# КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Т. Ф. ГОРБАЧЕВА

На правах рукописи

### НИКИТЕНКО МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ

# ОЦЕНКА НАГРУЖЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ СЕКЦИИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ КРЕПИ

05.05.06 – Горные машины

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент КРЕЧЕТОВ А. А.

**КЕМЕРОВО 2015** 

ВВЕДЕНИЕ
ГЛАВА 1. Методы и средства контроля нагруженности секций
механизированных крепей 11
1.1 Анализ подходов к экспериментальной оценке нагруженности секции
механизированной крепи12
1.2 Тензометрический контроль элементов металлоконструкций секции
механизированной крепи19
1.3 Современные подходы к построению мобильных первичных
измерительных преобразователей 27
1.3.1 Съёмные тензометрические преобразователи 29
1.3.2 Тензорезисторы, используемые для построения СТП
1.4 Выводы по главе 1
ГЛАВА 2. Исследования характеристик элементов СТП для оценки
нагруженности секции механизированной крепи 40
2.1. Исследование параметров тензорезистора СТП
2.1.1 Оборудование и методика исследований
2.1.2 Исследование основных характеристик полупроводникового
тензорезистора KSP 46
2.2 Исследование влияния конструкции и геометрических параметров
упругого элемента на чувствительность СТП 60
2.2.1 Влияние геометрических параметров упругого элемента СТП на уровень
деформации в зоне установки тензорезистора
2.2.2 Анализ способов закрепления УЭ на объекте контроля
2.3 Выводы по главе 2
ГЛАВА 3. Разработка методики оценки нагруженности элементов
металлоконструкций секции механизированной крепи 76
3.1 Программа экспериментальных исследований
3.2 Разработка технических и программно-аппаратных средств
экспериментальных исследований78

3.2.1 Лабораторный стенд 78
3.2.2 Разработка макета мобильной тензометрической системы
3.2.3 Порядок работы технических средств
3.3 Методика проведения экспериментальных исследований
3.3.1 Стендовые лабораторные испытания
3.3.2 Заводские испытания 102
3.4 Выводы по главе 3 103
ГЛАВА 4. Результаты экспериментальных исследований характеристик
арочных СТП и оценки нагруженности элементов металлоконструкций
секции механизированной крепи 105
4.1 Исследования характеристик СТП 105
4.2 Лабораторные стендовые исследования элемента металлоконструкции
секции механизированной крепи 115
4.2.1 Экспериментальная оценка деформаций рычага траверсы секции
МКЮ.2У-12/25 при использовании прижимного способа закрепления 115
4.2.2 Оценка стабильности измерений при оценке деформаций рычага
4.2.2 Оценка стабильности измерений при оценке деформаций рычага траверсы секции МКЮ.2У-12/25 при многократной переустановке АСТП
4.2.2 Оценка стабильности измерений при оценке деформаций рычага траверсы секции МКЮ.2У-12/25 при многократной переустановке АСТП и комбинированном способе закрепления
<ul> <li>4.2.2 Оценка стабильности измерений при оценке деформаций рычага траверсы секции МКЮ.2У-12/25 при многократной переустановке АСТП и комбинированном способе закрепления</li></ul>
<ul> <li>4.2.2 Оценка стабильности измерений при оценке деформаций рычага траверсы секции МКЮ.2У-12/25 при многократной переустановке АСТП и комбинированном способе закрепления</li></ul>
<ul> <li>4.2.2 Оценка стабильности измерений при оценке деформаций рычага траверсы секции МКЮ.2У-12/25 при многократной переустановке АСТП и комбинированном способе закрепления</li></ul>
<ul> <li>4.2.2 Оценка стабильности измерений при оценке деформаций рычага траверсы секции МКЮ.2У-12/25 при многократной переустановке АСТП и комбинированном способе закрепления</li></ul>
<ul> <li>4.2.2 Оценка стабильности измерений при оценке деформаций рычага траверсы секции МКЮ.2У-12/25 при многократной переустановке АСТП и комбинированном способе закрепления</li></ul>
<ul> <li>4.2.2 Оценка стабильности измерений при оценке деформаций рычага траверсы секции МКЮ.2У-12/25 при многократной переустановке АСТП и комбинированном способе закрепления</li></ul>
<ul> <li>4.2.2 Оценка стабильности измерений при оценке деформаций рычага траверсы секции МКЮ.2У-12/25 при многократной переустановке АСТП и комбинированном способе закрепления</li></ul>
<ul> <li>4.2.2 Оценка стабильности измерений при оценке деформаций рычага траверсы секции МКЮ.2У-12/25 при многократной переустановке АСТП и комбинированном способе закрепления</li></ul>
<ul> <li>4.2.2 Оценка стабильности измерений при оценке деформаций рычага траверсы секции МКЮ.2У-12/25 при многократной переустановке АСТП и комбинированном способе закрепления</li></ul>

#### введение

#### Актуальность темы

Работоспособность секций механизированных крепей, рабочих органов проходческих и очистных комбайнов, другого горношахтного оборудования в значительной степени зависит от запаса прочности, заложенного при проектировании, качества изготовления, характера и величины эксплуатационных нагрузок, своевременного проведения ремонтных и восстановительных работ.

В настоящее время отсутствуют первичные измерительные преобразователи (ПИП), ориентированные на регистрацию и визуализацию распределения деформаций и напряжений элементов металлоконструкций секции механизированной крепи, для установления фактических нагрузок в процессе эксплуатации. Наличие таких преобразователей позволит повысить эффективность исследования связей и закономерностей с фактическими нагрузками для совершенствования существующих и создания новых секций механизированных крепей и их элементов.

На стадии изготовления исследования влияния воздействия эксплуатационных нагрузок на элементы металлоконструкций секции механизированной крепи проводят, измеряя фактические значения деформаций в отдельных контрольных точках при приемосдаточных прочностных статических заводских испытаниях.

При этом существующая методика тензометрического контроля при проведении заводских испытаний не позволяет оперативно корректировать место измерения деформаций исследуемой поверхности металлоконструкций, что обусловлено невозможностью повторного использования применяемых в качестве ПИП приклеиваемых тензорезисторов.

Одним из решений, позволяющих обеспечить мобильность ПИП, то есть возможность перемещать и переустанавливать его, является использование съёмного тензометрического преобразователя (СТП) с упругим элементом (УЭ). Однако включение УЭ в систему измерения значительно снижает чувствительность преобразователя.

Решение этих задач имеет высокую практическую значимость в связи с тем, что в рамках приказа Минпромторга РФ № 645 от 31.03.2015 года предусмотрено значительное снижение доли импорта горнодобывающих комплексов, оборудования и комплектующих. При этом для реализации утвержденной Правительством РФ в 2012 году Долгосрочной Программы развития угольной промышленности России на период до 2030 года ставятся задачи модернизации и обновления производственных мощностей по добыче и переработке угля с обеспечением мировых стандартов.

Таким образом, совершенствование операции контроля при прочностных статических приемосдаточных испытаниях в рамках технологического процесса изготовления механизированной крепи с целью обеспечения высокого качества является актуальной научной задачей.

#### Степень разработанности

Определение характера и уровня нагрузок на элементы секций механизированных крепей являлось предметом исследований Александрова Б. А., Ардашева К. А., Буялича Г. Д., Глазова Д. Д., Глушихина Ф. П., Ерохина А. И., Каткова Г. А., Клишина В. И., Крохотухина А. И., Кузнецова Г. Н., Кузнецова С. Т., Леконцева Ю. М., Любимова А. Н., Медведева Е. Г., Орлова А. А., Попова В. Л., Садыкова Н. М., Трумбачева В. Ф. и др. В результате исследований, выполненных этими учёными, разработаны методы и средства оценки контактных напряжений и нагрузок на элементы секций механизированных крепей, установлены многие важные закономерности работы крепей и их элементов в различных горнотехнических условиях. Несмотря на это, анализ методов и средств определения технического состояния горношахтного оборудования свидетельствует о том, что вопрос прямой оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи до конца не решен.

**Цель работы** – оценка нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи.

Идея работы – использование съёмных тензометрических преобразователей.

#### Основные задачи исследований:

1. Выявить направления повышения эффективности оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи на основе анализа современных представлений в области оценки состояния ответственных конструкций с использованием тензометрического метода.

2. Обосновать состав и провести экспериментальные исследования параметров СТП для оценки деформаций элементов металлоконструкций секции механизированной крепи.

3. Разработать методику оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи и технические средства для её практической реализации.

4. Произвести оценку нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи в контрольных точках по разработанной методике с использованием СТП в лабораторных и заводских условиях и сопоставить с результатами оценки по заводской методике.

#### Научная новизна исследований:

1. Обоснована конфигурация арочного УЭ СТП для оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи, отличающаяся вогнутым сводом переменного сечения с радиальным сопряжение дуг, позволяющая достичь максимального уровня деформаций в зоне установки тензорезистора, за счет чего обеспечивается повышение чувствительности ПИП.

2. На основе экспериментальных исследований впервые установлены статические характеристики преобразования СТП на основе арочного УЭ с вогнутым сводом и полупроводниковых тензорезисторов типа KSP для оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи.

3. Впервые при оценке нагруженности элементов секции получена зависимость механических напряжений от нагрузки на примере перекрытия МКЮ.2У-07/19 при стендовых внутризаводских испытаниях с использованием СТП на базе разработанного арочного УЭ.

#### Практическая значимость результатов работы:

- Метод экспресс-анализа с использованием разработанных арочных СТП позволяет в произвольном месте плоской поверхности элемента металлоконструкции секции механизированной крепи проводить оценку деформаций по оси, совпадающей с осью СТП на исследуемой поверхности с относительной погрешностью не более 12 %. Метод может быть использован для оперативного определения зон наибольших деформаций металлоконструкций элементов горношахтного оборудования или предварительной визуализации деформированного состояния объекта контроля перед установкой монтажных винтовых стоек СТП.

- Программно-аппаратный комплекс макета мобильной тензометрической системы, образцы арочных СТП, методика доведены до практической реализации в виде стендового макетного образца и могут быть использованы для исследования нагруженности элементов металлоконструкций горных машин при статических нагрузках;

- Лабораторный стенд для моделирования нагружения и оценки деформаций позволяет проводить экспериментальные исследования и практические занятия по изучению влияния прикладываемой нагрузки по схеме поперечного изгиба на уровень деформаций и напряжений поверхностей исследуемых балок и металлоконструкций с габаритами до 1400×380×230 мм тензометрическим методом.

Методы исследований, используемые в ходе выполнения работы:

- натурные экспериментальные методы оценки механических деформаций и напряжений;

- метод конечных элементов для компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния;

- методы математической статистики при обработке результатов экспериментальных исследований.

#### Научные положения, выносимые на защиту:

1. При статическом нагружении секции механизированной крепи чувствительность арочного УЭ СТП с вогнутым сводом и радиальным сопряжением дуг определяется его геометрическими параметрами, при этом чувствительность УЭ возрастает с увеличением радиуса сопряжения его дуг до 10 мм и при уменьшении ширины поперечного сечения свода от монтажных площадок до вершины.

2. Коэффициент тензочувствительности СТП для оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи с использованием арочного УЭ совместно с полупроводниковым тензорезистором типа КSP при прижимном и комбинированном способах закрепления составляет 26,71 и 29,76 соответственно.

3. Размещение СТП на плоскости внутренних защищенных поверхностей перекрытия, основания, рычажных траверс и ограждения секции механизированной крепи обеспечивает измерение механических напряжений металлоконструкций в диапазоне от 0 до 450 МПа с погрешностью не более 6 % от расчетных значений.

Достоверность положений и результатов обеспечивается корректным использованием стандартных программ расчета и методов моделирования, использованием сертифицированной аппаратуры и оборудования для получения основных характеристик тензорезисторов СТП (установка для градуировки приклеиваемых тензорезисторов сертификат RU.E.28.007.А №27992, ГРСИ № 34927-07 и тензосистема ММТС-64.01 свидетельство RU.C.34. 007.А №44412, рег. №21760-01), воспроизводимостью авторских результатов исследований, полученных на разработанном стендовом оборудовании в программной системе «Стенд-Инфо» (свидетельство ФИПС о регистрации программы для ЭВМ № 2011618442) и результатов, полученных ранее на сертифицированном стендовом оборудовании, удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

#### Реализация работы

С 2013 года исследования выполнены в соответствии с планом НИР ИУ СО РАН, проект 74. «Научные основы создания новых поколений горных машин и оборудования, обеспечивающих безопасность и эффективность подземных работ, исследование их взаимодействия с массивом горных пород» (№ 0354-2014-0004).

Практические результаты переданы для реализации заводу-изготовителю секций МКЮ.2У-07/19, МКЮ.2У-12/25. Предложенный комплекс научнотехнических решений позволяет производить измерение фактических деформаций элементов металлоконструкций секции механизированной крепи в процессе приемосдаточных испытаний с возможностью оперативной переустановки СТП и корректировки исследуемой зоны.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на XV и XIX Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, (2009, 2013); II Всероссийской, 55-й научно-практической конференции «Россия молодая»: г. Кемерово, КузГТУ, 2010 г.; Всероссийском инновационном молодёжном форуме «Селигер-2010» - смена «Инновации и техническое творчество»: Осташков, 2010 г.; Региональном конкурсе инновационных проектов «Кубок техноваций», декабрь 2010 г.; Семинаре «Технология создания производственных задач и создания инновационных продуктов» МИМОП: г. Москва, 5-6 мая 2011 г.; Всероссийском конкурсе инновационных проектов «НАИРИТ», 2011 Всероссийской научно-практической конференции «Информационно-Г.; телекоммуникационные системы и технологии (ИТСиТ)»: г. Кемерово, КузГТУ (2012, 2014 гг.); IV Международной научно-практической конференции «Перспективы инновационного развития угольных регионов России»: г. Прокопьевск, 2014 г.; Международной промышленной выставке производственного оборудования «Manufacturing Indonesia - 2012»; Областном инновационном конвенте «Кузбасс: Образование, наука, инновации»: г. Кемерово, 4–5 декабря 2014 г.

В 2013 году автором получен грант ОАО «Сибирская угольная энергетическая компания» (СУЭК) на проведение научных исследований по теме диссертационной работы.

Результаты исследований включены в научно-технический отчет по проекту «Разработка мобильной микропроцессорной тензометрической системы контроля состояния промышленных конструкций» в рамках программы «СТАРТ» Фонда

содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Госконтракт № 11089р/8345 от 01.10.2012 г.).

Результаты диссертационного исследования прошли практическую апробацию в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по теме: «Разработка экспериментальных конструкций комбинированного инструмента с применением сверхтвердых композиционных материалов для эффективного разрушения горных пород» (Соглашение № 14.607.21.0028 от 05.06.2014 г.).

Публикации. По теме диссертационного исследования автором опубликовано 12 работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, одно свидетельство ФИПС о регистрации программы для ЭВМ.

#### Личный вклад автора состоит:

 в разработке и сборке лабораторного нагружающего стенда, вспомогательных устройств и средств сопряжения аппаратных элементов макетного образца мобильной тензометрической системы для проведения экспериментальных исследований;

- в разработке методики оценки нагруженности элементов металлоконструкций секций механизированной крепи с использований арочных СТП;

- в непосредственном участии в создании программной системы «Стенд-Инфо» для регистрации, визуализации и обработки экспериментальных данных;

- в получении, обработке, анализе экспериментальных данных, апробации результатов и подготовке основных публикаций по теме выполненного диссертационного исследования.

#### Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 124 наименований. Работа изложена на 160 страницах машинописного текста и содержит 63 рисунка, 28 таблиц и 2 приложения.

## ГЛАВА 1. Методы и средства контроля нагруженности секций механизированных крепей

Фактические данные о действующих нагрузках на элементы секции важны для обеспечения эксплуатационной надежности и безопасности механизированных крепей. Значения деформаций и напряжений в металлоконструкциях, характеризующие нагруженность элементов секции, были и остаются важнейшими показателями работоспособности и безопасности механизированных крепей на стадии производства, испытаний и последующего эксплуатационного контроля.

От правильности оценки деформаций и напряжений в металлоконструкции, возникающих при воздействии основных эксплуатационных нагрузок, существенно зависят принципы проектирования, в том числе выбор конструкционного материала, конструктивное оформление узлов, требования к эксплуатации и технологии изготовления [1]. При этом к настоящему времени основные усилия в развитии крепестроения направлены на снижение металлоёмкости и стоимости оборудования, повышение надёжности всех узлов, оптимизацию конструкции [2-6]. Поэтому для разработчиков и производителей крепей анализ нагруженности элементов секции необходим для обоснования параметров конструкций проектируемых секций с учетом различных горнотехнических условий.

Заводская проверка контроля качества и подтверждение соответствия прочности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи требованиям безопасности – для принятия решения о возможности постановки на производство – согласно [7] рабочей программе и методике испытаний (РПМ) основаны на результатах стендовых прочностных и статических испытаний. Поэтому важным этапом решения проблемы обеспечения работоспособности и безопасности секций механизированных крепей является определение фактических деформаций и напряжений металлоконструкций, выявление наиболее нагруженных зон и элементов в процессе заводских предварительных и приемо-сдаточных испытаний – для проверки проектных решений и – в перспективе – для эксплуатационного контроля.

Учитывая важность этой задачи, одним из ведущих производителей горнодобывающего оборудования России, ключевым предприятием тяжелого машиностроения Кузбасса – ООО «Юргинский машзавод», для повышения эффективности оценки нагруженности выпускаемых секций механизированных крепей и обеспечения эксплуатационной безопасности, проверки качества проектных решений – поставлена комплексная задача разработки необходимых технических средств и методик оперативного контроля фактических механических характеристик металлоконструкций секции в режиме реального времени [8].

В соответствии с техническими требованиями завода, в рамках данной работы решались задачи анализа существующих подходов для неразрушающего контроля и мониторинга ответственных конструкций, выявления направлений проведения НИР и ОКР для повышения эффективности существующих методов и их адаптации для прямой оценки деформаций элементов металлоконструкций секций механизированных крепей производства ООО «Юргинский машзавод», с учетом производственной и эксплуатационной специфики, нормативной документации и РПМ. При этом НИОКР необходимо проводить с учетом перспективы дальнейшего применения полученных решений в условиях эксплуатации для регистрации данных о воспринимаемых нагрузках производимого оборудования в режиме «черный ящик». На начальном этапе технические средства и методики могут быть испытаны и внедрены при проведении внутризаводских предварительных, приемосдаточных и сертификационных испытаний секций.

## 1.1 Анализ подходов к экспериментальной оценке нагруженности секции механизированной крепи

К настоящему времени имеется значительное количество результатов исследований в области оценки деформаций и напряжений, возникающих в метал-

локонструкциях секций механизированных крепей на стадии их производства и эксплуатации.

На этапе создания первых промышленных образцов секций применялись различные методы и средства для оценки нагруженности разрабатываемых конструкций. Определение характера и уровня нагрузок на элементы металлоконструкций механизированных крепей являлось предметом исследований таких институтов, как КузГТУ им. Т. Ф. Горбачева, НИТУ «МИСиС», Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Национальный научный центр горного производства «Институт горного дела им. А. А. Скочинского», ОАО «ВНИМИ», ОАО «Гипроуглемаш», ОАО «ПНИУИ» и других, начиная с момента создания первых образцов в 1930-х годах.

Исследования по определению характера и уровня нагрузок проводились параллельно с конструкторской деятельностью по созданию механизированных крепей и обоснованию их параметров с учетом условий залегания угольных пластов. Сложность проверки проектных решений в горнодобывающей промышленности привели к активному развитию исследований на моделях с применением метода эквивалентных материалов [11].

Одни из наиболее ранних комплексных исследований работы крепей проводились в ОАО «ПНИУИ» на масштабных моделях крепи типа ККВ-1 конструкции Ардашева К. А. с 1954 по 1959 год [11, 18, 19]. Тогда для выявления условий взаимодействия с вмещающими породами в зависимости от углов падения пласта и составов пород кровли использовалась гидрофицированная модель крепи, в которой сопротивление смещающейся кровле создавалось весом столба жидкости в пьезометрической трубке. Исследования на моделях с определенной степенью допущений позволяло выявить наиболее важные особенности работы конструкции без проведения натурных испытаний полногабаритных конструкций. Это в значительной степени удешевляло и упрощало процесс поиска и обоснования оптимальных параметров элементов конструкций разрабатываемых крепей.

Активное применение начали получать экспериментальные методы определения механических напряжений деталей и конструкций, основанные на измерении деформаций или других параметров материала. В основе методов лежало свойство некоторых материалов изменять при деформации свое электрическое сопротивление, так называемый тензоэффект.

Наиболее активный период исследований пришелся на 1960-70-е годы. В данный период в ОАО «ПНИУИ» для измерения контактных нагрузок на элементы секции 1МК А. И. Ерохиным было предложено использовать тензометрические пластины из плоских тензодинамометров [12, 18, 19]. Тензодинамометры размером 100×100×23 мм устанавливались по внешнему контуру на грузонесущих элементах специально изготовленной модели секции в соответствии с рисунком 1.1 а. Применение тензодинамометров позволило получать эпюры распределения контактных нагрузок на основные элементы модельной секции: основание, ограждение и перекрытие (рисунок 1.1 б), однако означало недоступность датчиков для обслуживания и наличие их механического контакта тензодинамометров с породами, что предполагает их износ. По этой причине для полноразмерной конструкции секции измерениям по внешнему контуру предпочтительны измерения на внутренних волокнах в защищенной зоне, что предполагает доступность для обслуживания и настройки оборудования.



