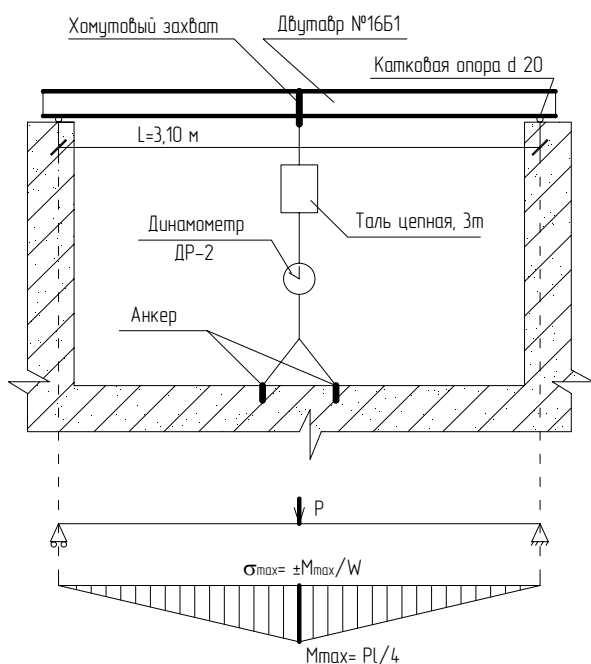


Рис. 2 Схема и внешний вид экспериментального стенда для исследований крупномасштабной модели

Для измерения удельного электросопротивления использован прибор СИТОН-ТЕСТ, разработанный в ООО «Полюс-Тест» коллективом разработчиков, в том числе, С.Д.Васильковым. Датчик прибора выполнен четырехзондовым с продольным расположением электродов. Принципиальная схема прибора представлена на рис.3, а внешний вид на рис. 4,5.

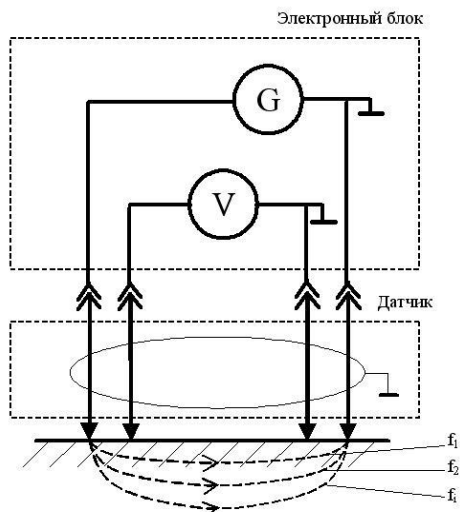


Рис. 3 Схема измерительной аппаратуры:

G – генератор, формирующий задающий сигнал переменной частоты; V – вольтметр, определяющий сигнал-отклик электрического напряжения; f_1 – частота сигнала, определяющая глубину залегания тока.

Аппаратная часть прибора состоит из 16-разрядных АЦП и генератора, подающего к исследуемому объекту переменный ток с частотами в диапазоне 16 ...8000 кГц.

Погрешность измерения силы подаваемого тока определяется как

$$\gamma_I = \frac{\Delta I}{I} = \frac{1}{500} = 0,2\%.$$

Погрешность измерения напряжения составляет

$$\gamma_U = \frac{\Delta U}{U} = \frac{1}{300} = 0,3\%.$$

Таким образом, погрешность измерения сопротивления не превышает 0,5%.