Рисунок 1.1 – Замерная секция механизированной крепи 1МК: а – оборудование тензометрическими панелями, б – эпюры распределения контактных нагрузок по контуру крепи

По данному принципу исследованиями внутренних напряжений в ОАО «ПНИУИ» занимались Попов В. Л. и Любимов А. Н. Ими проводились исследования внутренних напряжений, возникающих в металлоконструкциях основных элементов секции механизированной крепи. Для этого специально изготавливалась измерительная секция и на неё устанавливались 194 датчика сопротивления на внутренние поверхности основных элементов металлоконструкций [17, 18]. Такой способ позволял исследовать внутренние напряжения основных элементов металлоконструкций секции с обеспечением доступа к датчикам и возможности многократного повторении испытаний без их механического износа.

Одним из методов измерения нагрузок на металлоконструкции основных элементов механизированных крепей на внутренних волокнах в тот же период являлось применение струнных датчиков [13, 19]. Так, в ОАО «ВНИМИ» Кузнецовым С. Т., Глушихиным Ф. П., Орловым А. А. было предложено использовать струнные датчики для измерения нагрузок на основные элементы металлоконструкций секции механизированной крепи, которые были испытаны на моделях «Мосбасс» и ОМКТ. Струнные датчики на резьбовое или клеевое соединение устанавливались на балки внутренней оградительной части крепи в соответствии с рисунком 1.2.

В основе метода лежит свойство струны изменять частоту колебаний при пропускании электрического тока с изменением усилия натяжения, возникающего вследствие относительного изменения длины или деформации [14]. Такое решение имеет ряд преимуществ, которые заключаются в возможности произвольной установки струн по направлению оси и месту расположения, возможности проведения дистанционных измерений, переустановки и настройки датчиков в процессе испытаний, их доступности.

Сложности реализации метода заключаются в трудоёмкости выбора длины и диаметра струны в зависимости от ожидаемой деформации, относительной сложности конструкции, наличии большого числа механических элементов, требующих постоянного обслуживания и настройки.



Рисунок 1.2 – Секция крепи ОМКТ с установленными струнными датчиками

Также для исследования напряжений в перекрытиях механизированной крепи «Донбасс» сотрудниками Национального научного центра горного производства «Институт горного дела им. А. А. Скочинского» Трумбачевым В. Ф. и Катковым Г. А. разработан метод фотоупругих покрытий [15, 16]. Фотоупругие датчики размером 25×25×2 мм в количестве 54 штук наклеивались вдоль нижних волокон через каждые 150–200 мм. По изменению относительной разности хода поляризованных лучей, связанных с разностью главных напряжений в исследуемой точке, строились эпюры нагрузок на крепь в соответствии с рисунком 1.3.

Метод фотоупругих покрытий, как и многие оптические методы исследования механических напряжений, обладают высокой оперативностью, точностью и чувствительностью, поэтому позволяют производить измерения как при малых [119, 120], так и при пластических деформациях [121], ввиду чего имеет большие перспективы развития для решения задач дистанционной регистрации параметров нагруженности металлоконструкций горношахтного оборудования. К основным недостаткам метода фотоупругих покрытий можно отнести восприимчивость к механическим воздействиям и ударным нагрузкам, часто возникающим в процессе ведения горных работ, сложность быстрой корректировки зоны измерения.



Рисунок 1.3 – Схема расположения фотоупругих датчиков на крепи «Донбасс»: а – вид сбоку, б – вид А-А

Таким образом, исследования характера и уровня нагрузок элементов металлоконструкций секций механизированных крепей, проводимые в период их наиболее активного развития в 1960–70-е годы НИТУ «МИСиС», Национальным минерально-сырьевым университетом «Горный», ОАО «Гипроуглемаш», КузГТУ им. Т. Ф. Горбачева [18, 19] и другими, также в основном базировались на тензометрических и оптических методах экспериментальной диагностики и были внедрены научными коллективами для расчета и выбора параметров множества новых конструкций секций [20–22].

В результате работы ученых этих научных школ разработаны методы и средства оценки контактных напряжений и нагрузок на элементы металлоконструкций секций механизированных крепей на моделях и полноразмерных конструкциях, установлены многие важные закономерности работы крепей и их элементов в различных горнотехнических условиях, которые являются основой при проектировании механизированных крепей до настоящего времени [23–26].

Однако, несмотря на глубокую теоретическую проработку и внедренные экспериментальные результаты, используемые методы в настоящее время не позволяют в полной мере решать задачу оперативной оценки нагруженности элементов металлоконструкций секций с возможностью быстрой переустановки и корректировки зоны измерения. Следует отметить, что разработанные методы и технические средства использовались как инструмент при исследованиях контактных напряжений и нагрузок на элементы металлоконструкции секций, взаимодействия механизированной крепи с вмещающими и обрушенными породами, поперечной устойчивости, кинематических взаимодействий элементов на стадии проектирования и конструирования. При этом изучение вопросов эффективности применяемых методов измерений являлось второстепенной задачей и проведено недостаточно.

Кроме того, интенсивное развитие компьютерных технологий и программных средств расчета позволили проводить моделирование секции методом конечных элементов, что позволяет исследовать отклик исследуемой модели в виртуальной среде и значительно сокращает время на проектирование. Так и в практике мирового крепестроения все больше применяются современные научнообоснованные методы исследований и расчетов [10, 27, 28, 30], наблюдается тенденция к автоматизации этих процессов. Программные комплексы обладают широкими возможностями построения математических моделей и производят расчеты на основе МКЭ, что дает возможность учесть пространственную многомерность конструкций крепей, жесткость сопряженных элементов металлоконструкций, реальные условия нагружения и приложения опорных реакций [29]. Таким образом, в настоящее время расчет конструкции секции до изготовления опытных моделей полностью производится средствами ЭВМ в программной среде для трехмерного моделирования. Этот факт значительно снизил потребность в проведении экспериментальных исследований напряженного состояния конструкций на стадии проектирования.

Вместе с тем экспериментальные методы исследования элементов секций механизированных крепей продолжают активно применяются для контроля проектных решений методом прямого измерения фактических деформаций и напряжений металлоконструкций в зонах наибольшей их концентрации, полученных в процессе компьютерного анализа напряженно-деформированного состояния МКЭ [10, 27, 28, 30], а также в процессе экспертизы промышленной безопасности в период эксплуатации [6].

# 1.2 Тензометрический контроль элементов металлоконструкций секции механизированной крепи

На сегодняшний день имеется достаточно много методов регистрации и контроля деформаций конструкций; применяются, как правило, неразрушающие или натурные экспериментальные методы диагностики [6, 32]. Анализируя объем работ по испытанию ответственного оборудования в различных отраслях промышленности [6, 31, 32, 40, 78-85,122-124], можно сделать вывод, что из множества применяемых в 1950-70-х годах методов наибольшее развитие получил тензометрический метод.

Анализ особенностей реализации методов также показал, что для оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи на этапе приемо-сдаточных стендовых заводских и сертификационных испытаний одним из наиболее перспективных остается тензометрический метод экспериментальной диагностики. Это связано с его универсальностью и относительно невысокой стоимостью, при этом метод позволяет длительное время проводить контроль деформаций в конструкциях, осуществлять оценку эксплуатационных режимов [34-44]. Кроме того, принцип работы тензометрических систем позволяет производителям в перспективе реализовать искро-взрывобезопасное исполнение их элементов для работы в сложных эксплуатационных условиях, отнесенных, согласно [45, 46], к перечню опасных производственных объектов с особыми условиями эксплуатации. В результате этого тензометрический метод стал основой для проведения исследований деформаций и напряжений в элементах металлоконструкций секций механизированных крепей с целью проверки проектных решений. В заводских условиях такие исследования с использованием средств инструментального контроля проводятся при прочностных предварительных, приемосдаточных и сертификационных испытаниях.

В отношении крепей производства ООО «Юргинский машзавод» объектами исследований могут быть все типы механизированных крепей и металлоконструкции их элементов. Крепи поддерживающе-оградительного типа двух- и четырехстоечные в широком и узком исполнении (рисунок 1.4 а), предназначенные для механизации крепления призабойного пространства [47], крепи сопряжения с боковым ограждением КСБЮ [48], крепи сопряжения штрековые пенального типа КСПЮ [9, 47] (рисунок 1.4 б) позволяют располагать элементы оборудования для проведения оценки механических характеристик металлоконструкций в защищенной зоне.



Рисунок 1.4 – Секции механизированных крепей ООО «Юргинский машзавод»: а – МКЮ.2У-07/19, б – КСПЮ

Основными нормативными документами, устанавливающими порядок проведения испытаний секций является ГОСТ Р 52152-2003 и рабочие программы и методики сертификационных (стендовых) испытаний для отдельных моделей секций. Испытания секций, в соответствии с рисунком 1.5 а, на ООО «Юргинский машзавод» проводятся по пяти разным схемам нагружения на испытательном стенде «Gluckauf», произведенном в Германии (рисунок 1.5 б) [10, 47].

Аналогичным стендовым оборудованием обладают крупнейшие в мире центры по испытанию горношахтного оборудования в Дортмунде (Германия), Гливицах и Катовице (Польша), Опаве (Чехия), а также в настоящее время стенды для испытания механизированных крепей имеют все основные производители крепей, такие как Caterpillar (бывший DBT), Joy, «Горные машины» (Украина), Пекинская компания угольного машиностроения, Всекитайская угольная компания (Чаньджоу) и т.д.



Рисунок 1.5 – Заводской стенд «Gluckauf» ООО «Юргинский машзавод» для испытаний секций механизированных крепей: а – общий вид, б – процесс испытания секции МКЮ.2У-07/19

Методика испытаний металлоконструкций сводится к оперативной проверке параметров нагруженности в механических напряжений металлоконструкций всех элементов в контрольных зонах, определенных по результатам расчета конструкции МКЭ при испытаниях на изгиб и изгиб с кручением. Определение предполагаемых расчетных зон установки датчиков на элементы металлоконструкций секции производится на основе расчетов зон с наибольшими напряжениями на стадии проектирования (см. Глава 4, рисунок 4.21 а), и данных по результатам стендовых испытаний на предприятии-изготовителе [8]. В результате расчетные зоны для установки датчиков на элементы металлоконструкции секции утверждаются и обозначаются в соответствии с рисунком 1.6.





Рисунок 1.6 – Расчетные зоны установки датчиков на элементы металлоконструкции секции МКЮ.2У-07/19: а – перекрытие, б – основание, в – ограждение, г – передние рычаги траверсы, д - задние рычаги траверсы

Далее на заводском стенде «Gluckauf» имитируют эксплуатационные условия нагружения с приближением их к шахтным для получения результатов по выявлению или подтверждению показателей качества крепи.

Недостаток существующей методики тензометрического контроля при заводских испытаниях элементов металлоконструкций секции заключается в том, что она не предусматривает возможности корректировки мест измерения параметров нагруженности металлоконструкции секции механизированной крепи при изменении схемы нагружения и оперативного определения фактических напряжений в альтернативных точках в процессе испытаний. Следовательно, совершенствование операции контроля при прочностных статических приемосдаточных испытаниях в рамках технологического процесса изготовления элементов механизированной крепи с целью обеспечения высокого качества, долговечности и безопасности следует проводить по пути обеспечения возможности корректировки зон измерения параметров нагруженности элементов металлоконструкций.

Для повышения эффективности оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи тензометрическим методом необходимо обеспечить следующие технические и функциональные характеристики оборудования[8]:

1. Мобильность. Тензометрическая система должна обеспечивать возможность многократного изменения расположения зоны измерения деформаций. Для этого все элементы системы, включая ПИП, должны иметь возможность устанавливаться многократно в произвольном месте секции без снижения метрологических характеристик для установки фактических механических характеристик объекта контроля (OK) и корректировки контрольной зоны.

2. Модульность и масштабируемость. Система должна представлять собой локальную сеть, распределенную на элементах секции механизированной крепи с возможностью передачи информации на компьютер. Одиночным ОК должен является один элемент металлоконструкции секции. Значительное внимание должно уделяться возможности масштабирования и оперативного расширения. Системы и её элементы должны проектироваться как совокупность взаимосвязанных модулей.

3. **Многоканальность.** Наличие от 8 до 64 каналов на один измерительный модуль.

4. Универсальность входов. Возможность подключения различных типов датчиков с выходом по напряжению и по току (деформации, перемещения и т.д.) на одном ОК.

5. Быстродействие. Скорость обработки данных должна обеспечивать не только оперативность контроля деформаций и напряжений, но и в перспективе

обеспечить возможность контроля динамических процессов. На стадии проведения стендовых испытаний в лабораторных и заводских условиях проведение исследований динамических процессов не требуется.

**6.** Компактность. Устройства системы, устанавливаемые на секции крепи, должны иметь габаритные размеры не более чем 200×200×100 мм (высота 100 мм).

Типовые тензометрические системы включают в себя пять основных элементов:

1. Первичные измерительные преобразователи. Размещаются непосредственно на элементах металлоконструкций секции крепи, преобразуют измеряемую физическую величину в сигнал.

2. Модули сбора и обработки данных (контроллер, концентратор сигналов с преобразователей на ОК). Являются промежуточными измерительными преобразователями и предназначены для приема и обработки информации непосредственно с ПИП, усиления и передачи её на компьютер.

3. Источник питания.

4. Устройства и линии связи (кабельная сеть). Обеспечивают обмен информацией и командами между устройствами и подсистемами.

5. Персональный компьютер (ПК) с программным обеспечением (ПО) для регистрации, визуализации и анализа данных.

Система в зависимости от назначения и поставленных задач может включать большее количество элементов, в том числе реализующих беспроводную передачу данных, масштабирование, деление на группы и прочее, равно как и объединять элементы, если проектируется как портативный прибор.

При этом выполнение отдельных функциональных и технических характеристик обеспечивается за счет соответствующих характеристик отдельных элементов системы. Так, мобильность системы определяется возможностью многократной переустановки первичных преобразователей. Контроллер и концентратор сигналов модуля сбора и обработки данных обеспечивает модульность, масштабируемость, компактность, определяет канальность, универсальность входов и быстродействие системы. Компьютер определяет быстродействие.

В настоящее время в России и за рубежом разработано большое количество промышленных тензометрических систем для решения задач контроля производственных объектов. Созданием многоканальных микропроцессорных тензометрических систем предназначенных для автоматизации сбора и измерения сигналов с тензорезисторов и тензометрических датчиков занимаются такие отечественные институты и научно-производственные предприятия, как ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина» (г. Новосибирск) [40, 50, 52], НПП «Аэротест» (ЦАГИ, Москва) [53, 54], НПП «Парк-центр» (г. Санкт-Петербург) [55], НПП «Мера» (Москва) [56-58], НПП «Интерприбор» (г. Челябинск) [59], ООО «ЭТМС» (СКБ ФГУП ВНИ-ИФТРИ, г. Москва, г. Зеленоград) [60], СГУПС (г. Новосибирск) [61] и другие (таблица 1.1).

Из множества иностранных компаний стоит отдельно выделить KYOWA (Япония) [62], MicroStrain, Inc. (штат Вермонт, США) [63], Tokyo Sokki Kenkyujo CO., Ltd. (Токио, Япония) [64], VTI Instruments Corporation (США) [65], Strain-Sense Ltd (Великобритания) [66] (таблица 1.1).

Результат анализа функциональных и технических характеристик промышленных решений для тензометрии в соответствии с требованиями ООО «Юргинский машзавод» приведен в таблице 1.1.

Исходя из данных таблицы 1.1, можно сделать вывод, что большинство элементов представленных систем, кроме ПИП, удовлетворяют поставленным требованиям. Таким образом, для эффективного решения задачи оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи требуются дополнительные исследования ПИП и их исполнения, обеспечивающего мобильность для реализации возможности оперативной корректировки зоны измерения напряжений и деформаций в металлоконструкциях элементов секции, поскольку наиболее часто применяемые при испытаниях в качестве ПИП приклеиваемые тензорезисторы не могут быть повторно использованы и переустановлены во время испытаний.

	Наименование тензометрических систем																
	отечественные								зарубежные								
Функциональные и технические характеристики	УИУ 2002, НПП «ПАРК-центр»	MIC-183/184, HIIII «Mepa»	MIC-026+MIC212, HIIII «Mepa»	Эпсилон, НПП "Аэротест", ЦАГИ	СТММ, НІШ "Аэротест", ЦАГИ	ZET 017-T8, ООО «ЭТМС», ВНИИФТРИ	ММТС-64.01, ФГУП СибНИА	Цинамика-1, ФГУП СибНИА	Герем- 4.0/4.1, НПП "Интерприбор"	Q.raxx A116-32, ЗАО "Сенсор Системс Солюшнс" [67]	Гензор-08.128, СГУПС	WSMS, MicroStrain, Inc., CIIIA	ORC-3410, Tokyo Sokki Kenkyujo CO., Япония	EX1629, VTI Instruments Co., CIIIA	LMCS 28000, StrainSense Ltd, Великобритания	MCMS, Belgium [68]	рСD-300, КҮОWА, Япония
Мобильность и наличие СТП	_	-	_	_	-	+	_	-	_	-	+	-	-	_	_	-	+
Универсальность входов	+	_	_	_	_	_	+	+	+	_	+	_	+	_	+	_	+
Компактность	_	-	+	_	+	_	_	_	+	_	+	+	+	-	_	+	+
Модульность построения системы	+	_	+	+	+	+	+	+	+	+	+	_	_	+	+	_	+
Многоканальность (не менее 8 каналов на 1 модуль)	+	+	_	+	+	+	+	+	+	+	_	_	_	+	+	_	_
Быстродействие (не менее 1000 каналов в секунду)	+	+	+	+	+	+	_	+	_	+	+	+	+	+	+	+	+

# Таблица 1.1 – Сравнительный анализ тензометрических систем

Наклеивание, приваривание или нанесение его на исследуемую поверхность металлоконструкции элемента секции возможно только один раз. При возникновении необходимости сместить зону измерений тензорезистор не может быть повторно использован и требует замены.

Невозможность многократной переустановки приклеиваемых тензорезисторов не позволяет оперативно корректировать зону измерения механических напряжений секции механизированной крепи, следовательно, не позволяет учитывать фактические смещения зоны максимальных напряжений в металлоконструкциях элементов секции при изменении эпюры реактивных давлений по длине и ширине верхняка. В связи с этим, для обеспечения мобильности ПИП при оценке нагруженности серийно изготавливаемых металлоконструкций элементов механизированных крепей возможно использование СТП на базе упругих элементов УЭ.

## 1.3 Современные подходы к построению мобильных первичных измерительных преобразователей

В настоящее время некоторыми разработчиками предложены конструкции мобильных ПИП (таблица 1.1). Так, в частности, разработаны мобильные (съемные) ПИП деформаций и перемещений промышленных конструкций из металла и бетона. Фирмой KYOWA разработаны конструкции датчика перемещения для бетонных конструкций BCD-E-70S (рисунок 1.7 а) [69] и универсального тензометрического датчика с протектором КСН-5А-1 [70], внутри защитного корпуса которого находится фольговый тензорезистор (рисунок 1.7 б).

Для тензометрического датчика BCD-E-70S характерны малые размеры, простота установки при помощи креплений и клея и возможность корректировки зоны измерения. Подобный способ закрепления позволяет без нарушения целостности исследуемой поверхности ОК производить неоднократную переустановку.

В научном сертификационно-диагностическом центре СГУПС в составе разработанной измерительной системы «Тензор-08.128» [61], предназначенной

для проведения испытаний и экспресс-диагностики искусственных сооружений разработан съемный датчик измерения деформаций (для статики и динамики) ТДА-50.01 (рисунок 1.8).



Рисунок 1.7 – Съёмные ПИП Kyowa: а – датчик перемещений BCD-E-70S, б – датчик KCH-5A-1 с протектором



Рисунок 1.8 – Датчик измерения деформаций ТДА-50.01: а – общий вид, б – в составе тензометрической системы

Датчик прижимного типа ТДА-50.01 на основе тензометрического преобразователя выгодно отличаются от тензорезисторов, так как не требуют наклеивания, для закрепления на исследуемой поверхности предусмотрены постоянные магниты.

Компания Zetlab выпускает датчик силы растяжения и сжатия US [71], рисунок 1.9. Датчик US (Zetlab) объединяет с датчиком КСН-5А-1 (Kyowa) способ установки на исследуемую поверхность конструкции с помощью резьбовых шпилек или болтов, как и некоторые другие конструкции [71-73].



Рисунок 1.9 – Конструкция съемного датчика деформации US (Zetlab)

Однако установка ПИП на шпильку требует нарушения целостности поверхности измерения ОК, что нежелательно при установке многочисленных датчиков на поверхности металлоконструкций элементов секции в процессе испытаний. Поэтому представленные конструкции съемных датчиков (рис. 1.76, 1.9) не могут в полной степени отвечать поставленным требованиям к первичным преобразователям для оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции.

Датчики ТДА-50.01 и BCD-E-70S выгодно отличаются применением разъемных способов закрепления на поверхности ОК на клей и постоянные магниты, однако, как показали последующие испытания и расчеты МКЭ, датчики имеют резервы для повышения чувствительности путем варьирования геометрических параметров и применения тензорезисторов с альтернативными материалами тензорешётки (п.п. 2.1).

#### 1.3.1 Съёмные тензометрические преобразователи

СТП представляют собой УЭ специальной формы с закреплённым на нём одним или несколькими тензорезисторами. В настоящее время предложено достаточно много вариантов исполнения УЭ. В зависимости от функционального назначения УЭ и конструкции тензометрических датчиков подразделяются на несколько типов и могут быть классифицированы по различным параметрам: по конструкции и типу УЭ, по характеру измеряемой деформации, по способу закрепления. Основные виды УЭ тензометрических датчиков [74-78] приведены в таблице 1.2.