Рис. 4 Внешний вид аппаратуры СИТОН-ТЕСТ (электронный блок, датчик со струбиной)

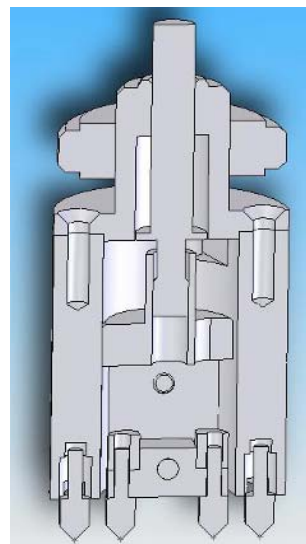


Рис. 5 Чертеж четырехзондового датчика (продольный разрез)

Четырехзондовый датчик прибора (рис.5) имеет расстояние между подающими электродами 26 мм и 13 мм между измеряющими. Electrodes выполнены из бериллиевой бронзы. Площадь касания каждого электрода датчика с поверхно-

стью исследуемого объекта составляет $0,5 \text{ мм}^2$. Прижим датчика к объекту исследования осуществляется струбциной (рис.4).

Оценена погрешность измерений, вызванная смещением электродов датчика и изменением площади контакта с исследуемым объектом. Исходя из площади контактов датчика и прочности их материала, предельная сжимающая нагрузка, которую можно прилагать к подающим электродам составляет приблизительно $1,0 \text{ кН}$. Усилия, создаваемые струбциной, не превышают $0,4 \text{ кН}$. Таким образом, при прижатии электродов площадь соприкосновения может изменяться только вследствие «плохого» контакта с поверхностью, который можно качественно отслеживать по силе тока.

Погрешность измерения может быть вызвана изменением расстояния между электродами датчика и составляет

$$\Delta l / l = 0,1 / 13 = 0,8\%.$$

Проанализировано влияние краевого эффекта (изменение электрического сопротивления при различном расположении электродов датчика относительно края исследуемого объекта и его толщины), известное по литературным источникам. Учитывая, что по результатам исследований, представленных в пятой главе, место расположения датчика в ходе контроля напряжений должно оставаться неизменным, и то, что основным измеряемым параметром является изменение сопротивления, а не его абсолютная величина, влияние краевого эффекта не исследовано. Однако в ходе экспериментов использованы рекомендации по снижению влияния краевого эффекта, а именно: установка датчика перпендикулярно к краю объекта и с максимально возможным удалением крайнего электрода от края объекта.

В четвертой главе приведены результаты экспериментов по измерению электрического сопротивления без изменения напряженно-деформированного состояния исследуемых моделей. Описаны результаты исследований по определению факторов, влияющих на погрешность измерений, и величины погрешности.

Выявлено, что при различных частотах тока и соответствующих им различных глубинах исследуемого слоя наименьшим коэффициентом вариации характеризуются измерения на частоте 16 кГц (расчетной глубине 107 мкм от поверхности образца). Данная глубина является наиболее рациональной по ряду критериев для проведения измерений и мониторинга на реальных объектах и использована в

ходе дальнейших экспериментов.

Для сопоставления погрешностей измерения при различных условиях используется коэффициент вариации результатов измерения, определяемый как

$$V = \sigma / \bar{X}, \quad (12)$$

где σ - среднее квадратичное отклонение в выборке, \bar{X} - математическое ожидание значений в выборке.

Измерения на данной глубине, производимые без отрыва электродов датчика и изменения прочих условий характеризуется коэффициентом вариации $V = 0,1-0,2\%$.

Выявлено, что при отрыве ножек датчика (потере контакта) с последующим присоединением в ту же точку, коэффициент вариации (рис.6) увеличивается незначительно ($V = 0,20 \div 0,25 \%$). Для минимизации разброса значений при каждом измерении расположение датчика на образце должно оставаться неизменным. Это обеспечивается нанесением на поверхность образца меток под электроды датчика, которые могут быть выполнены сверлением или кернением.