Наиболее простые и распространенные типы УЭ для конструирования датчиков, такие как стержневые, мембранные и S-образные, применяются для высоких предельных нагрузок [77, 78], используются для определения сил и масс для железнодорожных, платформенных, бункерных весов, весоизмерительных установок и стендов. Эти элементы характеризуются высокой жесткостью, работают на сжатие или растяжение под воздействием вертикально приложенной нагрузки, поэтому для измерений деформаций поверхности ОК не применяются. По этой причине использование их в качестве УЭ для СТП контроля механических напряжений в металлоконструкциях элементов секции механизированной крепи не представляется возможным.

Тип упругого элемента	Схема упругого элемента	Коэффициент пре- образования, <i>К<sub>nn</sub></i> , еод·мм <sup>-1</sup>	Примечания
Стержневой	$ \begin{array}{c} l_T \\ \hline a $	$\frac{4\cdot 10^6}{\pi d^2 E}$	где <i>l<sub>t</sub></i> – база тен- зометриро- вания, <i>P</i> – нагрузка
Мембранный		$\frac{1,5 \cdot 10(1+\mu)(\ln \frac{D}{d} + 0,5\frac{d^2}{D^2} - 0,5)}{\pi d^2 E}$ где <i>d</i> – диаметр поверхности приложения силы; D – диаметр мембраны <i>h</i> – толщина элемента	Деформация $\delta$ , MM $\frac{3P(1-\mu^2)D^2}{16\cdot 10^3 \cdot h^3 \cdot E}$ , Где $\mu$ - коэффициент Пуассона, E – модуль упругости
Консольный	$a_T \ge b; l_T \le \frac{l}{5}$	$\frac{nh \cdot \left[ l - \left( a_T + \frac{l_T}{2} \right) \right]}{l^3}$ где <i>n</i> – число активных плеч моста, установлен- ных на преобразователь	Коэффициент нелинейности $1 - \frac{\sqrt{l^2 - \delta^2}}{l}$ , где $\delta$ – изме- ряемое пере- мещение

Таблица 1.2 – Упругие элементы и их характеристики

Тип упругого элемента	Схема упругого элемента	Коэффициент пре- образования, <i>K<sub>nn</sub></i> , еод·мм <sup>-1</sup>	Примечания
Рамный	$h_{1} \ge 2h$ $l_{T} = \frac{l_{T}}{2}$	10 <sup>6</sup> <u>nh</u> 2 <i>lc</i> , где с – высота упруго- го элемента	Коэффициент нелинейности <u>0,17<i>l</i> δ</u> $c^2$
S-образный	$= \frac{l}{T}$	$10^6 \frac{2h}{2lc}$	Практически линеен до зна- чений дефор- маций $\mathcal{E}_T < 10^4$
Кольцевой	$l_T \leq \frac{R}{2}$	7 · 10 <sup>6</sup> <u>nh</u> 7 · 10 <sup>6</sup> <u>4R</u> <sup>2</sup> , где <i>h</i> – толщина упру- гого элемента	Коэффициент нелинейности ~ $\frac{0,5\delta}{R}$
Арочный	$l_T \leq \frac{R}{2}$	$7 \cdot 10^6 \frac{nh}{2H^2}$	Коэффициент нелинейности <u>0,5<i>8</i></u> <u>Н</u>

Продолжение таблицы 1.2 – Упругие элементы и их характеристики

Для определения меньших нагрузок широкое применение получили УЭ в форме консоли (балки) постоянного сечения с наклеенными на нее тензорезисторами. Существуют также и конструкции консоли переменного сечения, однако при одинаковых напряжениях коэффициент нелинейности такой балки по сравнению с балкой постоянного сечения выше, следовательно, её метрологические свойства хуже [77]. Такие УЭ применяются для датчиков и индикаторов перемещений. Рамная конструкция чувствительного элемента тоже является разновидностью балки, но приблизительно на 40 % жестче, чем консольная балка. УЭ такого типа применяются для дозаторов и других конструкций, используемых для непрерывного взвешивания сыпучих и иных материалов. Как правило, рабочая часть такого УЭ изготавливается из балочек переменного сечения, жестко соединенных в центре и опирающихся на периферии на ребра, имеющие меньшую жесткость на изгиб. В этом случае УЭ представляет собой статически неопределимую пространственную раму.

Для регистрации деформаций и перемещений также применяется кольцевой тип УЭ. Для более высоких нагрузок применяются кольца большой кривизны, а для малых – малой кривизны, причем кривизна осевой линии в обоих случаях может быть переменной. Исполнение поперечного сечения также может быть как переменным, так и постоянным. Существуют также варианты исполнения кольца из трубочки в форме тороида. Такая конструкция имеет ряд достоинств: небольшую высоту, достаточную жесткость, малую восприимчивость к поперечной составляющей нагрузки [77]. Арочный тип УЭ представляет собой конструкцию производную от кольцевого, с меньшей жесткостью, предназначенную для меньших деформаций, но обладает аналогичными характеристиками (см. таблицу 1.2).

В отмеченных выше мобильных ПИП ВСD-Е-70S и ТДА-50.01 применяется арочный тип УЭ, у датчика КСН-5А-1 – рамный. Однако чувствительность СТП из-за дополнительно включенного в измерительную цепь УЭ значительно снижается [74–76] в сравнении с исходным тензорезистором, который также имеет существенное влияние на характеристики СТП. Рассмотрим основные типы используемых для построения СТП тензорезисторов.

#### 1.3.2 Тензорезисторы, используемые для построения СТП

Как было отмечено выше, большинство используемых ПИП в промышленных тензометрических системах не позволяют обеспечить мобильность системы. Наиболее распространенными ПИП для контроля состояния ответственных конструкций, в том числе секции механизированной крепи на этапе приёмочных и сертификационных стендовых заводских испытаниях, являются приклеиваемые металлофольговые тензорезисторы.

Такие тензорезисторы имеют следующую структуру в соответствии с рисунком 1.10: на подложке 1 из тонкой пластмассовой, бумажной или полимерной пленки установлен решетчатый чувствительный элемент 2 из тонкой резистивной фольги или проволоки, соединенный с лужёными выводами 3, и сверху покрыт подложкой 1 или лаком. По типу решетки делятся соответственно на проволочные и фольговые.



Рисунок 1.10 – Тензорезисторы: а – проволочный, б – фольговый

Проволочные тензорезисторы обладают высокой точностью, относительно высокой стабильностью, имеют низкую стоимость, просты в изготовлении [79-81]. Фольговые тензорезисторы превосходят проволочные по метрологическим и эксплуатационным характеристикам, обеспечивают вариабельность геометрии тензорешетки и более высокую теплоотдачу.

Основными схемами подключения тензорезисторов (рисунок 1.11) в схему моста Уинстона являются «четверть моста», «полумост» и «полный мост» каждая из которых может выполняться двух, трех, пятипроводным подключением проводов [80, 82]. Подключение типа «четверть моста» является наиболее надежным и экономичным из-за малого количества проводов, но может быть использовано только в случае, когда температура окружающей среды в процессе испытаний практически не изменяется, иначе температурное изменение сопротивления проводов воспринимается измерительным устройством как деформация ОК.



Рисунок 1.11 – Схемы подключения тензорезисторов: а – «четверть моста», б – «полумост», в – «полный мост»

Схема «полумост» позволяет исключить температурные погрешности от нагрева конструкции и соединительных проводов, также позволяет получить удвоенную чувствительность. При подключении «полный мост» схема невосприимчива к температурным изменениям в датчиках, наклеенных на деталь, и к температурному изменению сопротивления соединительных проводов. Также позволяет получать до учетверенной чувствительности по сравнению со схемой «четверть моста», что зависит от уровня измеряемых деформаций каждым тензорезистором, от знака деформаций, а также от того, в какие плечи моста включены тензорезисторы [82].

Помимо основных типов тензорезисторов имеются их различные модификации в виде розеток, позволяющих проводить измерение сразу по нескольким осям. На рисунке 1.12 показаны некоторые из наиболее распространенных типов розеток. Все виды тензорезисторов имеют различную комбинацию преимуществ для применения в различных условиях в зависимости от конструкции и применяемых материалов, схем подключения. Однако из-за особенностей постоянно изменяющихся условий и схем нагружения секции механизированной крепи наиболее распространенные в качестве ПИП приклеиваемые металлофольговые тензорезисторы не позволяют в полной мере эффективно решать задачу оперативной оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции [76] вследствие достаточно низкой чувствительности. Особенно важным это является при построении СТП, так как из-за включения в измерительную цепь УЭ чувствительность датчика в целом снижается еще больше.



Рисунок 1.12 – Розетки тензорезисторов с различным числом решеток и разными углами между осями решеток: а – две решетки под углом 90°, б – три решетки под углом 45°, в – три решетки под углом 120°

Основной характеристикой чувствительности тензорезистора является его коэффициент тензочувствительности  $K_i$ , который напрямую зависит от материала, из которого изготавливается тензорешетка [82]. Как правило, используются такие материалы, как константан, карма, нихром, хромель, манганин и прочие [81]. При использовании таких классических материалов для тензорешетки коэффициент тензочувствительности тензорезисторов не превышает 2,5 единицы и зачастую требует усиления [49, 80, 107].

Известна достаточно хорошая альтернатива стандартным материалам тензорешетки в виде полупроводников. Некоторые полупроводниковые материалы, используемые для изготовления тензорезисторов, например кремний или германий, проявляют пьезоэлектрический эффект, при котором приложенная к материалу нагрузка вызывает значительное изменение его удельного сопротивления [83–85]. Эти тензорезисторы были получены в качестве побочного результата исследований фирмы Bell Telephone Laboratories в области полупроводниковых материалов и соединений, которые впоследствии привели к созданию транзистора [82]. Разработка отечественных полупроводниковых тензорезисторов в 1960-е годы производилась в Новосибирском электротехническом институте (ныне HГТУ), Московском энергетическом институте (МЭИ), Львовском политехническом институте и некоторых других научных школах. Первыми отечественными промышленными образцами были кремниевые тензорезисторы типов КТД, КТЭ, выпущенные Саранским заводом полупроводников. Эти образцы были созданы на базе «нэтисторов» – кремниевых тензорезисторов из кремния *n*- и *p*-типа с выводами из золота, разработанных в НЭТИ под руководством проф. А. Ф. Городецкого [86–90].

Полупроводниковые тензорезисторы имеют схожую структуру с металофольговыми тензорезисторами (рисунок 1.10), за исключением того, что вместо решетки чувствительным элементом является полупроводниковый кристалл в соответствии с рисунком 1.13.



Рисунок 1.13 – Полупроводниковые тензорезисторы: 1 – электроизоляционная подложка, 2 – полупроводниковый кристалл, 3 – луженые выводы

Благодаря значительному изменению удельного сопротивления полупроводников, такие тензорезисторы имеют  $K_i = 100-130$ , то есть обладают в 30–50 раз большей чувствительностью, чем фольговые и проволочные тензорезисторы [79, 80, 85, 91–92]. Поэтому они применяются в УЭ различных измерительных приборов [80].
Недостатком полупроводниковых тензорезисторов является большая зависимость  $K_i$  от температуры и его нелинейная характеристика [49, 80, 107]. Некоторые изготовители прилагают к своим полупроводниковым тензорезисторам индивидуально рассчитанные таблицы поправок, которые значительно облегчают потребителю оценку результатов измерений.

В целом полупроводниковые тензорезистры являются более высокотехнологичными устройствами со сложными характеристиками, чем металлофольговые, и в случае отсутствия справочных данных для конкретных моделей требуются дополнительные экспериментальные исследования. Также проведение таких исследований необходимо для разработки конструктивных и схемных решений исполнения ПИП, обеспечивающих линейности показаний [80, 94–95].

Тем не менее, использование в качестве ПИП даже высокочувствительных полупроводниковых тензорезисторов не позволяет обеспечить мобильность системы из-за невозможности их переустановки.

В отличие от тензорезисторов, которые приклеиваются и каждой точкой связаны с ОК, связь СТП с ОК напрямую зависит от геометрических параметров и конструкции УЭ, типа тензорезистора, качества подготовки поверхности, способа механической связи УЭ с поверхностью металлоконструкции элементов секции и воздействия внешних факторов на эту связь. Поэтому чувствительность и метрологические характеристики СТП не могут быть выше, чем у приклеенных тензорезисторов и напрямую зависят от комплексного влияния указанных факторов.

В связи с этим, важной задачей является исследование всех факторов, влияющих на выходные характеристики СТП, что требует проведения экспериментальных исследований влияния геометрических параметров конструкции упругого элемента, способа закрепления и характеристик тензорезистора на чувствительность СТП с учетом особенностей механизированных крепей как объекта контроля и методики проведения стендовых заводских испытаний.

37

#### 1.4 Выводы по главе 1

1. Для разработчиков и производителей механизированных крепей контроль фактических параметров нагруженности элементов металлоконструкций секции является важным этапом проверки проектных решений для обеспечения безопасности с учетом различных горнотехнических условий.

2. Для оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи на этапе заводских приемосдаточных стендовых испытаний получил наибольшее развитие и остается одним из наиболее перспективных тензометрический метод экспериментальной диагностики. Это связано с его универсальностью и относительно невысокой стоимостью, при этом метод позволяет длительное время проводить контроль деформаций и напряжений в наиболее нагруженных зонах конструкций.

3. Анализ функциональных и технических характеристик промышленных тензометрических систем с учетом требований ООО «Юргинский машзавод» показал, что совершенствование методики тензометрического контроля при оценке нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи необходимо проводить в направлении обеспечения мобильности ПИП.

4. Для обеспечения мобильности ПИП при оценке нагруженности серийно изготавливаемых металлоконструкций элементов механизированных крепей съемные тензометрические преобразователи на базе УЭ имеют преимущества перед приклеиваемыми тензорезисторами, так как могут неоднократно использоваться и переустанавливаться, обеспечивая возможность оперативной корректировки зоны измерения в процессе испытаний.

5. Чувствительность и метрологические характеристики СТП для контроля деформаций и напряжений элементов металлоконструкций секции напрямую зависят от геометрических параметров УЭ, способа закрепления УЭ на ОК и характеристик используемых тензорезисторов.

Таким образом, на основе проведенного анализа имеющихся работ в области исследований состояния металлоконструкций элементов секций механизированных крепей под действием нагрузок, современных представлений в области оценки состояния ответственных конструкций, опыта создания тензометрических систем и проектирования ПИП, а также нормативной документации поставлена цель работы – оценка нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выявить направления повышения эффективности оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи на основе анализа современных представлений в области оценки состояния ответственных конструкций с использованием тензометрического метода.

2. Обосновать состав и провести экспериментальные исследования параметров СТП для оценки деформаций элементов металлоконструкций секции механизированной крепи.

3. Разработать методику оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи и технические средства для её практической реализации.

4. Произвести оценку нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи в контрольных точках по разработанной методике с использованием СТП в лабораторных и заводских условиях и сопоставить с результатами оценки по заводской методике.

# ГЛАВА 2. Исследования характеристик элементов СТП для оценки нагруженности секции механизированной крепи

Как было показано в главе 1, для обеспечения мобильности тензометрической системы первичный преобразователь должен представлять собой СТП и включать в себя УЭ и тензопреобразователь активного сопротивления (тензорезистор), который изменяет свое электрическое сопротивление пропорционально деформациям УЭ, на который он наклеен.

Характеристики обоих элементов имеют значительное влияние на точность измерения деформаций и напряжений ОК. Также для повышения эффективности оценки нагруженности элементов секции при разработке и обосновании параметров СТП необходимо учитывать требования ООО «Юргинский машзавод» к элементам регистрирующей тензометрической системы (см. главу 1 п. 1.2).

Включение УЭ в измерительную цепь, как уже было отмечено выше, влечёт за собой значительное уменьшение коэффициента преобразования измерительной системы.

Коэффициент преобразования канала любой тензометрической системы представляется [33, 40] в виде

$$K = K_i \cdot K_{\kappa a \mu}, \qquad (2.1)$$

где *К<sub>i</sub>* – коэффициент тензочувствительности СТП;

*К<sub>кан</sub>* – коэффициент преобразования информации канала тензометрической системы.

Как видно из формулы, коэффициент преобразования информации канала можно повысить за счет увеличения либо коэффициента преобразования информации канала, либо коэффициента тензочувствительности СТП. Повышение чувствительности тензосистемы за счет увеличения коэффициента преобразования канала  $K_{\kappa a \mu}$  приводит к возрастанию уровня шумов, в результате возникают сложности обработки данных, повышается погрешность измерения напряжений и деформаций. В связи с этим повышение коэффициента тензочувствительности СТП

является наиболее предпочтительным направлением для повышения чувствительности тензосистемы в целом. Поэтому, как уже было отмечено ранее, необходимо детально исследовать влияние характеристик тензорезистора, геометрических параметров конструкции УЭ и способа закрепления УЭ на характеристики СТП.

#### 2.1. Исследование параметров тензорезистора СТП

Как было отмечено в (п. 1.3.1), в значительной степени повысить чувствительность СТП для оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи позволяет использование тензорезисторов на основе полупроводниковых материалов [79, 80, 83, 84, 91, 92].

Крупнейшими мировыми производителями тензорезисторов являются компании HBM, Zemic и KYOWA. При этом в каталогах HBM и Zemic полупроводниковые тензорезисторы не представлены [96, 97].

В России датчики с использованием полупроводниковых тензорезисторов изготавливает компания Zetlab [98], однако для их изготовления закупают за рубежом пластины из германия в качестве комплектующих для исследовательских нужд. Только к середине 2014 года на рынке появилось оборудование российской компании SmS sensor [81], выпускающей полупроводниковые тензорезисторы на основе кремния и сульфида самария.

На момент проведения основных экспериментальных исследований для приобретения в РФ были наиболее доступны тензорезисторы фирмы KYOWA, производства Японии. Поэтому для использования в составе СТП для измерения деформаций элементов металлоконструкций секции механизированной крепи были выбраны кремниевые тензорезисторы модели KSP-6-350-E4 [99].

Полупроводниковые тензорезисторы KSP (таблица 2.1.), как и любые другие полупроводники, имеют ряд недостатков, значительно влияющих на результаты измерений, что может приводить к погрешностям при измерении деформаций [100]. К таким недостаткам относятся нелинейная характеристика изменения сопротивления от деформации и температуры, которая производителем указанных тензорезисторов подробно не предоставляется. Необходимость компенсации указанных недостатков полупроводниковых тензорезисторов на этапе обработки данных при заводских испытаниях секции потребовала провести детальные исследования основных характеристик тензорезисторов KSP при нагружении.

Характеристика	Единицы изм.	Наименование/Значение
Тип	_	одноосевые
Термокомпенсация	_	без термокомпенсации
Коэффициент тензочувствительности	_	~ 120
Размер подложки	ММ	13×5
Длина решетки	MM	6
Длина выводов	MM	25
Номинальное сопротивление	Ом	350
Диапазон рабочих температур	°C	-50+150

Таблица 2.1 – Основные характеристики тензорезисторов типа KSP-6-350-E4

Совместно со специалистами ФГУП «СибНИА им. С. А. Чаплыгина» (г. Новосибирск) были проведены экспериментальные исследования по определению основных технических характеристик полупроводниковых тензорезисторов KSP-6-350-E4 и сравнению их с характеристиками проволочных тензорезисторов [93].

В [76, 93, 101–104] представлены разработки и исследования автора, проведенные с использованием кремниевых полупроводниковых тензорезисторов для микродеформаций типа KSP-6 без температурной самокомпенсации, KSN-6 и KSN-2 с температурной самокомпенсацией и номинальными значениями сопротивления 120–350 Ом фирмы KYOWA. Тензочувствительность таких тензорезисторов составляет  $K_m \leq (130...150)$ . Использование термокомпенсированных полупроводниковых тензорезисторов позволяет уменьшить дрейфовые параметры при влиянии температурного фактора, но их стоимость выше.

В процессе экспериментальных исследований характеристик анализируют не абсолютные, а относительные значения деформаций материала ОК. Поскольку нагружение при исследованиях кратковременно и за малый промежуток времени температура ОК существенно не изменяется, то для исследований использовались менее дорогие нетермокомпенсированные полупроводниковые тензорезисторы KSP-6-350-E4.

#### 2.1.1 Оборудование и методика исследований

Исследования проводились в соответствии с ГОСТ 21616-91 на сертифицированном оборудовании – установке для градуировки приклеиваемых тензорезисторов [105] на базе ФГУП «СибНИА им. С. А. Чаплыгина» (Новосибирск) (рисунок 2.1). Данная установка представляет собой устройство для определения деформаций в балках постоянного прямоугольного сечения, нагружаемых по схеме чистого изгиба (сертификат RU.E.28.007.А № 27992, установка зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений № 34927-07). В установку входят: механизм создания нагрузки 1, градуировочная балка 2, прогибомер 3, тензометр 4, регистрирующий прибор 5 (рисунок 2.1). Принцип действия заключается в следующем. Градуировочную балку 2 с наклеенными на нее тензорезисторами нагружают постоянным изгибающим моментом. Наклеенные тензорезисторы получают удлинение вместе с поверхностным слоем градуировочной балки. С помощью прогибомера 3 измеряется изгиб балки в середине ее длины и по прогибу рассчитывается относительная деформация поверхности градуировочной балки. С помощью тензометра определяется неравномерность изгиба балки, по прогибу рассчитывают относительную деформацию наклеенных тензорезисторов.

Регистрирующий прибор прогибомера 3 – индикатор часового типа с ценой деления 1 мкм. Тензометр 4 – градуировочная балка 2 с 20 наклеенными специаль-

ными фольговыми тензорезисторами с номинальным сопротивлением 200 Ом. Регистрирующий прибор 5 – многоканальная микропроцессорная тензометрическая система ММТС-64.01. (свидетельство RU.C.34. 007.А № 44412, регистрационный № 21760-01, тип средств утвержден Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии от 08.11.2011 г. № 6295).