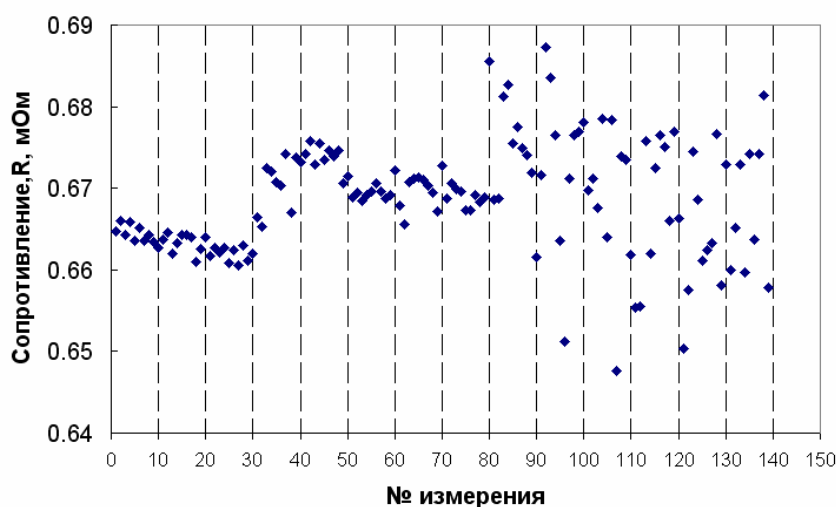


Рис. 6 Влияние погрешность измерения перемещения датчика:
0-30 без отрыва датчика;
31-50 с отрывом и установкой без поворота по меткам;
51-80 с отрывом и установкой с поворотом на 180° по меткам;
81-110 с отрывом и установкой вне меток
111-140 с перемещением по поверхности на длине 150 мм

При перемещении датчика по поверхности образца, как незначительно (1-5 мм), так и на большую величину коэффициент вариации значений ЭУС увеличивается в несколько раз и достигает $V=2-5\%$ (рис.6). Из этого следует, что при проведении мониторинга измерения необходимо проводить в одной (или нескольких) заранее выбранных точках, без изменения их расположения на поверхности объекта. Выбор исследуемых точек может быть произведен по результатам расчета аналитической или цифровой (компьютерной) модели конструкции, либо применения других неразрушающих методов контроля.

Произведены экспериментальные исследования влияния на электрическое сопротивление и погрешность измерения методов обработки поверхности моделей и термообработки. В качестве используемых видов механической обработки исследовано влияние зачистки с помощью корщетки ($Ra=2,0-3,0$ мкм) и шлифования ($Ra=0,3-0,5$ мкм). Обработка шлифованием приводит к уменьшению разброса значений сопротивления. Однако величина коэффициента вариации сохраняет высокие значения и достигает $V=2,4\%$. По результатам измерений после химического травления стали на глубину до 500 мкм выявлено, что величина коэффициента вариации уменьшилась до 0,8%. Высокотемпературный отжиг при температуре 900 °С не привел к существенному снижению коэффициента вариации, значения которого составили $V=1,5-4,0\%$.

Экспериментально исследовано влияние температуры на электрическое сопротивление. Измерения выполнялись при температурах от -20 до 40 °С. Полученная экспериментальная зависимость сопротивления от температуры линейная. Экспериментально установленный температурный коэффициент сопротивления для стали марки СтЗсп составил $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, при табличном значении данного коэффициента для сталей $1,0 - 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Исходя из величины коэффициента чувствительности магниторезистивного тензоэффекта, изменение температуры на 1 °С приведет к погрешности измерения напряжений в 8-9 МПа. Для уменьшения погрешности измерений при практическом использовании метода необходимо вводить поправку. Поправка вводится за счет температурного коэффициента сопротивления и измерения температуры с точностью 0,5 °С, что сопоставимо с абсолютной погрешностью измерения напряжений ± 5 МПа.

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований зависимости сопротивления от одноосных напряжений растяжения - сжатия в ходе малоциклового упругого деформирования исследуемых моделей, а также при деформациях за пределом упругости.

Экспериментально показано, что зависимость от растягивающих напряжений, создаваемых как чистым растяжением, так и поперечным изгибом моделей линейная. То же зафиксировано и при сжимающих напряжениях. Коэффициент корреляции между сопротивлением и механическими напряжениями по результатам статистической обработки данных имеет значение для всех экспериментов в диапазоне 0,950-0,999.

Регрессионная зависимость электрического сопротивления от механических напряжений, определенная методом наименьших квадратов, имеет вид:

$$\eta = K_t \cdot \Delta t + \frac{K_\sigma \Delta \sigma}{R_0}, \quad (13)$$

где K_t – температурный коэффициент сопротивления (экспериментальное значение $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$);

Δt – изменение температуры, $^\circ\text{C}$;

K_σ - экспериментальный коэффициент чувствительности, зависящий от марки стали и знака напряжений ($0,1 \pm 0,02 \text{ мкОм/МПа}$);

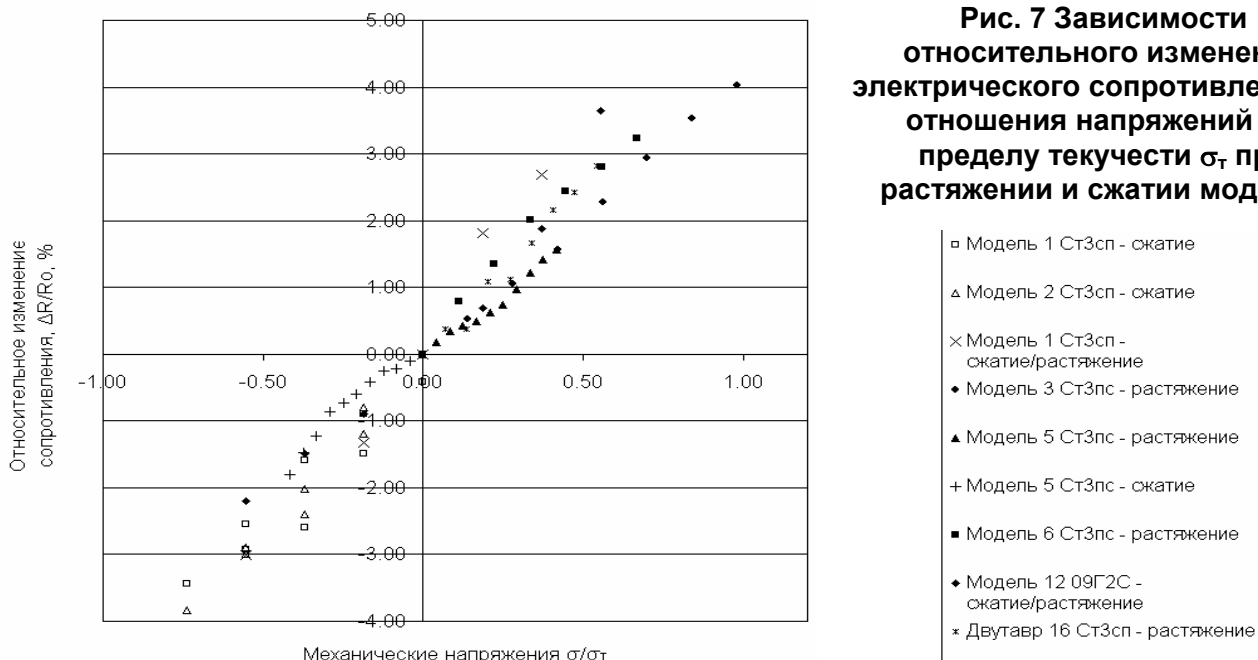
$\Delta \sigma$ - абсолютное изменение механических напряжений, МПа;

R_0 – начальное электрическое сопротивление без дополнительных механических напряжений, мкОм.

Для определения изменения величины напряжений зависимость (13) преобразуется в следующий вид:

$$\Delta \sigma = \frac{(\eta - K_t \cdot \Delta t) R_0}{K_\sigma}. \quad (14)$$

Экспериментальные зависимости, полученные при упругом деформировании растяжения и сжатия различных исследуемых моделей представлена на рис.7.