Рисунок 2.1 – Эталонная установка для градуировки тензорезисторов

Для испытаний использовались четыре полупроводниковых тензорезистора типа KSP-6-350-Е4 сопротивлением R = 332 Ом (рисунок 2.2 б) и для проведения сравнительного анализа – четыре проволочных тензорезистора типа ПКС сопротивлением R = 200 Ом производства ФГУП «СибНИА им. С. А. Чаплыгина» (сертификат RU.C.28.007.А № 30935, зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 37343-08) (рисунок 2.2 а). Перед проведением эксперимента были выполнены некоторые подготовительные операции. Необходимость в них была вызвана тем, что диапазон измеряемых сопротивлений в тензосистеме ММТС-64.01 составлял (0...200) Ом, номинальное сопротивление проволочных тензорезисторов находилось в пределах (200...201) Ом, а полупроводниковых тензорезисторов KSP – в пределах (330...350) Ом. Поэтому для сокращения раз-

броса в диапазонах измерения тензосистемы ММТС-64.01 параллельно полупроводниковому тензорезистору подключалось сопротивление R = 100 Ом (рисунок 2.3 а).

Главные оси наклеенных тензорезисторов располагались параллельно продольной оси балки (рисунок 2.3 а, б). Допускаемое отклонение осей тензорезисторов от продольной оси балки составило не более ± 1,5°. Контроль отклонения оси каждого тензорезистора осуществлялся специальным шаблоном.



Рисунок 2.2 – Внешний вид тензорезисторов: а – проволочный типа ПКС; б – полупроводниковый не термокомпенсированный KSP-6-350-E4



Рисунок 2.3 – Установка тензорезисторов на градуировочной балке: а – шунтирование тензорезистора KSP, б – расположение тензорезисторов

При проведении сравнительных испытаний у проволочных и полупроводниковых тензорезисторов определялись следующие основные характеристики:

- статическая характеристика преобразования тензорезистора;

- коэффициент тензочувствительности;
- чувствительность при различной силе тока питания;
- ползучесть;
- температурная стабильность;
- соотношение «сигнал/шум» при исследовании динамических характеристик.

## 2.1.2 Исследование основных характеристик полупроводникового тензорезистора KSP

Измерение статических характеристик и коэффициента тензочувствительности.

Для измерения статических характеристик преобразования тензорезисторов изменение прогиба балки выполнялось ступенями в диапазоне от – 1 мм до + 1 мм и контролировалось прогибомером, после чего при каждом нагружении рассчитывалась относительная деформация *є*.

Зависимости между относительной деформацией є наклеенного тензорезистора, геометрическими размерами градуировочной балки и ее прогибами определялись по формулам 2.2 и 2.3.

При установке прогибомера на вогнутой стороне балки:

$$\varepsilon = \frac{4(h+2\Delta h)}{(L^2+4f^2+4f\cdot h)} \cdot f.$$
(2.2)

При установке прогибомера на выпуклой стороне балки:

$$\varepsilon = \frac{4(h+2\Delta h)}{(L^2+4f^2-4f\cdot h)} \cdot f, \qquad (2.3)$$

где *є* – относительная деформация;

*f* – прогиб балки, мм;

*h* = 30 мм – толщина балки;

 $\Delta h = 0,1$  мм — расстояние от поверхности балки до середины чувствительного элемента тензорезистора;

L = 450 мм - 6аза прогибомера.

Результаты измерений и рассчитанные относительные деформации  $\varepsilon$  представлены в таблице 2.2.

Прориб f	Дефор-	Сопротив	вление R <sub>ij</sub> ,	Измерительные коды системы						
прогио $j_i$ ,	мация	Ο	Μ	MMTC-64.01 N <sub>ij</sub>						
ММ	$\varepsilon_i \cdot 10^{-6}$	KSP1	ПКС 1	ПКС 1	ПКС 2	ПКС 3	ПКС 4	KSP1		
-1	-597	307,249	199,669	-893	-823	-773	-902	-767		
-0,9	-537	309,718	199,695	-855	-784	-735	-863	-673		
-0,8	-477	312,187	199,72	-817	-744	-696	-823	-579		
-0,7	-418	314,655	199,745	-780	-704	-659	-786	-486		
-0,6	-358	317,124	199,769	-742	-664	-621	-748	-392		
-0,5	-299	319,593	199,796	-703	-625	-582	-709	-300		
-0,4	-239	322,071	199,82	-664	-586	-543	-669	-208		
-0,3	-179	324,522	199,845	-626	-547	-504	-631	-118		
-0,2	-119	326,989	199,869	-588	-507	-464	-593	-28		
-0,1	-60	329,478	199,896	-549	-466	-426	-555	63		
0	0	332,010	199,921	-510	-425	-387	-517	154		
0,1	60	334,537	199,954	-472	-386	-348	-478	235		
0,2	119	337,075	199,979	-433	-347	-309	-439	316		
0,3	179	339,591	200,005	-394	-308	-270	-400	403		
0,4	239	342,125	200,029	-355	-269	-231	-361	490		
0,5	299	344,672	200,055	-317	-230	-192	-322	576		
0,6	358	347,259	200,08	-278	-190	-153	-283	661		
0,7	418	349,806	200,105	-240	-151	-114	-244	747		
0,8	477	352,356	200,13	-201	-112	-75	-205	832		
0,9	537	354,881	200,155	-163	-73	-36	-166	916		
1	596	357,426	200,181	-124	-34	3	-127	1000		

Таблица 2.2 – Изменение сопротивления и измерительных кодов системы от прогиба градуировочной балки и деформации є

На рисунке 2.4 приведены статические характеристики преобразования для тензорезисторов типа ПКС и КSP, полученные при работе с быстродействующей микропроцессорной тензометрической системой ММТС-64.01 [40, 105]. Анализ зависимостей изменения сопротивления тензорезистора от величины прогиба балки (рисунок 2.4 a, 2.4 б) позволил определить, что изменение сопротивления тензорезистора типа ПКС составляет 0,259 Ом на величину прогиба в 1 мм. Для тензорезистора типа КSP на эту же величину прогиба балки это изменение сосставило 25,052 Ом. Далее по полученным экспериментальным результатам определялись коэффициенты тензочувствительности проволочных и полупроводниковых тензорезисторов (таблица 2.3).

Расчет коэффициента тензочувствительности *K<sub>i</sub>* для *i*-го тензорезистора проводился по формуле:

$$K_{i} = \frac{\frac{(N_{\max i} - N_{0i})}{K_{npi}} + (R_{0i} - R_{ni})}{R_{ni} \cdot \varepsilon_{\max}}, \qquad (2.4)$$

где *N<sub>maxi</sub>* – значение кода измерительной тензосистемы для *i*-го тензорезистора при максимальной деформации;

*N*<sub>0*i*</sub> – значение кода измерительной тензосистемы для *i*-го тензорезистора на разгруженной балке;

*є<sub>тах</sub>* – максимальная относительная деформация;

*К<sub>прі</sub>* – коэффициент преобразования для *i*-го канала измерительной тензосистемы, ед.кода/Ом.

Для оценки разброса начального сопротивления тензорезисторов в партии от номинального значения, определялось относительное отклонение  $\delta_i$  сопротивления каждого тензорезистора с учетом его начального сопротивления, когда балка еще не нагружалась:

$$\delta_{i} = \left| \frac{R_{\mu i} - R_{0i}}{R_{0i}} \right| \cdot 100\%, \qquad (2.5)$$



 $R_{0i}$  – начальное сопротивление тензорезистора при ненагруженной балке.



Рисунок 2.4 – Статическая характеристика преобразования: а – для тензорезисторов типа ПКС; б – для тензорезисторов типа КSP

В таблице 2.3 приведены рассчитанные характеристики для исследуемых тензорезисторов: отклонения сопротивлений проволочных ПКС и полупроводни-

ковых KSP тензорезисторов  $\Delta R_i$  в партии от сопротивления  $R_{hi}$  при нагруженной балке и коэффициенты тензочувствительности  $K_i$ .

Анализируя результаты, приведенные в таблице 2.3, можно отметить, что коэффициент тензочувствительности у полупроводниковых тензорезисторов типа KSP выше, в сравнении с аналогичным показателем у проволочных тензорезисторов типа ПКС более чем в 59 раз.

Параметры	ПКС1	ПКС2	ПКС3	ПКС4	KSP1	KSP2	KSP3	KSP4	
Начальное сопротивле-	199.92	200.07	200.00	200.01	332.00	333,06	331,85	331,09	
ние тензодатчика, Ом	177,92	200,07	200,00	200,01	332,00				
Максимальное относи-									
тельное отклонение со-	0.039	0.034	0,000	0.005	0.000	0318	0.044	0274	
противления в партии	0,037	0,004	0,000	0,005	0,000	0,318	0,044	0,274	
от номинального, %									
Коэффициент тензо-									
чувствительности	2,19	2,16	2,18	2,16	128,54	127,00	129,24	129,38	
$K_i$									
Среднее значение ко-									
эффициента тензочув-		2	17		128 54				
ствительности		۷,	17		120,04				
K <sub>icp</sub>									
Среднее квадратиче-									
ское отклонение коэф-		00	1/16		10016				
фициента тензочувст-		0,0	1-10		1,0910				
вительности, $S_k$									

Таблица 2.3 – Отклонения сопротивлений и коэффициентов тензочувствительности тензорезисторов в партии от номинальных значений

При этом относительные значения среднего квадратического отклонения коэффициента тензочувствительности проволочных и полупроводниковых тензорезисторов сопоставимы и равны 0,67 % и 0,84 %, соответственно. Следовательно, использование полупроводиковых тензорезисторов позволяет существенно повысить чувствительность тензосистемы при незначительном разбросе коэффициента тензочувствительности.

Измерение чувствительности проволочных и полупроводниковых тензорезисторов при различной силе тока питания.

Для испытаний использовались три значения тока питания: 6,6 мА; 9,1 мА; 14,5 мА (рисунок 2.5, 2.6).

На рисунках 2.5 и 2.6 представлены зависимости выходного напряжения тензорезисторов от нагрузки, прикладываемой к градуировочной балке, при различных значениях силы тока.

Из полученных характеристик видно, что тензорезисторы при различной силе тока обладают линейными характеристиками, близкими к идеальным. При этом чувствительность их пропорциональна силе тока. Следовательно, погрешности от саморазогрева тензорезисторов, вызванные протекающими по ним токами, в выбранном диапазоне измерений малы.



Рисунок 2.5 – Зависимость выходного напряжения от нагрузки при различной силе тока для проволочных тензорезисторов типа ПКС



Рисунок 2.6 – Зависимость выходного напряжения от нагрузки при различной силе тока для полупроводниковых тензорезисторов KSP

**Испытания на ползучесть** проволочных и полупроводниковых тензорезисторов проводилось при нагружении балки до деформации  $\varepsilon_{\mu} = \pm 477$  за время не более 60 с. Зарегистрированный прогиб балки составлял  $\pm 0,8$  мм. Затем в течение последующих 60 с регистрировали сопротивления проволочных и полупроводниковых тензорезисторов при деформациях растяжения и сжатия. После этого проводили измерения сопротивлений проволочных и полупроводниковых тензорезисторов при деформациях и сжатия через  $\Delta \tau = 60$  мин. Значения измеренных кодов приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Значения измеренных кодов для определения ползучести тензорезисторов

Время,	Прогиб,	Парам	ПКС1	пкс2	ПКС3	ПКС4	KSP1	KSP2	KSP3	KSP4
МИН	ММ	Tupum.		11102	11100	inte i		1101 2	11010	
0	0,8	N <sub>ipacm</sub>	1399	1545	1478	1485	1160	1213	1158	1110
60	0,8	N <sub>i1pacm</sub>	1403	1550	1481	1486	1160	1213	1159	1111
0	-0,8	$N_{icxam}$	990	1142	1068	1083	-1241	-1165	-1253	-1305
60	-0,8	N <sub>i1cəkam</sub>	991	1143	1069	1086	-1240	-1165	-1252	-1305

После этого были рассчитаны абсолютные значения сопротивлений в начале и в конце испытаний как:

$$R_{i} = \frac{N_{i} - N_{0i}}{K_{yci}} + R_{\mu i}$$
(2.6)

Абсолютные значения сопротивлений проволочных и полупроводниковых тензорезисторов при прогибе балки на  $\pm 0,8$  мм в моменты времени  $\tau_1 = 0$  мин. и  $\tau_2 = 60$  мин. приведены в таблице 2.4.

По полученным экспериментальным данным рассчитывалась относительная ползучесть  $\Pi_{\tau}$  проволочных и полупроводниковых тензорезисторов

$$\Pi_{\tau} = \left\{ \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\tau} - \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{0}}{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{0}} \right\} \cdot 100\%, \qquad (2.7)$$

где  $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_0$  – относительное изменение сопротивления тензорезистора, измеренное сразу после нагружения балки;

 $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\tau}$  – относительное изменение сопротивления тензорезистора, измеренное по истечение времени  $\tau$  после окончания нагружения балки;

 $\Delta R = (R_i - R_0)$  — приращение сопротивления *i*-го тензорезистора после нагружения балки;

 $R_0$  – сопротивление тензорезистора при разгруженной балке;

*R<sub>i</sub>* – сопротивление тензорезистора в момент нагружения балки;

 $\Delta R_{\tau} = (R_{i\tau} - R_0) -$  приращение сопротивления *i*-го тензорезистора после нагружения балки через промежуток времени  $\tau$  от начала нагружения;

 $R_{i\tau}$  – сопротивление тензорезистора при нагруженной балке, измеренное через промежуток времени  $\tau$  от начала нагружения.

Результаты испытаний проволочных и полупроводниковых тензорезисторов на ползучесть приведены в таблице 2.5. На рисунке 2.7 показано изменение сопротивления проволочного (а) и полупроводникового (б) тензорезисторов от времени при прогибе градуировочной балки на 0,8 мм. За время испытаний показания проволочных тензорезисторов типа ПКС находились в диапазоне значений от – 2 мОм до + 3,6 мОм. При этом показания полупроводникового тензорезистора типа KSP изменялись от – 6,3 мОм до + 5 мОм.

Из представленных результатов следует, что ползучесть у полупроводниковых нетермокомпенсированных тензорезисторов KSP более чем в два раза выше, чем у проволочных тензорезисторов типа ПКС. Таким образом, тензорезисторы типа ПКС более стабильны по времени, чем тензорезисторы KSP.



Рисунок 2.7 – Зависимость изменения сопротивления тензорезисторов от времени при прогибе градуировочной балки на 0,8 мм: а – для тензорезисторов типа ПКС;

б – для тензорезистора типа КSP

Параметр	ПКС1	ПКС2	ПКС3	ПКС4	KSP1	KSP2	KSP3	KSP4
Ползучесть,								
10 <sup>-3</sup> %	2,25	2,70	2,54	2,04	1,52	2,66	4,49	5,92
(растяжение)								
Ползучесть,								
10 <sup>-3</sup> %	2,60	2,22	2,37	1,61	4,44	2,84	2,46	1,98
(сжатие)								

Таблица 2.5 – Значения ползучести для проволочных и полупроводниковых тензорезисторов

Кроме того, при анализе данных предварительных испытаний на ползучесть, при которых прогиб балки изменялся ступенями по 0,2 мм в диапазоне от –2 мм до +2 мм, выяснилось, что полупроводниковый тензорезистор имеет нелинейность по изменению выходного кода системы ММТС-64.01 (сопротивления) от величины прогиба балки. На рисунке 2.8 показана зависимость изменения сопротивления тензорезисторов от величины прогиба балки.



Рисунок 2.8 – Изменение сопротивления тензорезисторов от деформации градуи-

ровочной балки

Как видно из графиков на рисунке 2.8, для проволочных тензорезисторов типа ПКС сопротивление при изменении величины прогиба балкм на всем диапазоне от –2 мм до +2 мм не изменялось и в среднем составляло 30 мОм.

Для полупроводникового тензорезистора типа KSP наблюдается неравномерность изменения сопротивления от величины прогиба балки. Например, при сжатии при изменении прогиба от величины –1,8 мм до –2 мм выходное сопротивление изменилось на 1379 мОм, а при растяжении при изменении прогиба от величины +1,8 мм до +2 мм, выходное сопротивление изменилось на 1033 мОм.

Таким образом, при обработке результатов измерений для полупроводникового тензорезистора необходимо вводить поправочный коэффициент, который зависит от абсолютного значения деформации элемента металлоконструкции секции механизированной крепи.

#### Исследование влияния температуры

Для изучения влияния температуры на сопротивление тензорезисторов балка с наклеенными тензорезисторами помещалась в термокамеру. На тарировочную титановую балку были наклеены 8 тензорезисторов (№ 1–4 типа ПКС, № 5–8 типа KSP).

Главные оси тензорезисторов 1–4 и 6–8 располагались параллельно продольной оси балки, а у тензорезистора 5 – перпендикулярно. Информация с тензорезисторов поступала в быстродействующую тензосистему «Динамика-1» (свидетельство RU.C.34.007.A № 44411, регистрационный номер № 3288506, тип средства измерений утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8.11.2011 г. № 6295).

Исследования проводились через 10 °C в температурном диапазоне от 0 °C до + 45 °C. Изменения сопротивления от температуры для проволочных и полупроводниковых тензорезисторов показаны на рисунках 2.9 a, 2.9 б.



Рисунок 2.9 – Зависимости сопротивления тензорезисторов от температуры: а – для проволочных тензорезисторов типа ПКС (1–4), б – для полупроводниковых тензорезисторов KSP-6-350 (5–8)

При изменении температуры у тензорезисторов типа ПКС (рисунок 2.9 a) происходит уменьшение сопротивления на 0,1 Ом.

Дальнейший анализ показал, что при изменении температуры сопротивление тензорезисторов типа KSP увеличивается в среднем на 15 Ом. Тем не менее, проводить испытания, во время которых наблюдается большой градиент изменения температур на полупроводниковых тензорезисторах типа KSP не рекомендуется. Для этого предпочтительно использовать модели тензорезистора с температурной самокомпенсацией, например KSN, при измерении использовать термопару и исключать погрешность на этапе обработки данных поправочным коэффициентом.

#### Измерение динамических деформаций

Как было отмечено выше, для перспективы развития темы важно было определить возможности работы KSP для фиксации быстропротекающих процессов, например динамического нагружения или ударной нагрузки.

Для создания динамических деформаций был использован обрезиненный стальной шарик массой 20 г. Шарик бросали на балку с высоты 1 м. На рисунке 2.10 показан вид сигнала на выходе измерительной системы при имитации ударной деформации тарировочной балки путем бросания металлического шарика. Уровень сигнала с тензорезистора типа ПКС незначительно превышает уровень шумов, а сигнал с тензорезистора типа KSP обладает ярко выраженной высокочастотной составляющей.

В результате исследований установлено, что в случае динамического воздействия при пересчете в единицы деформации регистрируемый переходный процесс соизмерим как для проволочного, так и для полупроводникового тензорезистора (рисунки 2.11 а, б). Однако уровень шума в сигналах с малой амплитудой у полупроводникового тензорезистора KSP (рисунок 2.11 а) значительно меньше, чем у проволочного ПКС, у которого присутствует значительная шумовая составляющая – до 40 % полезного сигнала. Следовательно, полупроводниковые тензорезисторы имеют лучшее соотношение «сигнал / шум», что делает их более предпочтительными при исследовании динамических и ударных процессов.



Рисунок 2.10 – Зависимость выходного сигнала проволочного и полупроводникового тензорезисторов от времени при ударе шара по градуировочной балке



б

Рисунок 2.11 – Зависимость деформации от времени при ударе шара по тарировочной балке, измеренной по показаниям: а – полупроводникового тензорезистора KSP, б – проволочного тензорезистора ПКС

Таким образом, показана возможность использования полупроводникового тензорезистора для регистрации деформаций, в том числе в условиях быстропротекающих процессов.

В результате исследований установлено, что коэффициент тензочувствительности у полупроводниковых тензорезисторов KSP-6-350 составляет 128,54; погрешности от саморазогрева, вызванные протекающими по ним токам, в выбранном диапазоне измерений малы. Характеристика ползучести удовлетворительная, уровень шума в сигналах с малой амплитудой низкий, что позволяет в дальнейшем использовать их для регистрации динамических процессов. Показано, что для измерения деформации в металлоконструкциях элементов секции механизированной крепи для компенсации нелинейности требуется введение поправочного коэффициента, зависящего от абсолютного значения деформации ОК и температуры.

### 2.2 Исследование влияния конструкции и геометрических параметров упругого элемента на чувствительность СТП

Для УЭ определяющими факторами, влияющим на *K<sub>i</sub>* в выражении (2.1) являются геометрические параметры и способ закрепления на секции механизированной крепи.

К конструкции и геометрическим параметрам УЭ СТП для оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепей предъявляются следующие стандартные требования [75–78]:

- в месте наклейки тензорезистора должен обеспечиваться высокий уровень деформации УЭ для достаточной тензочувствительности;

- УЭ должен максимально точно и надежно прилегать к исследуемой поверхности без возможности смещения;

- УЭ должен обладать достаточной жесткостью. При прочих равных условиях, чем жестче элемент, тем выше его метрологические качества;

- крепление должно позволять оперативно переустанавливать УЭ без нарушения целостности ОК;

- конструкция крепежных элементов должна быть по возможности проста и иметь минимум элементов.

На основании расчетов зон наибольших напряжений и деформаций металлоконструкций на стадии проектирования элементов секции предприятием «Юргинский машзавод» для модели МКЮ.2У-07/19 определены расчетные контрольные зоны установки датчиков для стендовых испытаний. Датчики устанавливаются на поверхности в защищенном пространстве крепи с возможностью доступа, настройки и обслуживания, как показано на рисунке 1.6. По результатам все 64 контрольные зоны расположены на плоских поверхностях металлоконструкций элементов секции, что является важным для обоснования геометрии и проектирования СТП.