По опытным зависимостям, представленным на рис.7, видно, что при сжимающих и растягивающих напряжениях сопротивление изменяется линейно для всех исследованных моделей. Однако коэффициент чувствительности K_σ для раз-

ных моделей изменяется в диапазоне $\pm 10\%$.

Экспериментально установлено, что на немагнитных материалах зависимость отсутствует (рис.8). Это подтверждает что, основным, влияющим на изменение электрического сопротивления фактором является именно магнитная проницаемость материала.

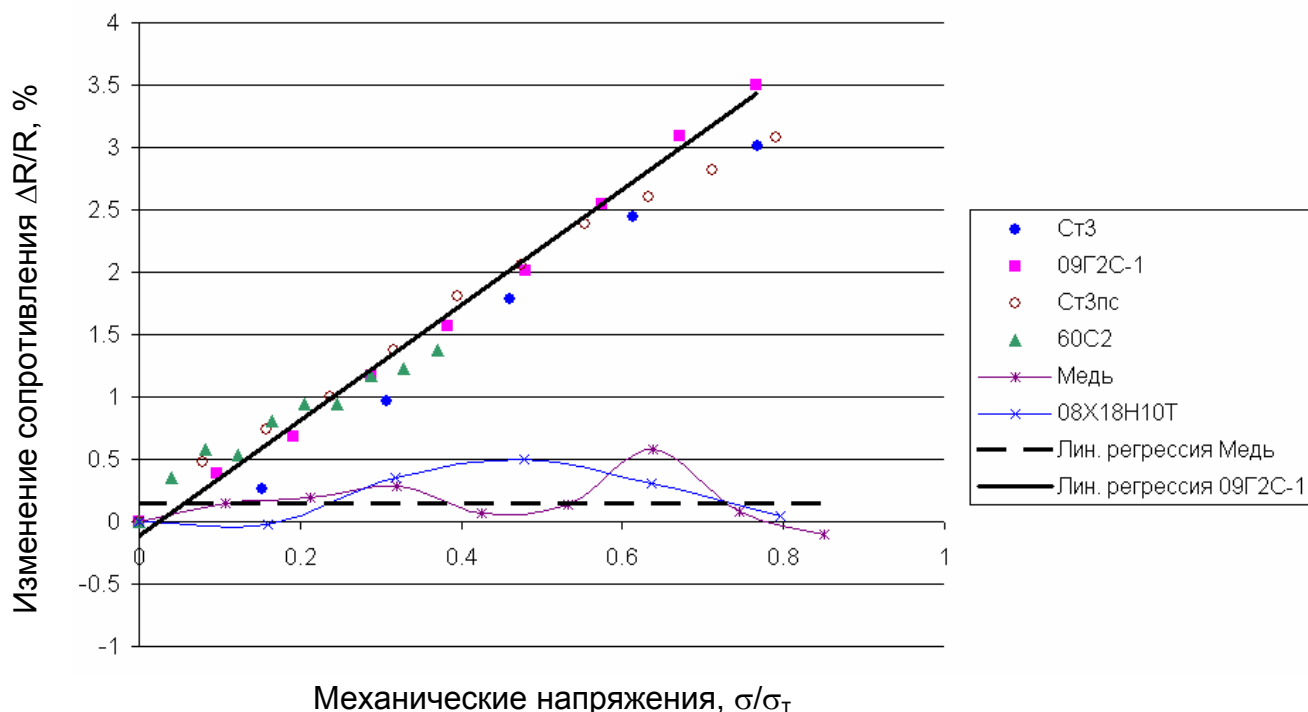


Рис. 8 Влияние вида металла на зависимость сопротивления от механических напряжений

Выявлено, что при последовательном нагружении и разгрузке материала отмечается гистерезис зависимости. Гистерезисный вид зависимости обусловлен релаксацией напряжений после снятия нагрузки. Петля гистерезиса замкнута. При циклической загрузке и разгрузке зависимость в каждом цикле повторяет предыдущий (рис.9).