Для определения типа УЭ СТП, наиболее удовлетворяющего данным условиям, требованиям ООО «Юргинский машзавод» и особенностям ОК, на испытательном стенде, разработанном автором в Кузбасском государственном техническом университете им. Т.Ф. Горбачева (см. главу 3 п.3.2.1), с 2008 по 2011 год были изготовлены и предварительно испытаны конструкции УЭ датчиков консольного, рамного и арочного типа (см. таблицу 1.2) [76, 101–103]. Результаты этих исследований показали, что с точки зрения возможности разработки простого и надежного способа закрепления УЭ на плоской поверхности металлоконструкций элементов секции механизированной крепи без повреждения её целостности из вышеописанных конструкций наиболее приемлемой является конструкция арочного типа [76]. Преимущества и достоинства упругих элементов арочного типа также исследованы и подтверждены в лаборатории мостовых конструкции СГУПС [106] проведенных при испытании системы «Тензор-08.128» (см. главу 1 п. 1.2).

Чувствительность УЭ в общем виде характеризуется уровнем деформаций в зоне установки тензорезисторов при одинаковых деформациях ОК. Поэтому, с целью выявления геометрических параметров арочного УЭ, обеспечивающих максимальную чувствительность СТП, были проведены исследования влияния конфигурации УЭ на уровень деформаций в зоне установки тензорезистора [78]. При этом следует учитывать, что при использовании чувствительного элемента на основе полупроводников существенным становится тщательный выбор геометрии УЭ, так как с использованием тех или иных конструктивных решений имеется возможность обеспечить линейность показаний СТП [80, 85, 94, 95].

### 2.2.1 Влияние геометрических параметров упругого элемента СТП на уровень деформации в зоне установки тензорезистора

Для расчета геометрических параметров моделей УЭ использовался метод конечных элементов. Современные САD системы позволяют методом конечных элементов исследовать отклик моделируемой физической системы на изменения ее параметров в виртуальной среде [108–114]. В работе для решения пространственной задачи механики деформируемого твёрдого тела в виде УЭ СТП использован автоматизированный программный комплекс SolidWorks [109–114].

Объектом исследования являлась арочная конструкция УЭ. Арочный тип УЭ, как и кольцевой, позволяет регистрировать меньшие предельные нагрузки, чем стержневой тип, однако такая конструкция имеет ряд достоинств: небольшую высоту, достаточную жесткость, малую восприимчивость к поперечной составляющей нагрузки [77]. Характеристики УЭ данного типа в виде выражений для расчета коэффициента нелинейности, коэффициента преобразования *К*<sub>nn</sub> представлены в таблице 1.2.

Основными элементами УЭ арочного типа являются монтажные площадки и свод арки с наклеенными тензорезисторами в области измерения относительных деформаций (рисунок 2.12).

Основными геометрическими параметрами, определяющими конфигурацию УЭ являются: тип свода арки круглый (рисунок 2.12 а) или вогнутый (рисунок 2.12 б), ширина поперечного сечения B, высота поперечного сечения h, база элемента L, высота свода H, а также радиусы сопряжения монтажной площадки и свода –  $r_1$  и радиус сопряжения дуг свода  $r_2$  для вогнутой арки.

Как правило, подход к назначению геометрических параметров УЭ – минимизация, однако для оперативного обследовании крупногабаритных конструкций, таких как секция механизированной крепи, СТП с большей базой позволяет локализовать зону повышенных напряжений за меньшее количество переустановок, после чего производить подробный анализ локализованной зоны с меньшей базой.



Рисунок 2.12 – Общий вид арочного упругого элемента: а – с круглым сводом (вид спереди), б – с круглым сводом (вид сбоку), в – с вогнутым сводом (вид спереди), г – с вогнутым сводом (вид сбоку)

Исходя из этого, для моделирования опытных образцов УЭ выбрана база L = 100 мм и высота H = 10 мм, что обусловлено обеспечением линейности значений измеряемых деформаций и деформаций в зоне установки тензорезистора, а также шириной самого тензорезистора KSP, которая составляет 5 мм. Согласно результатам моделирования, с использованием менее габаритных моделей тензорезисторов возможно уменьшить базу до 60 %.

Исследования проводились в два этапа. На первом этапе варьировались такие параметры, как тип свода арки, радиусы сопряжений  $r_1$ ,  $r_2$  и ширина поперечного сечения *B* (таблица 2.6). База *L* и высота свода *H* оставались постоянными для всех конфигураций. На втором этапе варьировался радиус сопряжения дуг

63

свода *r*<sub>2</sub>, и исследовалось его влияние на уровень деформаций при постоянном значении растягивающей силы.

Граничные условия расчетной модели установлены следующим образом: запрет всех смещений для одной из монтажных площадок (неподвижная опора), для противоположной площадки возможно продольное перемещение без вращения (кулиса) и приложена постоянная растягивающая сила в 1 H, которая соответствует значениям области упругой работы металла при указанных параметрах модели. Материал упругий изотропный с параметрами модуля упругости  $E = 2.07 \cdot 10^5$  МПа и коэффициента Пуассона  $\mu = 0.28$ .

Полученные результаты расчета МКЭ реакции моделей арочных УЭ на постоянную приложенную силу приведены в таблице 2.6, где представлены данные расчета нескольких наиболее показательных конфигураций УЭ разных видов арок, их геометрические параметры и значения максимальных эквивалентных деформаций в зоне установки тензорезистора при воздействии силы на монтажную площадку, а также на рисунках 2.13 и 2.14, где представлено распределение эквивалентных деформаций для выбранных конфигураций УЭ.

Конфигурация № 1 имела следующие параметры: высота арки H = 10 мм, ширина поперечного сечения постоянная по длине и равна B = 10 мм. На рисунке 2.13 (№ 1) показано распределение эквивалентных деформаций для данной конфигурации УЭ. Максимальное значение эквивалентных деформаций  $\varepsilon = 43$ , наблюдается в замковом сечении свода арки.

Для проверки влияния формы перехода от монтажной площадки до свода была рассчитана конфигурация № 2 с радиальным сопряжением свода арки и монтажной площадкой радиусом  $r_1$ . Высота арки H = 10 мм, ширина поперечного сечения постоянная по длине и равна B = 10мм, радиус сопряжения  $r_1 = 2$  мм. Распределение эквивалентных деформации данной конфигурации УЭ показано на рисунке 2.13 (№ 2). Значение эквивалентных деформаций  $\varepsilon$  существенно не изменилось и составило 42.

N⁰	Общий вид УЭ	<i>L</i> , мм	Н, мм	В, мм	<i>h</i> , мм	<i>r</i> <sub>1</sub> , MM	<i>r</i> <sub>2</sub> , MM	Деформация,
1		100	10	10	0,5	_	_	43
2		100	10	10	0,5	2	-	42
3		100	10	10	0,5	_	_	40
4		100	10	10	0,5	_	_	32
5	<b>1r</b> <sub>2</sub>	100	10	10	0,5	_	2	31
6		100	10	105	0,5	_	8	70

Таблица 2.6–Зависимость эквивалентных деформаций в зоне установки тензорезистора от параметров арки УЭ

Следующая конфигурация  $\mathbb{N} \ge 3 - \mathbb{V} \ni \mathbb{C}$  прямой и вогнутой аркой без радиального сопряжения грани имела параметры: высота арки H = 10 мм, ширина поперечного сечения постоянная по длине и равна B = 10мм. Распределение эквивалентных деформации конфигурации  $\mathbb{V} \ni \mathbb{N} \ge 3$  показано на рисунке 2.13 ( $\mathbb{N} \ge 3$ ). Наблюдается значительно больший уровень эквивалентных деформаций к вершине свода именно на половине длины базы  $\mathbb{V} \ni \mathbb{C}$  вогнутой аркой. Однако максимальные значения  $\varepsilon$  также не превысили 40.

Реакция профиля УЭ с вогнутой аркой на смещение монтажной площадки была проверена конфигурациями УЭ № 4 и № 5, которые имели форму вогнутой арки. Отличие заключалось в наличии и отсутствии радиального сопряжения дуг свода радиусом  $r_2$ . Высота арки H = 10 мм, ширина поперечного сечения постоянная по длине и равна B = 10 мм. Для конфигурации УЭ № 5 радиус сопряжения дуг свода  $r_2 = 2$  мм. Распределение эквивалентных деформаций конфигураций УЭ № 4 и № 5 показаны соответственно на рисунке 2.14 (№ 4) и 2.14 (№ 5).

Согласно [77], исполнение поперечного сечения арочного УЭ также может быть как постоянным, так и переменным, что, безусловно, влияет на результаты расчета. Поэтому был произведен расчет нескольких конфигураций УЭ с переменной шириной поперечного сечения *B*.





Рисунок 2.13 – Распределение эквивалентных деформаций є конфигураций

арочных УЭ № 1-№ 3





Рисунок 2.14 — Распределение эквивалентных деформаций  $\varepsilon$ конфигураций

арочных УЭ № 4-№ 6

В результате выявлено (таблица 2.6, рис. 2.14), что максимальные эквивалентные деформаций в зоне установки тензорезистора имеет модель УЭ переменного сечения в виде вогнутой арки с радиальным сопряжением дуг свода. Модель  $N_{\rm P}$  6 имеет высоту H = 10 мм и уменьшенное поперечное сечения свода от монтажных площадок к вершине до половины ширины элемента B/2 = 5 мм, так как ширина тензорезистора KSP составляет 5 мм. При этом сохраняется линейная зависимость между перемещением монтажной площадки и деформациями в сечении вершины свода арки. Распределение эквивалентных деформаций конфигурации арочного элемента  $N_{\rm P}$  6 показано на рисунке 2.14 ( $N_{\rm P}$  6).

По данным максимальных эквивалентных деформаций в зоне установки тензорезистора таблицы 2.6 расчетных моделей УЭ построена сводная диаграмма, которая представлена на рисунке 2.15.

Далее более подробно рассматривались параметры средней части УЭ, предназначенной для установки тензорезистора. Варьировался радиус сопряжения дуг свода  $r_2$ , и исследовалось его влияние на максимальные значения эквивалентных деформаций  $\varepsilon_{max}$  при постоянном значении приложенной силы. Результаты расчета моделей представлены в таблице 2.7.



Рисунок 2.15 – Сводная диаграмма максимальных значений эквивалентных деформаций расчетных моделей УЭ СТП



Таблица 2.7 – Результаты моделирования УЭ при различных радиусах

сопряжения дуг свода  $r_2$ 

По данным максимальных значений эквивалентных деформаций  $\varepsilon_{max}$  при различных радиусах сопряжения дуг свода  $r_2$  построена сводная диаграмма, представленная на рисунке 2.16.

Таким образом, установлено, что максимальные значения эквивалентных деформаций возникают в модели с радиусом сопряжения *r*<sub>2</sub> равном 10 мм.



Рисунок 2.16 – Зависимость максимальных эквивалентных деформаций УЭ от радиуса сопряжения дуг свода *r*<sub>2</sub>

Для изготовления упругих чувствительных элементов тензометрических датчиков съемного типа используют специальные стали, а также медные и алюминиевые сплавы. Напряжения в чувствительном элементе на верхней границе диапазона измерений должны оставаться меньше предела упругости, т. е. напряжения, при котором появляются остаточные деформации. Материалы для изготовления УЭ датчиков производят из углеродистых сталей (чаще всего их легируют кремнием, марганцем, хромом, ванадием, никелем и др.). Для придания большей стабилизации характеристикам УЭ проходят термообработку – закалку со средним отпуском.

Выбор материала для УЭ производят с учетом требований точности, условий работы УЭ и химического состава материала, однако должны также учиты-

ваться экономические факторы стоимости материала. Поэтому для задач экспериментальных исследований, штучные опытные образцы УЭ были изготовлены из рессорно-пружинной стали 65Г.

В результате, для проведения стендовых испытаний и оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи при силовых испытаниях секции на стенде ООО «Юргинский машзавод» изготовлены опытные образцы СТП (рисунок 2.17) на базе конфигурации арки УЭ № 6 с геометрическими параметрами, указанными выше, и установленными полупроводниковыми тензорезисторами KSP-6-350-E4. Планируется подача заявки на полезную модель в ФИПС.



Рисунок 2.17 – Опытные образцы арочных СТП, где: 1 – упругий элемент, 2 – зона установки тензорезисторов, 3 – крепежные элементы (винтовые стойки), 4 – терминальные площадки подключения контактов, 5 – соединительные провода

Наклеивание тензорезисторов KSP проводилось в соответствии с указаниями завода изготовителя KYOWA на цианакрилатный клей KYOWA CEMENT CC-33A. УЭ изготовлены при помощи лазерной резки.

Установленное изготовителем число циклов нагружения для тензорезистора KSP составляет  $1 \cdot 10^6$ , наработка до усталостного разрушения УЭ из стали 65Г составляет  $2 \cdot 10^5$ . Максимальное проведённое число циклов нагружения для СТП при испытаниях на стенде составило  $1,5 \cdot 10^2$ . Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии существенных изменения показателей образцов СТП при увеличении количества циклов нагружения. Изготовление опытных образца УЭ позволило с использованием разработанных технических средств и методик (см. гл.3, п.п. 3.2–3.3) провести стендовые испытания и определить их основные характеристики, сопоставить результаты моделирования с реальным поведением УЭ и по итогам дать рекомендации по его использованию в составе датчика совместно с микропроцессорными тензометрическими системами (п. 3.1).

### 2.2.2 Анализ способов закрепления УЭ на объекте контроля

Как уже было отмечено в главе 1, характеристики СТП зависят не только от характеристик тензорезистора и геометрических параметров УЭ, но и от способа механической связи УЭ с ОК и воздействия внешних факторов на эту связь. Поэтому важным также является исследование влияния способа закрепления УЭ на поверхности металлоконструкции элементов секции механизированной крепи в процессе испытаний. Крепежные элементы должны обеспечивать плотный контакт монтажных площадок УЭ с поверхностью металлоконструкции элемента секции без возможности смещения, при этом конструкция должна быть проста и иметь минимум элементов.

Для закрепления арочных УЭ используются привинчиваемый приклеиваемый, привариваемый, прижимной и комбинированный способы. С учетом поставленных требований ООО «Юргинский машзавод» в качестве способа закрепления УЭ на поверхности металлоконструкций элементов секций не рассматривались неразъемные соединения. Из разъемных, привинчиваемый способ закрепления на резьбовую шпильку также отклонен, так как требует нарушения целостности поверхности ОК. В результате, для установки УЭ СТП на поверхность секции в процессе испытаний имеют применение прижимной, приклеиваемый и комбинированный способ.

В целом каждый из разъемных способов закрепления позволяет обеспечить мобильность и возможностью многократного использования СТП. Приклеиваемый позволяет надежно закрепить СТП на исследуемой поверхности, но важно
обеспечить заблаговременную подготовку поверхности. Прижимной обеспечивает простоту и оперативность переустановки, но влечет за собой разработку дополнительно прижимного устройства.

Комбинированный способ представляет собой различные комбинации перечисленных вариантов. С точки зрения надежности и простоты монтажа следует отметить комбинированный способ закрепления УЭ, объединяющий преимущества болтового и клеевого способа. В этом случае УЭ через болтовое соединение закрепляется на специальных монтажных винтовых стойках, которые в свою очередь на клей устанавливаются на ОК, как показано на рисунках 1.8 а и 2.17. Такой способ закрепления является наиболее предпочтительным при контроле деформаций поверхности тензометрическим методом с возможностью многократного использования СТП.

Для экспериментального определения зон измерения деформаций в процессе испытаний секции также может применяться прижимной способ закрепления УЭ СТП постоянными магнитами из магнитного сплава NdFeB, обеспечивающими надежную фиксацию в пределах короткого времени и без ударных воздействий и значительных вибраций. Такой способ закрепления позволяет оперативно корректировать зону измерения деформаций и напряжений в металлоконструкциях элементов секции механизированной крепи при изменении схемы нагружения в процессе испытаний.

Оба способа закрепления имеют преимущества и недостатки, поэтому следует экспериментально определить степень влияния способа закрепления УЭ СТП на металлоконструкциях элементов секции, чтобы дать рекомендации по их применению в процессе испытаний, в зависимости от поставленных задач.

## 2.3 Выводы по главе 2

1. Наиболее предпочтительным направлением для повышения чувствительности тензосистемы при оценке нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи в процессе испытаний является увеличение коэффициента тензочувствительности датчика (СТП). Повышение чувствительности СТП возможно за счет использования тензорезисторов на основе полупроводниковых материалов, варьирования геометрических параметров УЭ и подбора наиболее подходящего способа закрепления на поверхности ОК.

2. Использование в составе СТП для оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи кремниевых полупроводниковых тензорезисторов позволяет повысить чувствительность измерений более чем в 59 раз в сравнении с проволочными тензорезисторами типа ПКС. При этом относительное среднее квадратическое отклонение  $K_i$  тензорезисторов KSP и ПКС сопоставимы и составляют 0,84 % и 0,67 % соответственно.

3. Экспериментально установлена характеристика нелинейности полупроводниковых тензорезисторов KSP-6-350-Е4 по изменению сопротивления от деформации порядка 15 % при значениях  $\varepsilon$  от -1200 до +1200. Также установлены закономерности изменения сопротивления полупроводниковых тензорезисторов KSP-6-350-Е4 от температуры в диапазоне 0 до +45 °C. Для компенсации нелинейности полупроводниковых тензорезисторов при обработке результатов оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции необходимо вводить поправочный коэффициент, который зависит от абсолютного значения деформации ОК и температуры.

4. В результате моделирования влияния геометрических параметров УЭ на чувствительность УЭ, что максимальные значения деформаций в месте установки тензорезистора арочного УЭ с базой 100 мм и высотой 10 мм имеет конфигурация с вогнутым сводом переменного сечения от монтажных площадок до вершины со значениями от 10 до 5 мм и радиальным сопряжением дуг свода радиусом 10 мм.

5. Помимо характеристик тензорезистора, и параметров УЭ на чувствительность СТП напрямую влияет способ его закрепления. С точки зрения надежности и простоты монтажа наиболее предпочтительным является комбинированный способ закрепления упругого элемента, когда УЭ через болтовое соединение закрепляется на специальных монтажных винтовых стойках, которые в свою очередь на клей устанавливаются на ОК. Для экспериментального определения зон измерения деформаций в процессе испытаний секции также применим прижимной способ закрепления УЭ СТП постоянными NdFeB магнитами.

## ГЛАВА 3. Разработка методики оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи

### 3.1 Программа экспериментальных исследований

Запланированные экспериментальные исследования в рамках работы подразделяются на предварительные – по определению основных характеристик арочных СТП (АСТП) и основные – по оценке нагруженности элементов металлоконструкций секций механизированных крепей МКЮ.2У-12/25 и МКЮ.2У-07/19 на лабораторном и заводском стендовом оборудовании. Весь объем работ делится на три этапа. Первый этап – предварительные лабораторные стендовые исследования на профильной балке, включает работы:

- по определению основных характеристик АСТП. Необходимо экспериментально определить статические характеристики преобразования АСТП и по полученным данным рассчитать коэффициент тензочувствительности АСТП;
- по определению влияния способа закрепления на характеристики АСТП;
- по сопоставлению полученных результатов с другими методами НК.

Второй этап – основные лабораторные стендовые исследования на натурном элементе секции (рычаг траверсы секции МКЮ.2У-12/25):

- по оценке стабильности измерений деформаций металлоконструкций натурного элемента секции при многократной переустановке АСТП и комбинированном способе закрепления;
- по экспериментальному определению деформаций элемента металлоконструкции секции арочными СТП при прижимном способе закрепления (экспресс-анализ).

Третий этап – основные заводские стендовые исследования на секции МКЮ.2У-07/19 на стенде «Gluckauf»:

 по экспериментальному определению параметров нагруженности элемента металлоконструкции секции механизированной крепи арочными СТП с комбинированным креплением при испытаниях по утвержденной методике согласно ГОСТ Р 52152-2003.

Программа заводских исследований реализовывалась с использованием испытательного стенда «Gluckauf» ООО «Юргинский машзавод» (рисунок 1.5), описание и основанные характеристики которого подробно представлены в разделе 3.4.2.

Необходимость проведения предварительных лабораторных исследований по определению основных характеристик СТП, оценке влияния на них способа закрепления СТП на элементе металлоконструкции секции, оценке стабильности работы СТП при неоднократной переустановке и экспериментальному определению деформаций элемента металлоконструкции секции потребовало разработки соответствующих методик и программно-аппаратных средств и стендового оборудования.

В первую очередь это связано с необходимостью предварительной отработки методики оценки нагруженности опытными образцами АСТП на металлоконструкции натурного элемента секции механизированной крепи до проведения заводских испытаний. В качестве такого натурного элемента использовался рычаг траверсы четырехзвенника секции механизированной крепи МКЮ.2У-12/25 производства ООО «Юргинский машзавод». Используемая ранее сертифицированная установка для градуировки тензорезисторов (рисунок 2.1) предназначена для работы с градуировочными балками сечением 30×30 мм и не позволяет производить нагружение габаритных сварных металлоконструкций.

При разработке технических средств для проведения экспериментальных исследований были выделены следующие требования:

- возможность моделирования постоянных статических нагрузок;
- возможность численной оценки деформаций;
- возможность регистрации и обработки сигналов;
- наличие средств визуализации и обработки данных в режиме реального времени.

## 3.2 Разработка технических и программно-аппаратных средств экспериментальных исследований

В соответствии с указанными в п. 3.1 требованиями, в рамках работы для выполнения экспериментальных исследований разработаны и изготовлены следующие технические и программно-аппаратные средства:

- стенд для моделирования нагружения и оценки деформаций (далее Лабораторный стенд);

- макетный образец мобильной тензометрической системы (МТС) с программным обеспечением (ПО) для визуализации и обработки данных.

## 3.2.1 Лабораторный стенд

Для лабораторных исследований и отработки методики оценки нагруженности рычага траверсы секции механизированной крепи, определения характеристик СТП, оценки стабильности при различных способах закрепления СТП – автором в Кузбасском государственном техническом университете им. Т.Ф. Горбачева в рамках выполнения проекта № 8345 программы «Старт-08» Фонда содействия развитию МФП в НТС разработан и изготовлен лабораторный стенд для моделирования нагружения и оценки деформаций (рисунок 3.1).

В состав стенда входят:

- каркасный узел, состоящий из полушпал основания (1), опорной балки (6) и комплекта рамных опор (2), соединенных регулируемыми винтовыми стойками и комплектом монтажных болтов;

- силовой узел (рисунок 3.1 б), состоящих из гидравлического домкрата (3), датчика силы NHS-22 (4), демпфера (11) и сферического компенсатора (12) на опорных скобах, соединенных подпружиненными шпильками;

- нагружаемая балка (5), индикатор нагрузки КМ-05 (7), прогибомер (8) в виде индикатора часового типа, базовый тензорезистор (9) из партии, испытанной на установке для градуировки (п. 2.1).



Рисунок 3.1 – Лабораторный стенд: а – общий вид, б – силовой узел

Конструкция стенда проектировалась таким образом, чтобы разными комплектами рамных опор обеспечить возможность использования в качестве нагружаемого элемента как сварную конструкцию рычага траверсы секции маханизированной крепи МКЮ.2У-12/25, так и профильные балки с габаритами не более 1400×380×230 мм, для расчета основных характеристик СТП при деформации. В качестве нагружаемой профильной балки для исследования статических характеристик датчиков выбран участок железнодорожного рельса марки Р65 ГОСТ 8161-75. Материал: Сталь М76. Расположение отверстий по ГОСТ Р 51685-2000, ГОСТ 8161-75: расстояния осей от торцов составили 96 мм, 316 мм и 446 мм соответственно (рисунок 3.1 а) [83, 84].

Принцип действия лабораторного стенда заключается в следующем. Исследуемые ПИП устанавливаются на профильную балку (5) или натурный элемент секции (рычаг траверсы) с установленным базовым тензорезистором (9). Балки (5) и (6) установленные на рамной опоре (2) и полушпале основания (1) соответственно, нагружаются по схеме поперечного изгиба силой, созданной гидравлическим домкратом (3), входящим в состав силового узла. Базовый тензорезистор (9) получает удлинение вместе с волокнами нагружаемой балки (5). С помощью датчика силы (4), встроенного в силовой узел и индикатора (7) измеряется величина нагрузки стенда (0÷12000±3 % кгс.), либо с помощью прогибомера (8) измеряется изгиб балки в середине ее длины и по прогибу рассчитывается относительная деформация поверхности нагружаемой балки (5). Для обеспечения жесткости стенда под нагрузкой используются двухэлементные стяжные штанги (10).

Для измерения упругих деформаций в качестве базового тензорезистора наклеивался KSP-6-350 с номинальным сопротивлением 350 Ом из партии испытанной на установке для градуировки тензорезисторов (п.2.1.1). Регистрирующий прибор прогибомера представлял собой индикатор часового типа с ценой деления 1 мкм.

Для регистрации нагрузки использовался датчик силы NHS-A22, технические характеристики которого приведены в таблице 3.1. Для визуализации нагрузки использовался промышленный регистрирующий весовой индикатор КМ-05 (модель XK 3103 Weight Indicator & Transmitter).

Максимальная на- грузка, т	Рабочий коэффи- циент передачи	Комбинированная погрешность	Температурный диапазон эксплуа- тации, град С
22	2,85±0,005 %	0,03 %	-30+70

Таблица 3.1 – Технические характеристики датчик силы NHS-A22

Рабочий элемент силового узла (гидравлический домкрат) устанавливался в специально спроектированный узел встройки (рисунок 3.1 б), совместно с датчи-ком NHS-22, демпфером и сферическим компенсатором между опорными скобами и опорной площадкой датчика, соединенными подпружиненными шпильками. Основные характеристики домкрата силового узла приведены в таблице 3.2.

Грузоподъемность, т	Высота подхвата, мм	Высота подъема, мм	Ход штока, мм	Ход выдвижного винта, мм
15	230	465	140	95

Таблица 3.2 – Характеристики домкрата силового узла

Таким образом, стенд позволяет проводить экспериментальные исследования и практические занятия по изучению влияния прикладываемой нагрузки по схеме поперечного изгиба на уровень напряжений и деформаций поверхностей исследуемых балок и металлоконструкций тензометрическим методом неразрушающего контроля. Для проведения экспериментальных исследований на стенде необходимо использовать измерительную тензометрическую аппаратуру.

## 3.2.2 Разработка макета мобильной тензометрической системы

Для регистрации и обработки сигналов при оценке нагруженности арочными СТП потребовалась разработка соответствующего программно-аппаратного комплекса. В главе 1 п. 1.2. представлены схема типовой тензометрической системы и значительное количество промышленных тензометрических систем (таблица 1.1), на основе которых можно реализовать измерения. Однако для обеспечения широкого диапазона требуемых настроек и значительной универсальности оборудования было принято решение самостоятельной разработки программноаппаратно тензометрического комплекса в виде макета МТС, упрощенной в сравнении с промышленными образцами и максимально адаптированной под круг исследовательских задач с СТП на лабораторном и заводском стенде.

Для быстрой комплектации, переустановки и настройки предложен метод построения макета МТС по модульному принципу при подключении различных ПИП с номинальным сопротивлением от 50 до 400 Ом. Таким образом, разработана структура макета МТС (рисунок 3.2, 3.3), в состав которого входят различные варианты ПИП (тензорезисторы, СТП) *1*, усилитель *2a* и аналого-цифровой

преобразователь (АЦП) 26 измерительного преобразователя 2, прецизионный источник питания 3, портативный компьютер 4 и ПО для визуализации и обработки данных измерений 5.

Измерительный преобразователь 2 макетной МТС выполняет функции усиления сигнала и аналого-цифрового преобразования. Отличается от промышленных моделей измерительных преобразователей тем, что две функции разделены между усилителем 2*a* и АЦП 2*б* и представлены отдельными устройствами (рисунок 3.3).



Первичные преобразователи

Рисунок 3.2 – Структурная схема элементов макета МТС, адаптированного под стендовые исследования

Такой подход обусловлен тем, что для проведения стендовых исследований необходим универсальный прибор для усиления сигналов в широком диапазоне для различных режимов нагрузки, с возможностью подключения ПИП со значениями номинального сопротивления: для отечественных – 50, 100, 200, 400 Ом, для импортных – 120, 240, 350 Ом, в то время как АЦП в макетном образце МТС может быть представлен внешним устройством с USB интерфейсом и работать с любыми сигналами. В общем виде функциональная схема измерительного преобразователя макетного образца представлена на рисунке 3.4.



Рисунок 3.3 – Оборудование макетного образца МТС: 1 – ПИП, 2а – усилитель, 2б – АЦП, 3 – источник питания, 4 – портативный компьютер, 5 – программное обеспечение



Рисунок 3.4 – Функциональная схема измерительного преобразователя макета

МТС: 2а – усилитель, 2б – аналого-цифровой преобразователь

Такая схема позволяет упростить процесс подготовки эксперимента при стендовых испытаниях и иметь возможностью быстрой комплектации, переустановки и настройки системы по модульному принципу.

Функциональная схема усилителя макетного образца МТС показана на рисунке 3.5. Усилитель представлен оригинальной схемой [115] и в общем виде включает в себя тензометрический мост 1 и прецизионный источник опорного напряжения 2 с внутренним операционным усилителем 3 и реализован на основе инструментального усилителя INA125P. Чип INA125P производства Burr-Brown Corporation (США) является надежной и доступной микросхемой для прецизионного усиления сигнала и работы с различными типами датчиков, что позволяет использовать его в составе макетного образца МТС.



Рисунок 3.5 – Функциональная схема усилителя измерительного преобразователя

макета МТС,

где  $R_G$  – рабочий тензорезистор KSP/KSN;

R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> – термостабильные прецизионные резисторы на 330 (348) Ом с 1 %-ным допуском;

R<sub>т</sub> – термокомпенсирующий тензорезистор KSP; VR<sub>1</sub> – потенциометр установки нулевого баланса тензомоста;

VR<sub>2</sub> – потенциометр настройки коэффициента усиления канала;

А<sub>1</sub>, А<sub>2</sub> – внутренний операционный усилитель чипа INA125P;

V<sub>ref</sub> – источник опорного напряжения.

Рабочий тензорезистор  $R_G$  (полупроводниковый тензорезистор KSP) в представленной схеме имеет сопротивление 350 Ом и диапазон изменения сопротивления при максимальной нагрузке стенда в 100 кН составляет 6 Ом.

Расчет моста Уитстона произведен по формуле:

$$V_{0} = \left(\frac{R_{2}}{R_{2} + R_{G}} - \frac{R_{1}}{R_{1} + VR_{1}}\right) \cdot V_{ref}$$
(3.1)

Согласно расчету, для регулировки баланса моста применен потенциометр  $VR_1$  на 500 Ом, для регулировки коэффициента усиления – потенциометр  $VR_2$  на 2 кОм.

Перед началом измерений тензорезистор  $R_G$  наклеивается на ОК или УЭ датчика. Питание тензомоста в 2,5 В осуществляется от внутреннего источника опорного напряжения инструментального усилителя INA125P. Такое напряжение питания и небольшая величина тока, проходящего через тензорезистор (порядка 10 мА), позволяет минимизировать его саморазогрев и компенсировать возможную температурную погрешность. Чип INA125P питается от напряжения 5 В, средняя точка 2.5 В используется как псевдоземля для передачи сигнала в АЦП. С помощью потенциометра VR<sub>1</sub> выравнивается напряжение на обоих плечах моста. Для большей точности настройки ноля, последовательно к VR<sub>1</sub> может быть включен потенциометр 10–40 Ом. При достижении максимального значения нагрузки исследуемого объекта контроля на стендовом оборудовании потенциометром VR<sub>2</sub> устанавливается желаемый коэффициент усиления разности напряжений между плечами моста. После проведения данных операций усилитель готов к проведению измерений. Вся схема усилителя и кабели экранированы.

После усиления сигналы поступают на входы АЦП, где происходит преобразование аналогового сигнала в цифровой эквивалент. Затем цифровой код поступает в ПК, где сохраняется и отображается в интерфейсной части ПО.

Для увеличения чувствительности и температурной компенсации четыре из восьми каналов предполагают подключение ПИП по схеме «полумост», оставшиеся четыре канала предполагают подключение по схеме «четверть моста» с двухпроводным подключением. Для этого в представленной схеме для четырех каналов предусмотрена возможность оперативного подключения вместо  $R_2$  тензорезистора  $R_T$  для термокомпенсации рабочего тензорезистора  $R_G$ , в том случае, если  $R_G$  является не термокомпенсированным. Такая схема подключения предусмотрена на каналах усилителя с 1 по 4. Каналы с 5 по 8 реализованы по схеме, описанной выше, где  $R_2$  – прецизионный резистор.

Свойство быстрой комплектации, переустановки и настройки системы характеризуется, в том числе, возможностью работы с ПИП со значениями номинального сопротивления от 50 до 400 Ом. Для этого подбор резистивных элементов схемы производится по таблице 3.3.

R <sub>G</sub> ,Ом	R1,Ом	R <sub>2</sub> ,Ом	R <sub>T</sub> ,Ом	VR <sub>1</sub> ,Ом	VR <sub>2</sub> , Ом
50	49.9	49.9	50	100	2000
100	100	100	100	200	2000
120	121	121	120	200	2000
200	200	200	200	500	2000
240	237	237	240	500	2000
350	348	348	350	500	2000
400	402	402	400	500	2000

Таблица 3.3 – Таблица подбора компонентов схемы при изменении номинала используемых тензорезисторов R<sub>G</sub>

Представленная схема усилителя в составе макета МТС позволяет варьировать коэффициент усиления в диапазоне 4–10000 при регистрации сигналов с различных типов тензометрических преобразователей и датчиков с широким диапазоном номинальных характеристик с температурной самокомпенсацией и без неё.

Аналого-цифровой преобразователь 26 (рисунок 3.2, 3.3) в макетном образце МТС представлен заводским внешним устройством АЦП для IBM PC/ATсовместимых компьютеров ЛА-2USB-14 производства ЗАО «Руднев-Шиляев». Основное назначение прибора – преобразование непрерывных (аналоговых) входных сигналов в цифровую форму, которая удобна для дальнейшей обработки сигнала при помощи ПК.

Особенностью данного АЦП является то, что устройство позволяет осуществлять построение переносных измерительных систем на базе компьютера, имеет пониженное энергопотребление и малые габариты в совокупности с высоким разрешением и высоким быстродействием, дает возможность подключения по USB шине, не требует внешнего питания. Также преимущество данного оборудования заключается в гибкости выполняемых функций, связанных с обработкой результатов аналого-цифрового преобразования и зависящих от программного обеспечения к прибору.

Технические характеристики внешнего устройства сбора аналоговой и цифровой информации с USB 2.0 портом и частотой дискретизации 500/400 кГц приведены в таблице 3.4. Макет МТС использовался на всех этапах проведения стендовых исследований СТП, в том числе на заводе ООО «Юргинский машзавод», однако в перспективе для реализации методики оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи предпочтительно использовать измерительный преобразователь быстродействующей многофункциональной микропроцессорной тензометрической системы, разрабатываемой непосредственно для контроля деформаций ответственных конструкций, в том числе секций механизированных крепей при воздействии не только статических, но и динамических нагрузок – в соответствии с требованиями ООО «Юргинский машзавод» [33, 34].

Таблица 3.4 – Характеристики АЦП
----------------------------------

Общая информация				
Шина интерфейса с ПЭВМ	USB 2.0			
Потребляемая мощность	+5 B – 500 мА (питание от шины USB)			
Габариты	140х115х35 мм			
Аналого	вый вход			
Количество аналоговых каналов	32 однополюсных или 16 дифференци-			
	альных каналов			
Диапазоны входного сигнала	± 10 B ± 0,05 B			
Входное сопротивление	не менее 5 МОм			
Защита по напряжению	± 15 В (при включенном питании)			
Аналого-цифровой пр	еобразователь (АЦП)			
Тип АЦП	Последовательного приближения			
Количество бит в выходном регистре	14 бит			
АЦП				
Диапазон частот выборок	24 Гц400 кГц			
Время преобразования	2,5 мкс			
Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП)				
Количество аналоговых выходов	2 шт.			
Выходное напряжение	± 5 B			
Количество бит во входном регистре	12 бит			
ЦАП				
Время преобразования	10 мкс			
Цифровой порт				
Количество линий	8 вывода и 8 ввода (с защёлкой)			
Уровни и пороговые значения	КМОП (ТТЛ совместимые)			

Для визуализации и обработки данных макетного образца МТС при работе на стендовом оборудовании предусмотрены портативный компьютер и комплекс программных средств для обработки данных поступающих по протоколу USB от АЦП ЛА-2USB-14 и их визуального отображения, редактирования и хранения. В качестве реализующей ЭВМ требуется ноутбук или компьютер с тактовой частотой процессора не ниже 2 Гц, оперативной памятью не меньше 1 Гб, жестким диском – не менее 10 Гб, монитором с разрешением экрана не менее 1024×768 точек.

С внешним устройством аналого-цифрового преобразования ЛА-2USB-14 [116] поставляется комплект программ ADC Utility, включающий четыре программных продукта:

1. ADCLab – программа осциллограф-спектроанализатор. Позволяет просматривать сигналы в режиме осциллографа. Есть возможность отображения спектра сигнала, а также вычисления параметров сигнала, таких как максимум, минимум, среднее значение. Сбор данных происходит в кадровом режиме (не непрерывный). Каждый кадр выводится на экран в реальном времени. Есть возможность сохранить сигнал в файл.

2. Saver2 – программа-самописец. Позволяет записывать сигнал с низкочастотных плат на диск длительное время. Критерием остановки может быть время сбора, количество собранных данных или свободное место на жестком диске. Важно отметить, что сбор данных производится в непрерывном режиме, поэтому данная программа работает только с низкочастотными платами. При сборе данных происходит примитивная визуализация сигнала, без возможности масштабирования по оси Y, хотя цифровой зуммер также работает.

3. Viewer – программа просмотра бинарных данных в виде графика. С помощью этой программы можно просмотреть данные, записанные двумя перечисленными до этого программами в виде графика. Имеется возможность задать произвольные единицы по оси Y. По оси X возможно отображение как в отсчетах, так и во времени (секунды, миллисекунды, часы). Через программу можно просматривать сигнал, снятый с плат производства ЗАО «Руднев-Шиляев» и записанный через одну из программ (ADCLab, Saver2).

4. Converter – программа конвертации бинарных данных в текстовый вид (\*.txt, \*.csv). Программа конвертирует данные из двоичного формата в текстовый

формат, удобный для просмотра в текстовом редакторе. Есть возможность конвертировать данные в CSV формат для открытия в MS Excel.

Все программы, входящие в состав пакета ADC Utility, имеют ряд преимуществ в виде большого количества всевозможных настроек отображения сигнала, интуитивно понятного интерфейса и стабильности работы. Однако данный комплект программ разработан для универсальной работы со всеми платами сбора данных фирмы производителя ЗАО «Руднев-Шиляев», без учета специфики измерений в зависимости от применения оборудования, виду чего имеет ряд недостатков, существенно усложняющих работу с макетным образцом МТС, в состав которой входит устройство АЦП ЛА-2USB-14. К основным недостаткам относятся:

- отображение данных в Saver 2 происходит в покадровом режиме (не непрерывном), что неудобно для визуализации измерения динамических и статических нагрузок на ОК;

- отсутствие возможности прямой записи данных в файл в процессе измерения. Для конвертации данных в файл необходим запуск отдельной программы Converter, которая работает только с заранее записанными данными при помощи Saver 2;

- необходимость использования параллельно четырех программных продуктов для процесса регистрации, записи и повторного отображения сигнала.

Для компенсации этих недостатков и удобства проведения экспериментальных исследований на стендовом оборудовании дополнительно разработана и зарегистрирована в ФИПС собственная программа для ЭВМ «Стенд-Инфо»: Свидетельство № 2011618442 от 26.08.2011 г., авторы: Кречетов А.А., Никитенко М.С., Ткаченко А.И., Марьенков Е.В. (Приложение А).

Программная система «Стенд-Инфо» предназначена для регистрации, сохранения, отображения и фильтрации данных при измерении деформаций СТП и другими ПИП. Сигнал, получаемый с ПИП при деформациях, создаваемых на стенде, поступает в устройство ЛА-2USB-14 и преобразуется в АЦП. В дальнейшем, используя функции и настройки программного продукта, по полученным параметрам можно рассчитать физическую величину (вес, силу и пр.), которая воздействует на элементы стенда и приводит к упругим деформациям. При сравнении показания исследуемого датчика с базовым тензорезистором в каждую единицу времени при различных нагрузках, можно получить искомую погрешность при измерении величины внешнего воздействия.

🐻 Стенд-Инфо 8 192 6 554 4 9 1 5 3 277 1 638 -1 638 -3 277 -4 915 -6 554 -8 192 0,000 1600,000 3200,000 4800,000 6400,000 8000,000 9600,000 11200,000 12800,000 14400,000 16000,00 Параметры контроллера Каналы Канал эталон: 0 Состояние контрол 0 100 Буфер потерян Старт Стоп Частота, Гц 35000 Буфер не готов Таймер завершения измерений Кол-во каналов 1 💌 Данные не готовы Использовать таймер Остановить через, мин: 1 0 1-й канал COM3 Осталось Усиление, х 1 📃 Запись в файл Иасштабирование Контроллер: Отключен

Главное окно программной системы «Стенд-Инфо» представлено на рисунке 3.6.

Рисунок 3.6 – Главное окно программной системы «Стенд-Инфо»

Перечень доступных настроек программной системы «Стенд-Инфо»:

- канал базового тензорезистора – порядковый номер канала, который принимается за основу при сопоставлении показаний;

- использовать таймер – установка времени остановки измерений после старта, измеряется в минутах;

- запись в файл – запись всех показаний в MS Excel файл, время остановки измерений после старта измеряется в секундах;

- частота – настройка частоты работы контроллера АЦП;

- количество каналов – выбор числа каналов для одновременного отображения на графике;

- усиление – коэффициент программного усиления сигнала, позволяет кратно увеличить величину отображаемого сигнала;

- масштабирование – увеличение показаний графика на всю доступную величину размера окна.

Для начала работы необходимо подключить к ПК устройство АЦП «ЛА-2USB-14», подать на любой вход сигнал для тестирования или подключить датчики, согласно инструкции к АЦП.

Программная система реализована на C++ и C#, что обосновано упрощением разработки основных элементов с использованием C# и необходимостью использования C++ для псевдодрайвера и реализации функций доступа к порту.

## 3.2.3 Порядок работы технических средств

Для проведения экспериментальных исследований на стендовом оборудовании заранее определяется место монтажа СТП и базового тензорезистора на балке, элементе металлоконструкции секции, исходя из геометрических параметров и предварительных расчетов на основе результатов моделирования МКЭ.

После определения места монтажа базового тензорезистора производится разметка под установку СТП. Перед установкой ПИП поверхность подготавливается, обезжиривается и производится наклеивание ПИП согласно индивидуальным инструкциям (к установке тензорезистора или монтажных винтовых стоек СТП). После установки всех ПИП балка или натурный элемент секции механизированной крепи не должны подвергаться нагружению в течение 24 часов до полного высыхания клея. После этого производится установка УЭ СТП на винтовые стойки, подключение всех элементов макета МТС и подключение ПИП к измерительному преобразователю макета МТС – к каналам с первого по восьмой.