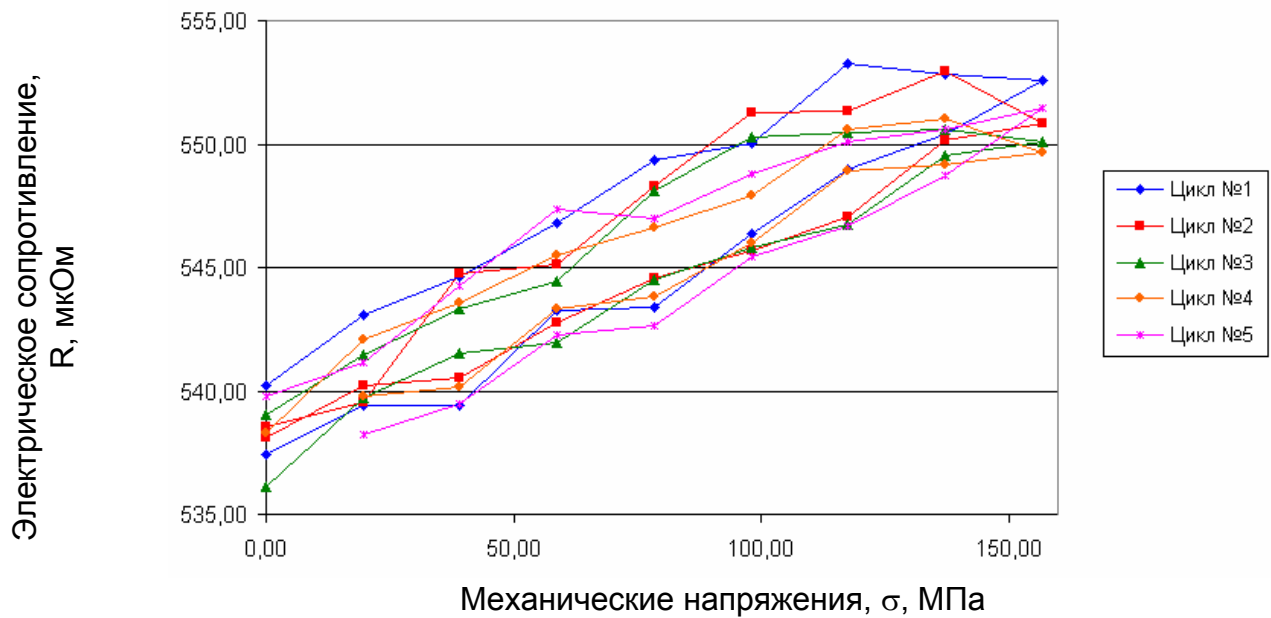


Рис. 9 Зависимость сопротивления от растягивающих напряжений в ходе 5 циклов деформирования крупномасштабной модели двутавровой балки

Экспериментально установлено, что при переходе металла в зону пластических деформаций, обусловленных как достижением предела текучести всем сечением элемента (рис.10), так и влиянием остаточных напряжений в поверхностном слое (рис.11), зависимость изменяется на обратную. Данный эффект подтверждается свойством магнитной проницаемости стали уменьшаться при растяжении за пределом упругости.

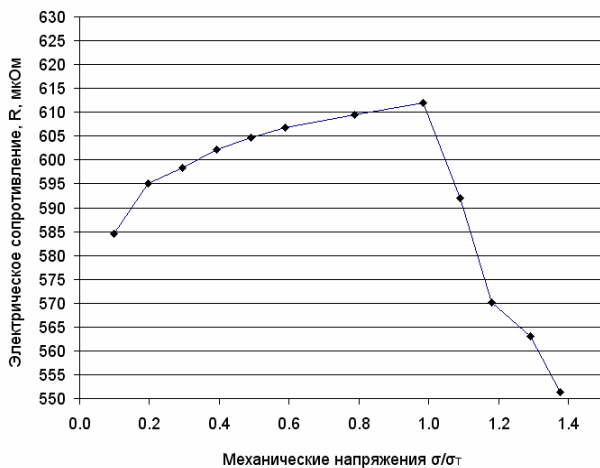


Рис. 10 Зависимость сопротивления от растягивающих напряжений в упругой и пластической зонах работы стали

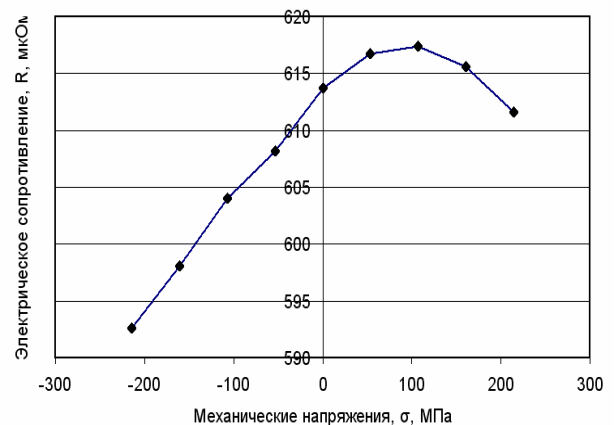


Рис. 11 Зависимость сопротивления от напряжений при разгрузке сжатия и растяжении на шлифованной поверхности

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния на вид зависимости и коэффициент чувствительности факторов, имеющих место при прак-

тическом применении метода в натуральных условиях. Среди таких факторов рассмотрены: температура (от - 20 до 40 °С), марка стали, толщина исследуемого элемента (от 4 до 10 мм), сила прижатия электродов датчика к поверхности исследуемого объекта, вид и степень обработки поверхности, влияние краевого эффекта.

Показано, что изменение температуры стали в диапазоне от -20 до 40 °С не влияет на коэффициент чувствительности K_{σ} .

Экспериментально выявлено, что обработка поверхности шлифованием при воздействии растягивающих напряжений изменяет вид зависимости (рис.11). Данный эффект обусловлен формированием при шлифовке остаточных растягивающих напряжений, которые суммируясь с прилагаемыми напряжениями приводят к пластической деформации материала в поверхностном слое.

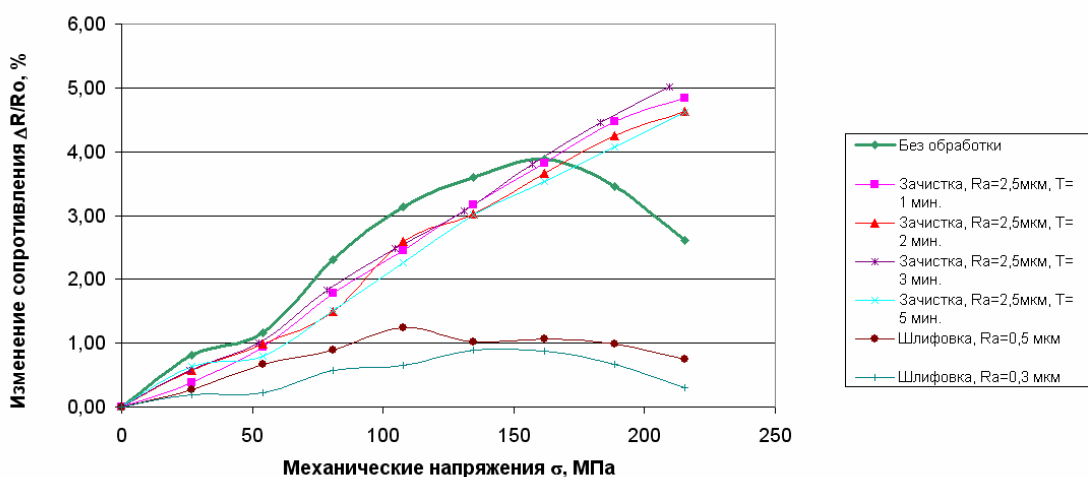


Рис. 12 Влияние вида обработки поверхности на зависимость сопротивления от напряжений

В шестой главе проанализированы результаты проведенных исследований, с точки зрения применимости резистивного электроконтактного метода для мониторинга напряженно-деформированного состояния эксплуатируемых стальных конструкций зданий и сооружений.