После подключения всех элементов макета МТС запускается программа «Стенд-Инфо» и производится настройка баланса моста. Для каждого рабочего

канала макета МТС с помощью потенциометра VR<sub>1</sub> (рисунок 3.4) выравнивается напряжение на обоих плечах моста. Контроль ноля ПИП производится по отображенному сигналу интерфейсной части программы «Стенд-Инфо».

Далее производится нагружение стенда до максимальной нагрузки, что требуется для настройки усиления каналов макета МТС потенциометром  $VR_2$  (рисунок 3.4) и снятия механических напряжений с УЭ СТП для снижения влияния гистерезиса. Рекомендуется повторить данную процедуру несколько раз с последующей подстройкой ноля и уровня желаемого усиления.

В случае проведения исследований на лабораторном стенде под нагрузкой балка или натурный элемент секции нагружаются по схеме поперечного изгиба силой, созданной гидравлическим узлом, входящим в состав стенда, базовый тензорезистор получает удлинение вместе с поверхностным слоем нагружаемой балки, с помощью датчика силы, встроенного в силовой узел, измеряется величина нагрузки стенда ( $0\div120000$  кH  $\pm 3$ %) либо с помощью прогибомера измеряется прогиб балки в середине ее длины и по прогибу рассчитывается относительная деформация поверхности нагружаемой балки.

В случае проведения исследований на заводском стенде секция нагружается по одной из 5 схем (изгиб, изгиб с кручением) [7] гидравлическими стойками и СТП получают сокращение или удлинение вместе с поверхностным слоем металлоконструкции элемента секции.

В обоих случаях СТП или другие ПИП должны регистрировать деформацию поверхности ОК, которая отображается в режиме реального времени на компьютере. В случае отсутствия сигнала необходимо проверить соединение проводов ПИП и разъемов.

После сброса нагрузки и возвращения показаний ПИП в ноль оборудование готово к проведению экспериментов.

#### 3.3 Методика проведения экспериментальных исследований

## 3.3.1 Стендовые лабораторные испытания

Для определения статических характеристик СТП используется лабораторный стенд, макет МТС. Исследование проводится на основе однократного нагружения исследуемой балки с регистрацией параметров нагружения, значений, получаемых с базового тензорезистора на нагружаемой балке, и значений измерительных кодов СТП.

Для определения характеристик СТП необходимо на первом этапе рассчитать значения нормальных напряжений на поверхности балки в исследуемом сечении под воздействием нагрузки, что требуется для дальнейшего расчета относительных деформаций и основных характеристик СТП. Для этого необходимо на лабораторном стенде определить желаемую длину рабочей зоны (область поверхности, лежащую между опорами стенда) не менее 400 мм – для любого нагружаемого элемента и не более 1200 мм – для профильной рельсовой балки, что определяется конструктивными особенностями стенда и габаритами силового узла. Далее определяется желаемое усилие нагружения, но не более максимально допустимой нагрузки на опоры стенда в 120000 кН. После этого определяется точка приложения силы к исследуемой балке, для схемы поперечного изгиба нагрузка на стенде производится по сечению 1/2 рабочей зоны исследуемой поверхности балки. Расчет нормальных напряжений и деформаций производится согласно схеме нагружения или с использованием программы трехмерного моделирования [113, 114] и использованием справочных данных по характеристикам материала балки. Параметры рельсовой балки приведены в таблице 3.5.

Следующим шагом после определения нормальных напряжений и деформаций в исследуемой точке поверхности является установка базового тензорезистора. Он требуется для сравнения полученных характеристик KSP с полученными ранее на установке для градуировки тензорезисторов, а также для анализа полученных характеристик СТП. Установить базовый тензорезистор на поверхность в исследуемом сечении на клей необходимо параллельно продольной оси балки, предварительно зачистив поверхность до отсутствия каверн и обезжирив её.

Параметр	Значение
Материал:	Сталь М76 (ГОСТ 24182-80)
Тип модели:	линейный, упругий, изотропный
Предел текучести:	$1.6e^{+008}$ H/m <sup>2</sup>
Предел прочности при растяжении:	9е <sup>+008</sup> Н/м <sup>2</sup>
Модуль упругости Е:	2е <sup>+011</sup> Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона:	0.29
Массовая плотность:	7820 кг/м <sup>3</sup>
Модуль сдвига:	$7.5e^{+010}$ H/m <sup>2</sup>

Таблица 3.5 – Свойства материала рельсовой балки. Справочные данные

Далее следует произвести разметку под установку монтажных винтовых стоек СТП согласно схеме (рисунок 3.7). Для одного СТП – на продольной оси балки, для двух и более СТП – с обеспечением минимального расстояния между продольными осями СТП в 20 мм.



Рисунок 3.7 – Схема разметки поверхности для установки винтовых

стоек СТП

После этого установить согласно разметке на цианакрилатный клей монтажные винтовые стойки СТП на предварительно подготовленную поверхность. Далее балка выдерживается 24 часа в помещении без резких перепадов температуры до полного высыхания клея. После этого СТП устанавливаются на монтажные винтовые стойки.

Далее подключается оборудование макета МТС и производится настройка баланса моста для базового тензорезистора и СТП (согласно п. 3.2.3), настраивается усиление каналов (согласно п. 3.2.3) последовательным подключением к измерительным каналам только базового тензорезистора. Таким образом обеспечивается равное значение усиления для канала базового тензорезистора и СТП.

После этого тензорезистор и СТП подключаются к соответствующим каналам макета МТС и с помощью лабораторного стенда (рисунок 3.1) производится ступенчатое нагружение балки до расчетного значения нагрузки и последующий сброс, после чего полученный файл измерения сохраняется в программе «Стенд-Инфо». При этом каждый отсчет представляет собой среднее значение для соответствующей ступени нагружения, поскольку за период выдержки стенда  $\Delta N_i$  под нагрузкой происходит незначительное изменение выходного сигнала  $\Delta U_{6bix}$  (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 –  $\Delta U_{вых}$  в период выдержки ступени нагрузки на стенде

Для расчета коэффициента тензочувствительности арочных СТП необходимо после выполнения подготовки оборудования (п.3.2.3) и выполнения операций по установке СТП и базового тензорезистора на исследуемую балку измерить их номинальное сопротивление  $R_0$ . После чего к соответствующим каналам макета МТС подключаются тензорезистор и СТП и с помощью лабораторного стенда (рисунок 3.1) производится ступенчатое нагружение балки до расчетного значения. После сохранения полученного файла измерения в программе «Стенд-Инфо», определяется  $N_{maxi}$  – значение кода измерительной тензосистемы для *i*-го тензодатчика при максимальной деформации и  $N_{0i}$  – значение кода измерительной тензосистемы для *i*-го тензодатчика на разгруженной балке с занесением данные в сводную таблицу.

Далее рассчитывается  $K_{npi}$  – коэффициент преобразования для *i*-го канала измерительной тензосистемы, ед.кода/Ом по формуле:

$$K_{\rm npi} = \frac{(N_{max} - N_{\rm oi})}{(R_{max} - R_{\rm oi})} \tag{3.2}$$

Для оценки разброса начального сопротивления ПИП в партии от номинального значения по формуле (2.4) определяется относительное отклонение  $\delta_i$ сопротивление каждого ПИП с учетом их начального сопротивления, когда балка еще не нагружалась.

После получения всех указанных характеристик имеем возможность по формуле (2.5) рассчитать коэффициенты тензочувствительности  $K_i$  для *i*-го тензорезистора и СТП.

Для определения влияния способа закрепления на характеристики СТП также используется лабораторный стенд и макет МТС. Исследование заключается в однократном нагружении исследуемой балки с регистрацией параметров нагружения, значений, получаемых с базового тензорезистора на нагружаемой балке, и значений выходных напряжений СТП; при этом один СТП установлен на винтовые стойки, второй – прижимном способом на NdFeB магниты. Для этого, после выполнения подготовки оборудования (п. 3.2.3) и выполнения операций по установке соответствующего СТП на винтовые стойки, необходимо на также заранее подготовленную и обработанную поверхность установить СТП на магниты согласно разметке (рисунок 3.7).

После чего подключается оборудование макета МТС и производится настройка баланса моста для базового тензорезистора и СТП (согласно п. 3.2.3), настройка усиления каналов (согласно п. 3.2.3) последовательным подключением к измерительным каналам только базового тензорезистора.

Следующим шагом все установленные СТП подключаются к соответствующим каналам макета МТС и с помощью лабораторного стенда (рисунок 3.1) производится ступенчатое нагружение балки до расчетного значения. После сохранения полученного файл измерения в программе «Стенд-Инфо» проводится анализ данных.

Для оценки стабильности измерений механических напряжений натурного элемента (рычаг траверсы секции МКЮ.2У-12/25) при многократной переустановке СТП и комбинированном способе закрепления используется лабораторный стенд, макет МТС. Исследование заключается в неоднократном нагружении исследуемой балки с регистрацией параметров нагружения, значений, получаемых с базового тезорезистора на нагружаемой балке, и значений измерительных кодов СТП; при этом после каждого цикла установки производится снятие и переустановка СТП на винтовые стойки. Для этого производится расчет напряжений и деформаций согласно [108-114] с использованием программы трехмерного моделирования и использованием справочных данных по характеристикам материала балки. Параметры материала рычага траверсы секции МКЮ.2У-12/25 приведены в таблице 3.6.

Следующим шагом – после подготовки оборудования (п. 3.2.3) и выполнения операций по установке СТП согласно схеме (рисунок 3.7), настройки баланса моста и усиления каналов макета МТС – производится снятие и повторная переустановку каждого СТП на монтажные винтовые стойки.

98

Далее с помощью лабораторного стенда (рисунок 3.1) производится ступенчатое нагружение балки до расчетного значения в выдержкой 2–3 значений на всём интервале нагружения.

Параметр	Значение	
Материал:	30ХГСА (ГОСТ 4543-71)	
Тип модели:	линейный, упругий, изотропный	
Предел текучести:	$8.35e^{+008}$ H/m <sup>2</sup>	
Предел прочности при растяжении:	$1.08e^{+008}$ H/m <sup>2</sup>	
Модуль упругости Е:	$2.15^{+011}$ H/m <sup>2</sup>	
Коэффициент Пуассона:	0.3	
Массовая плотность:	7850 кг/м <sup>3</sup>	

Таблица 3.6 – Свойства материала рычага. Справочные данные

После чего полученный файл измерения в программе «Стенд-Инфо» сохраняется, и далее необходимо повторить снятие и повторную переустановку каждого СТП на монтажные винтовые стойки с последующим ступенчатом нагружением с выдержкой 2–3 значений не менее 15 раз. После завершения всех циклов нагружения производится анализ данных статистическими методами. При этом каждый отсчет представляет собой среднее значение для соответствующей ступени нагружения.

Одной из важных задач в процессе экспериментальных исследований на разработанном стенде является задача **оценки достоверности полученных данных**. Для этого необходимо сопоставить полученные при помощи макетного образца МТС на разработанном стендовом оборудовании характеристики нагружения, регистрируемые СТП, с данными, полученными с применением других средств НК.

Для сопоставления полученных результатов с другими методами неразрушающего контроля (НК) также используется лабораторный стенд, макет МТС. Исследование заключается в контроле процесса нагружения, посредством установки на исследуемую балку оборудования средств НК и регистрации параметров нагружения. Для этого после выполнения подготовки оборудования (п. 3.2.3) и установки СТП необходимо произвести подготовку поверхности и установить оборудование средств НК согласно требованиям на исследуемую балку. Для контроля нагружения в лабораторных условиях могут применяться различные методы НК, такие как акустико-эмиссионный, спектрально-акустический, пьезооптический и т.д.

После установки оборудования средств НК производится нагружение, аналогично стандартной методике по определению характеристик СТП или оценке стабильности работы СТП, после чего проводится сопоставление данных, полученных разними методами НК.

## Методика оценки деформаций элементов металлоконструкций секции механизированной крепи с использованием образцов СТП.

При проведении стендовых испытаний, как правило, установка ПИП на элементах секции производится в расчетных зонах повышенных деформаций и напряжений. В зависимости от условий и схем нагружения элементов секции механизированной крепи происходит смещение этих зон на элементах секции. В таких условиях оперативно провести анализ фактического деформированного состояния плоских поверхностей металлоконструкций элементов секции позволяет метод экспресс-анализа деформаций с использованием разработанных арочных СТП.

Суть метода заключается в установке СТП в произвольном месте поверхности металлоконструкций элемента секции и получении значений линейных деформаций по оси, совпадающей с осью СТП при циклических нагрузке и разгрузке ОК.

Безусловно, в сравнении с винтовой стойкой, требующей наклеивания, прижимной магнитный тип крепления на NdFeB магнитах для экспресс-анализа остается наиболее удобным и быстрым для установки СТП на ОК. Метод может быть использован для оперативного определения зон наибольших деформаций и напряжений металлоконструкций опытным путём или предварительного анализа исследуемых поверхностей элементов металлоконструкций секции механизированной крепи, в том числе перед установкой винтовых стоек СТП.

Для проведения прямой экспериментальной оценки деформаций элемента металлоконструкции секции механизированной крепи предварительно производится условное разбиение исследуемой поверхности в виде матрицы на контрольные зоны и разметка границ контрольных зон, как показано на рисунке 3.9.

си		Α	Б	В	•••	n
кон- ПО 0	1	1A	1Б	1B		1n
эние оны Ґ	2	2A	2Б	2B		2n
значе юй з	3	3A	3Б	3B		3n
)боз эльн	•••					
) Tpo	m	mA	mБ	mB		mn

Обозначение контрольной зоны по оси Х

Рисунок 3.9 – Схема разбиения исследуемой поверхности на контрольные зоны

Далее СТП в каждой из размеченных зон устанавливается на NdFeB магнитах параллельно исследуемой оси балки, на равном удалении от границ зоны. Контроль отклонений положения при каждой установке СТП осуществляется по изготовленному шаблону.

Далее СТП подключается к соответствующему каналу макета МТС, настраивается баланс моста и уровень усиления, после чего производится цикл нагружения до максимального значения и сохраняется полученный файл измерения в программе «Стенд-Инфо». Для повышения точности оценки предпочтительно повторить операцию 2-3 раза, после чего СТП переустанавливается в следующую контрольную зону. Далее аналогичные действия выполняются для каждой контрольной зоны.

После завершения обследования всех контрольных зон на основе полученных данных строится диаграмма уровня выходного сигнала макета МТС, который прямо пропорционален деформации поверхности УЭ в зоне установки тензорезистора и характеризует деформации исследуемой поверхности металлоконструкции элемента секции при нагружении.

#### 3.3.2 Заводские испытания

Оценка нагруженности элементов секции механизированной крепи МКЮ.2У-07/19 при заводских стендовых испытаниях секции начинается с согласования мест установки арочных СТП на элементе металлоконструкции секции и заключается в установке арочных СТП и макета МТС параллельно штатному тензометрическому оборудованию, регистрации сигналов СТП при проведении испытаний секции механизированной крепи по утвержденной методике согласно ГОСТ Р 52152-2003. В результате должны быть получены характеристики изменения механических напряжений в контрольных точках элемента металлоконструкции секции и зависимости механических напряжений элемента металлоконструкции секции от нагрузки по данным СТП.

Для этого контрольные зоны и места монтажа СТП на элементе металлоконструкции секции крепи определяются по согласованию с конструкторским отделом, исходя из предварительных расчетов на основе результатов моделирования МКЭ. После чего производится разметка под установку СТП согласно рисунку 3.7. Перед установкой СТП поверхность подготавливается, обезжиривается и производится наклеивание винтовых стоек. СТП на монтажные винтовые стойки устанавливается через 24 часа после полного высыхания клея.

Далее на элемент металлоконструкции секции устанавливается и подключается оборудование макета МТС, запускается программа «Стенд-Инфо», к соответствующим каналам макета МТС подключаются тензорезистор и СТП, производится настройка баланса моста и усиления каналов с подключенными СТП (согласно п. 3.2.3).

Следующим шагом производится цикл нагружения секции МКЮ.2У-07/19 на стенде «Gluckauf» до максимальной нагрузки, предусмотренной РПМ, для корректировки усиления каналов макета МТС, снятия механических напряжений с УЭ СТП, после чего нагрузка сбрасывается.

После этого производится повторный цикл нагружения секции на стенде до максимальной нагрузки, предусмотренной РПМ, для построения тарировочного графика. После сброса нагрузки и возвращения показаний ПИП в ноль оборудование готово к проведению испытаний по утвержденной методике согласно ГОСТ Р 52152-2003.

## 3.4 Выводы по главе 3

1. Для проведения экспериментальных исследований и отработки методики оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи разработан и изготовлен лабораторный стенд для моделирования нагружения и оценки деформаций. Особенностью стенда является возможность проводить экспериментальные исследования и практические занятия по изучению влияния прикладываемой нагрузки по схеме поперечного изгиба на уровень напряжений и деформаций поверхностей тензометрическим методом исследуемых профильных балок и металлоконструкций с габаритами до 1400×380×230 мм.

2. Разработан макет мобильной тензометрической системы, обеспечивающий возможность быстрой комплектации, переустановки и настройки системы тензометрического контроля для проведения стендовых исследований элементов металлоконструкций секции механизированной крепи при подключении различных ПИП с номинальным сопротивлением от 50 до 400 Ом. При этом оригинальная схема усилителя на основе прецизионных чипов инструментального усиления INA125P позволяет варьировать усиление сигнала для оперативной подстройки в диапазоне от 4 до 10000 раз и подключать четыре ПИП с термокомпенсацияей и четыре ПИП без неё.

3. Разработана программная система «Стенд-Инфо» для визуализации и обработки данных макета МТС при оценке нагруженности элементов металлоконструкций элементов секции механизированной крепи. Особенностью программы является объединение функций отображения данных в режиме реального времени, регистрации и сохранения данных с АЦП ЛА-2USB-14 с возможностью постфильтрации в одном окне. Дальнейшая оценка полученных данных осуществляется статистическими методами.

4. Для оценки нагруженности элементов металлоконструкций элементов секции механизированной крепи разработана методика определения характеристик преобразования СТП, оценки влияния способа закрепления на характеристики СТП, оценки стабильности измерений механических напряжений арочными СТП

5. Разработана методика проведения экспресс-анализа по экспериментальному определению деформаций элемента металлоконструкции секции арочными СТП. Особенностью методики является возможность в произвольном месте элемента металлоконструкции секции механизированной крепи проводить исследования деформаций по оси, совпадающей с осью СТП, и наглядно визуализировать напряженное состояние исследуемой поверхности.

# ГЛАВА 4. Результаты экспериментальных исследований характеристик арочных СТП и оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи

## 4.1 Исследования характеристик СТП

Исследование основных характеристик АСТП согласно методике (глава 3 п. 3.1) производилось на лабораторном стенде (рисунок 3.1) с использованием профильной рельсовой балки. Для повышения достоверности полученных результатов определение статических характеристик преобразования АСТП, исследование влияния способа закрепления на характеристики АСТП, сопоставление полученных результатов с другими методами НК проводились на лабораторном стенде единовременно.

Для оценки расчетных значений деформаций рельсовой балки при нагружении на стенде произведено моделирование МКЭ. Схема закрепления рельсовой балки в стенде, при которой производилось определение основных характеристик АСТП, показана на рисунке 4.1. Расчет эпюры сил и моментов производился в соответствии с рисунком 4.2.

Параметры для расчета рельсовой балки представлены в таблице 4.1, свойства материала рельсовой балки указаны в таблице 3.5.



Рисунок 4.1 – Схема закрепления рельсовой балки в лабораторном стенде



Рисунок 4.2 – Схема нагружения рельсовой балки на лабораторном стенде

При схеме нагружения в соответствии с рисунком 4.2 максимальный момент в исследуемом поперечном сечении выражается как:

$$M_{max} = \frac{F \cdot L}{4}.\tag{4.1}$$

Значение нормальных напряжений на поверхности рельсовой балки по исследуемому сечению:

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W_x}.$$
(4.2)

В соответствии с законном Гука деформации выражаются как:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E},\tag{4.3}$$

где Е – модуль упругости.

106

Параметр	Значение			
Нагрузка <i>F</i> , кН	100			
Рабочая зона L, мм	1050			
Показатели в соответствии с ГОСТ 8161-75				
Момент инерции относительно осей <i>I</i> , см <sup>4</sup>				
горизонитальной	3540			
вертикальной	564			
Момент сопротивления $W_x$ , см <sup>3</sup>				
по низу подошвы	435			
Ширина подошвы, мм	150			
Справочные размеры для построения трехмерной модели				
Общая длина балки $L_{o \delta u}$ , мм	1395			
Межосевое расстояние между рамными опорами <i>Locb</i> , мм	1100			
Ширина рамной опоры, <i>Lo<sub>nop</sub></i> , мм	50			
Длина зоны контакта с силовым узлом, <i>L<sub>нагр</sub></i> , мм	200			

Таблица 4.1 – Параметры для расчета схемы нагружения рельсовой балки

Таким образом, вычисленные с использованием данных таблицы 4.1 значения нормальных напряжений в исследуемом сечении составляет  $\sigma = 60$  МПа, деформаций  $\varepsilon = 301,73 \cdot 10^{-6}$  и соответствуют зоне упругой работы материала.