На основе результатов теоретико-экспериментальных исследований предложена технология мониторинга эксплуатационных механических напряжений в конструкциях с помощью резистивного электроконтактного метода.

Технология заключается в измерении абсолютного значения электрического сопротивления на предварительно выбранном исследуемом участке конструкции до приложения/снятия нагрузок, выполнении градуировки по отобранным образ-

цам при их испытании на растяжение и повторном измерении значения сопротивления в интересующий момент времени после изменения величины нагрузки. Приращение напряжений определяется по выявленной зависимости (14) с учетом температурного коэффициента K_t и уточненного коэффициента чувствительности K_σ .

Основные результаты диссертационной работы

1. Выявлена теоретическая зависимость электрического сопротивления на переменном токе в поверхностном слое стали от одноосных механических напряжений растяжения – сжатия в упругой стадии работы материала. Выявленная зависимость характеризуется аномально высокой чувствительностью.
2. Экспериментально подтверждена выявленная теоретически линейная зависимость электрического сопротивления от одноосных механических напряжений растяжения – сжатия в упругой стадии работы стали.
3. Получена аналитическая зависимость электрического сопротивления в конструкционных сталях от одноосных напряжений растяжения – сжатия:

$$\Delta\sigma = \frac{(\eta - K_t \cdot \Delta t)R_0}{K_\sigma}$$

4. Выполнена оценка влияния на установленную зависимость различных факторов, среди которых: температура материала, марка стали, вид обработки поверхности, толщина исследуемого элемента, сила прижатия датчика, стадия работы металла конструкции (упругая/пластическая), цикличность приложения нагрузки.
5. Предложена технология мониторинга напряженно-деформированного состояния элементов эксплуатируемых стальных конструкций, основанная на применении резистивного электроконтактного метода, и сформулированы рекомендации по ее практическому использованию.
6. Результаты исследований и предложенная технология внедрены в ведущих организациях Санкт-Петербурга, специализирующихся на техническом обследовании и экспертизе промышленной безопасности зданий и сооружений: ООО «Высокие экспертные строительные технологии», ЗАО «НПО Ленкор», ПНИПКУ «Венчур».

Основные результаты диссертационной работы опубликовано в следующих трудах.

Статьи в журналах, рекомендуемых Перечнем ВАК

1. Улыбин А. В. Использование резистивного электроконтактного метода для контроля напряженно-деформированного состояния элементов стальных конструкций / А. В. Улыбин, С. Д. Васильков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – №6. – С. 155-160.

2. Улыбин А. В. Методы оценки напряженно-деформированного состояния стальных конструкций мостов // Транспортное строительство. – 2009. – №10. – С. 22-25.

3. Улыбин А. В. Оценка напряженно-деформированного состояния стальных балок перекрытий // Гидротехническое строительство. – 2009. – №12. – С. 25-27.

Публикации в других изданиях

4. Васильков С. Д. Оценка напряженно-деформированного состояния и ресурса стальных балок с помощью резистивного электроконтактного метода / С. Д. Васильков, А. В. Улыбин // Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций : матер. XIII науч.-метод. конф. ВИТУ. – СПб.: Изд-во ВИТУ, 2009. – С 39-43.

5. Улыбин А. В. Контроль напряженно-деформированного состояния элементов стальных конструкций с помощью резистивного электроконтактного метода // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ : матер. междунар. науч.-практ. конф. Ч.1. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 182-183.

6. Улыбин А. В. Особенности применения резистивного электроконтактного метода для контроля напряженно-деформированного состояния стальных конструкций / А. В. Улыбин, Г. А. Кукушкина // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – №3. – С. 32-34.

7. Улыбин А. В. Применение резистивного электроконтактного метода для мониторинга состояния стальных конструкций // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – №7. – С. 21-24.