Далее для определения основных характеристик АСТП согласно методике (глава 3 п. 3.1) производилась установка на нагружаемую рельсовую балку базового тензорезистора KSP-6-350-Е4 и АСТП. Основная ось базового тензорезистора KSP располагалась параллельно продольной оси балки x, АСТП 1 и АСТП 2 установлены также по оси x балки, как показано на рисунке 4.3, с обеспечением необходимого межосевого расстояния (рисунок 3.7). Контроль отклонений осей эталонного тензорезистора и положения АСТП 1 и АСТП 2 осуществлялся по шаблонам и линиям разметки. Отклонения не превысили значения  $\pm 1,5^{\circ}$ . Тип крепления АСТП 1 комбинированный – на монтажные винтовые стойки (рисунок 2.17), АСТП 2 установлен при помощи прижимного способа закрепления на NdFeB магнитами, как показано на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Положение базового тензорезистора КSP, АСТП 1 и АСТП 2 на рельсовой балке

Согласно методике (глава 3 п. 3.1), для определения статических характеристик преобразования АСТП и исследования влияния способа закрепления АСТП измерены начальные сопротивления всех ПИП, так  $R_0$  KSP составило 335 Ом, начальное сопротивление арочных преобразователей АСТП 1 и АСТП 2 составляли 334 Ом и 335 Ом соответственно.

Далее, после подключения оборудования макета МТС, настройки баланса моста и усиления каналов для базового тензорезистора и АСТП (согласно п. 3.2.3), с помощью лабораторного стенда произведен цикл нагружения балки до  $F_{harp}$  ступенями по 5 кН. Результаты изменения сопротивления ПИП приведены в таблице 4.2.

На основе полученных данных Таблицы 4.2 построены характеристики преобразования для тензорезистора КSP и АСТП 1 и АСТП 2 (рисунок 4.4).
Таблица 4.2 – Изменение сопротивлений КSP, АСТП 1 и АСТП 2	от
приложенной нагруз	ки

	Наименование исследуемого ПИП					
нагрузка F,	KSP	АСТП 1	АСТП 2			
КП	Ом	Ом	Ом			
0	335,0	334,0	335,0			
5	335,7	334,2	335,1			
10	336,3	334,3	335,3			
15	337,0	334,5	335,4			
20	337,6	334,6	335,5			
25	338,3	334,8	335,7			
30	338,9	334,9	335,8			
35	339,6	335,1	335,9			
40	340,2	335,2	336,1			
45	340,9	335,4	336,2			
50	341,5	335,5	336,4			
55	342,2	335,7	336,5			
60	342,8	335,8	336,6			
65	343,5	336,0	336,8			
70	344,1	336,1	336,9			
75	344,8	336,3	337,0			
80	345,4	336,4	337,2			
85	346,1	336,6	337,3			
90	346,7	336,7	337,4			
95	347,4	336,9	337,6			
100	348,0	337,0	337,7			



Рисунок 4.4 – Характеристики преобразования: а - для базового тензорезистора КSP; б – для АСТП 1 с комбинированным креплением, в – для АСТП 2 с креплением на NdFeB магнитах

Из представленных зависимостей видно, что чувствительность наклеенного базового тензорезистора KSP типа составляет 0,13 Ом на величину нагрузки балки в 1 кH, а для АСТП 1 и АСТП 2 составляет 0,03 и 0,027 Ом соответственно. Таким образом, отношение чувствительности арочных преобразователей АСТП 1 и АСТП 2 к чувствительности полупроводникового тензорезистора KSP составля-

110

ет 0,23 и 0,21 соответственно. Следовательно, чувствительность АСТП 2, закрепленного на NdFeB магниты ниже чувствительности АСТП 1, закрепленного на комбинирование винтовое крепление на 9 %.

Для расчета коэффициентов тензочувствительности АСТП в процессе нагружения рельсовой балки регистрировалось изменение измерительных кодов макета МТС –  $U_{g_{blx}}$  для КЅР, АСТП 1 и АСТП 2. Результаты измерений приведены в таблице 4.3. Каждый отсчет представлял собой среднее значение для соответствующей ступени нагружения, согласно методике п. 3.3.1. Среднее квадратическое отклонение (СКО) по каждому отсчету для ПИП рассчитано индивидуально и также приведено в таблице 4.3.

На рисунке 4.5 показаны графические зависимости, связанные с изменением  $U_{\rm solx}$  макета ТМС от нагрузки.

Нагруз-		СКО	$U_{{\scriptscriptstyle {\it {bbix}}}}$	СКО	$U_{{\scriptscriptstyle {\it {bbix}}}}$	СКО
ка <i>F</i> , кН		KSP	АСТП 1	АСТП 1	АСТП 2	АСТП 2
0	0,0006	0,0142	0,0018	0,0053	0,0014	0,0049
5	0,0547	0,0061	0,0106	0,0021	0,013	0,0025
10	0,0991	0,0042	0,0225	0,0021	0,0219	0,0032
15	0,1544	0,0028	0,0265	0,0035	0,031	0,0019
20	0,2094	0,0060	0,0477	0,0042	0,0434	0,0029
25	0,2575	0,0049	0,0609	0,0048	0,0521	0,0023
30	0,3098	0,0051	0,0646	0,0015	0,0603	0,0011
35	0,3515	0,0058	0,0768	0,0054	0,0725	0,0025
40	0,4006	0,0044	0,0908	0,0050	0,0846	0,0038
45	0,4416	0,0047	0,0965	0,0036	0,0883	0,0020

Таблица 4.3 – Изменение выходных кодов макета МТС и значения СКО от величины прикладываемой нагрузки

Нагруз-	II KSP	СКО	$U_{{\scriptscriptstyle {\it B b l}} x}$	СКО	$U_{{\scriptscriptstyle {\it B bl X}}}$	СКО
ка <i>F</i> , кН		KSP	АСТП 1	АСТП 1	АСТП 2	АСТП 2
50	0,4929	0,0055	0,1099	0,0042	0,1021	0,0019
55	0,5390	0,0056	0,1247	0,0033	0,1142	0,0023
60	0,5895	0,0049	0,1312	0,0047	0,1283	0,0021
65	0,6405	0,0016	0,1366	0,0043	0,1319	0,0031
70	0,6880	0,0071	0,1535	0,0045	0,1421	0,0031
75	0,7345	0,0053	0,1667	0,0044	0,1528	0,0028
80	0,7812	0,0044	0,1782	0,0040	0,1644	0,0033
85	0,8345	0,0046	0,1830	0,0012	0,1767	0,0027
90	0,8781	0,0019	0,1901	0,0035	0,183	0,0031
95	0,9239	0,0048	0,2176	0,0039	0,1909	0,0045
100	0,9688	0,0051	0,2258	0,0066	0,2030	0,0062

Продолжение таблицы 4.3 – Изменение выходных кодов макета МТС и значения СКО от величины прикладываемой нагрузки



Рисунок 4.5 – Изменение  $U_{\scriptscriptstyle Gblx}$  макета МТС для КSP, АСТП 1 и АСТП 2 от

приложенной нагрузки

На основе полученных данных таблиц 4.2, 4.3 по формуле (3.2) произведен расчет установленного коэффициента преобразования  $K_{npi}$ , по формуле (2.4) и (2.5) соответственно коэффициент тензочувствительности  $K_i$  и относительное отклонение  $\delta_i$  сопротивления каждого ПИП с учетом его начального сопротивления аналогично методике, описанной в п. 3.3.1. Коэффициент преобразования  $K_{np}$  составил 0,075. Результаты расчета  $K_i$  и  $\delta_i$  полупроводникового тензорезистора KSP и АСТП представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Расчетные значения основных характеристик полупроводниковых тензорезисторов типа КSP и АСТП 1 и АСТП 2

Параметры тензопреобразователей	KSP	АСТП 1	ACTП 2
Сопротивление тензопреобразователя, Ом	335	334	335
Предельное относительное отклонение со- противления в партии от номинального, %	0,00	0,29	0,00
Значение коэффициента тензочувстви- тельности <i>K<sub>i</sub></i>	128,61	29,76	26,71

В ходе экспериментальных исследований на разработанном лабораторном стенде важным являлся вопрос сопоставимости результатов с полученными ранее значениями на установке для градуировки при исследовании основных характеристик тензорезисторов KSP (глава 2 п. 2.1.2). Анализируя результаты таблицы 2.2, можем отметить, что значение  $K_i$  полупроводникового тензорезистора KSP (128,61) сопоставимы с результатами в таблице 4.4, где среднее расчетное значение  $K_i$  KSP составило 128,54. Такое соответствие данных подтвердило достоверность результатов, полученных по предложенной методике с использованием макетного образца МТС на разработанном стендовом оборудовании, и позволило провести сопоставление полученных результатов двух экспериментов. Для этого в таблице 4.5 были объединены результаты таблиц 2.2 и 4.4. Таким образом,

Наименование тензометрической системы				MMTC-6	54.01				M	акет МТС	_ `
Способ установки			0	Тациона	арный				Стацио- нарный	Съем	ный
элементов и датчиков		При	слеивани	іе непосј	редстве	нно на	OK		При- клеива- ние на ОК	Винт- стойка	NdFeB
Наименование ШИП	<b>IIKC1</b>	11KC2	<b>ITKC3</b>	11KC4	IdSN	KSP2	KSP3	KSP4	KSP	ACTIT 1	ACTI12
Коэффициент тензочувствительности K <sub>i</sub>	2,19	2,16	2,18	2,16	128,5	127,0	129,2	129,4	128,61	29,76	26,71
Среднее значение коэффициента тензочувствительности K <sub>icp</sub>		С,	17			12	3,54		128,61	29,76	26,71

Таблица 4.5 – Сопоставление результатов исследований характеристик ПИП

114

можно оценить насколько коэффициент тензочувствительности *K<sub>i</sub>* разработанных АСТП 1 и АСТП 2 выше значения *K<sub>i</sub>* проволочного тензорезистора ПКС.

Результаты показывают, что использование УЭ в составе арочных СТП с тензорезистором KSP в среднем снижает его коэффициент тензочувствительности в 4,9 раз в сравнении с KSP, приклеенными непосредственно на ОК. В то же время СТП на основе разработанной конфигурации арочного УЭ в среднем превосходят по чувствительности проволочные тензорезисторы ПКС более чем в 12 раз, компенсируя падение чувствительности СТП за счет включения УЭ в измерительную цепь. При этом основным преимуществом разработанной конструкции АСТП перед приклеиваемыми тензорезисторами является возможность его неоднократной переустановки на элементах металлоконструкций секции механизированной крепи в процессе испытаний.

## 4.2 Лабораторные стендовые исследования элемента металлоконструкции секции механизированной крепи

# 4.2.1 Экспериментальная оценка деформаций рычага траверсы секции МКЮ.2У-12/25 при использовании прижимного способа закрепления

Несмотря на выявленное снижение чувствительности АСТП при использовании прижимного способа закрепления УЭ на NdFeB магниты, он позволяет решать важную практическую задачу оперативной оценки деформаций в произвольной зоне ОК. Отработка методики экспериментальной оценки деформаций элементов металлоконструкций секции с использованием опытных образцов АСТП проводилась на рычаге траверсы секции МКЮ.2У-12/25 при нагружении на лабораторном стенде. Для этого на стенд устанавливался комплект увеличенных рамных опор по габаритным размерам детали и было уменьшено расстояние между основаниями стенда. Таким образом, с учетом ширины рамных опор и конфигурации детали была обеспечена максимальная для работы на лабораторном стенде длина рабочей зоны в 620 мм. Согласно данным ООО «Юргинский машзавод», при работе в составе секции во время проведения стендовых заводских испытаний, контроль деформаций и напряжений поверхностей рычага производится в точке *1* на передней поверхности и точках *2* и *3* на боковой поверхности детали (рисунок 4.6). Согласно рисунку 4.6, в указанных зонах механические напряжения при нагружении составляют от 3000 до 4000 кгс/см<sup>2</sup> (294-392 МПа).



Рисунок 4.6 – Контрольные точки установки датчиков на рычаг траверсы при проведении заводских испытаний секции МКЮ.2У-12/25

Поскольку на имеющемся лабораторном стенде (рисунок 3.1) отсутствовала техническая возможность воспроизводить нагрузки, вызывающие такой уровень напряжений и деформаций рычага, экспериментальное определение деформаций проводилось при максимальной нагрузке на лабораторном стенде  $F_{\mu a c p} = 100$  кH.

Схема закрепления рычага в лабораторном стенде, при которой производилась экспериментальная оценка линейных деформаций, показана на рисунке 4.7. Данные для построения модели нагружения рычага показаны в таблице 4.6.

Расчетные значения деформаций рычага секции при нагружении на лабораторном стенде, полученные при моделировании указанной схемы МКЭ, показаны на рисунке 4.8. Геометрические параметры для создания модели рычага представлены в таблице 4.6, параметры материала для расчета даны в таблице 3.6.

Параметр	Значение, мм
Габаритная длина L <sub>общ</sub>	896
Ширина В	290
Высота Н	176
Рабочая зона L	620
Ширина рамной опоры, <i>L</i> onop	50
Длина зоны контакта с силовым узлом, $L_{\text{нагр}}$	70

Таблица 4.6 – Параметры для расчета схемы нагружения рычага на стенде



Рисунок 4.7 – Схема закрепления рычага секции крепи МКЮ.2У.12/25 в

лабораторном стенде



Рисунок 4.8 – Расчетные значения эквивалентных деформаций рычага секции

при нагружении на стенде

Исходя из результатов моделирования видно, что на передней поверхности области повышенных деформаций в пределах зоны *1* сконцентрированы вдоль сопряжения с боковой стенкой и в средней зоне и являются преимущественно деформациями растяжения по продольной оси передней поверхности рычага. На боковой поверхности деформации имеют сложный характер. В зоне 2 преобладают деформаций растяжения, в зоне *3* – сжатия. Высокая уровень деформаций в зонах *4* связаны с воздействием сил реакции опор при закреплении рычага и локализованы по линиям контакта с рамными опорами стенда, поэтому в анализе не учитывались.

Далее, для проведения экспериментального экспресс-анализа деформаций арочными СТП по  $U_{6blx}$  макета МТС, согласно методике (глава 3 п.3.3.1, рисунок 3.9), производилось разбиение исследуемой поверхности в виде матрицы на контрольные зоны, как показано на рисунке 4.9, и произведена разметка поверхности с указанием осевых линий установки АСТП. Таким образом, исследования проводились по двадцати пяти равным зонам с размерами 58×124 мм.

Значения эквивалентных деформаций (рисунок 4.8) по соответствующим контрольным зонам согласно рисунку 4.9, представлены в таблице 4.7.



Рисунок 4.9 – Схема разбиения передней поверхности рычага траверсы секции 2У-12/25

			Обозначение контрольной зоны по оси х				
			А	Б	В	Г	Д
-на		1	11	17	23	17	11
1е ко Оны	си у	2	10	12	13	12	10
чени ой за		3	9	11	12	11	8
03Н2 )ЛЬН(	0	4	10	12	14	12	10
O6 Tpc		5	11	18	22	16	11

Таблица 4.7 – Расчетные значения деформаций  $\varepsilon_{pacy} \cdot 10^{-6}$  по контрольным зонам

Далее, согласно методике п. 3.3.1, для каждой контрольной зоны с 1 по 25 в последовательности А1-А5, Б1-Б5, В1-В5, Г1-Г5, Д1-Д5 регистрировалось выходное напряжения макета МТС, характеризующее деформаций  $\varepsilon_x$  при нагружении рычага траверсы на лабораторном стенде. Коэффициент преобразования  $K_{np}$  измерительного канала макета МТС установлен на уровне 2,6, коэффициент тензочувствительности  $K_i$  АСТП, установленного на магниты, согласно таблицы 4.5 равен 26,71. Для закрепления АСТП в контрольных зонах на поверхности рычага использованы цилиндрические магниты сплава NdFeB марки N35 диаметром 10 мм. В зависимости от материала поверхности ОК и конструкции УЭ форма и марка магнитов может потребовать дополнительных исследований.

Результаты исследования поверхности по контрольным зонам приведены в таблице 4.8. Каждый отсчет представлял собой среднее значение по  $U_{Gull}$  после трех циклов нагружения, при этом перед каждым измерением производилось снятие и переустановка АСТП.

На основе полученных данных построена диаграмма-поверхность (рисунок 4.10), отражающая уровень  $U_{вых}$  при оценке линейных деформаций по оси xисследуемой передней поверхности рычага по контрольным зонам по данным АСТП при нагружении на лабораторном стенде.

				Обозначение контрольной зоны по оси Х						
				А	Б	В	Г	Д		
-H(	ОП		1	0,1679	0,4004	0,5844	0,3293	0,1259		
означение ко	IHH	си Ү	си Ү	ои зоны си Ү	2	0,1856	0,3844	0,3988	0,3833	0,2343
	ой 3(				3	0,2791	0,3257	0,3613	0,3846	0,1899
	ЛЬН	0	4	0,293	0,3662	0,4384	0,386	0,1735		
00	трс		5	0,1709	0,4039	0,5884	0,3328	0,1289		

Таблица 4.8 – Значения U<sub>вых</sub> при экспресс-анализе передней поверхности рычага арочным СТП



Рисунок 4.10 – Уровень выходного напряжения U<sub>вых</sub> при исследовании передней поверхности рычага оси *х* при нагружении

Численная оценка погрешности, определенная как отношение расчетных результатов к экспериментальным (рисунок 4.11) показала, что коэффициент корреляции Пирсона 0,9 <  $r_{xy} = 0,883 < 1$  указывает на тесную связь расчетных значений деформаций и экспериментальных значений выходного напряжения макета МТС (по шкале Чеддока – высокая), то есть с увеличением расчетных деформаций  $\varepsilon_{\text{расч}}$ увеличиваются значения выходного сигнала  $U_{6blx}$  (рисунок 4.12).



Рисунок 4.11 – Соотношение расчетных и экспериментальных данных при обследовании передней поверхности рычага



Рисунок 4.12 – Оценка погрешности результатов экспресс-анализа

121

Связь расчетных и экспериментальных данных (рисунок 4.12) с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,78$  является функционально зависимой с уравнением линейной аппроксимации

$$\varepsilon_{pacy} = 26,47 \cdot U_{sbix} + 5,11. \tag{4.4}$$

Проверка значимости полученной зависимости (4.4) по F-критерию Фишера [117] на уровне значимости 0,05 показала отклонение нулевой гипотезы и значимость уравнения регрессии со значительным превышением  $F_{\phi a \kappa \tau} = 80,96$  в сравнении с  $F_{\tau a \delta \pi} = 4,67$ .

Средняя ошибка аппроксимации составляет 11,7 %; таким образом, значения  $U_{6blx}$  отклоняются от теоретических в среднем на 11,7 %, хотя присутствуют значения не входящие в 15 % зону. Точки с наибольшими ошибками аппроксимации соответствуют крайним контрольным зонам A1, A5, Д1 и Д5 в которых регистрировался наименьший сигнал АСТП.

Такое аналитическое сопоставление полученных результатов имеет смысл только для передней поверхности, потому как при установленной схеме нагружения (рисунок 4.7) на ней преобладают деформации растяжения по оси *x*.

Однако экспресс анализ на боковой поверхности рычага траверсы позволил дать оценку линейных деформаций отдельно по осям *x* и *y* (рисунок 4.13). Для этого боковая поверхность разбивалась на 19 и 10 контрольных зон соответственно, как показано на рисунках 4.13 а, 4.13 в.

Результаты анализа боковой поверхности рычага траверсы по оси x представлены в таблице 4.9 и на диаграмме (рисунок 4.13 б), по оси y – в таблице 4.10 и на диаграмме (рисунок 4.13 г).

На рисунке 4.13 в видны области высоких значений  $U_{6blx}$  в зонах Б1-Г1 и Б5-Г5 при этом значения в контрольных зонах Б1-Г1 сопоставимы со значениями в смежных зонах Б5-Г5 на передней поверхности (рис 4.10). Вследствие чего характер деформации в зонах Б1-Г1 также определен как деформация растяжения.

				С	Обозначение контрольной зоны по оси х									
				А	Б	В	Γ	Д						
-HC	ОП		1	0,163625	0,350358	0,588872	0,350204	0,057869						
означение ко пъной зоны	оны	~	2 0,227641 0,078573 0,185		0,185725									
	0Й 3	с ирс	<b>1 1 1 1 1 1 1 1 1 1</b>		0,301588	0,061321								
	НЫЦ	0	4		-0,306737	0,426895	-0,156081							
00	тр(		5	-0,336382	-0,384215	-0,618044	-0,434127	-0,176625						

Таблица 4.9 – Значения  $U_{\rm sbix}$  при экспресс-анализе боковой поверхности

рычага арочным СТП





В



Рисунок 4.13 – Экспресс-анализ деформаций боковой поверхности рычага траверсы секции 2У-12/25: а – схема разбиения по оси *x*, б – схема разбиения по оси *y*, в – уровень выходного напряжения при установке СТП по оси *x*, г – уровень выходного напряжения при установке СТП по оси *y* 

		Обо	означение к	онтрольной	і́ зоны по ос	си х
		А	Б	В	Г	Д
Обозначение	1	-0,09968	-0,23173	-0,27511	-0,23709	-0,10092
зоны по оси у	2	-0,17835	-0,55270	-0,89615	-0,59944	-0,19468

Таблица 4.10 – Значения U<sub>вых</sub> при экспресс-анализе боковой поверхности рычага арочным СТП

Помимо характеристик, связанных с уровнем выходного сигнала, характеризующих деформированное состояние исследуемой поверхности по осям x и y, экспресс анализ позволил сделать вывод относительно характера деформации в контрольных зонах при исследовании боковой поверхности по оси x. На диаграмме 4.13 в отчетливо определяется нейтральный слой в контрольных зонах 3Б, 3В, 3Г, в которых линейные деформации поверхности, характеризующие нормальные напряжения сечения, близки к нулю. Вне нейтрального слоя деформации растяжения и сжатия определялись по возрастанию или убыванию  $U_{6bx}$ , характеризуются знаком (таблицы 4.9, 4.10) и распределяются согласно таблице 4.11.

Таблица 4. 11. Распределение деформаций растяжения и сжатия на боковой поверхности

					Обозначение контрольной зоны по оси х						
				А	Б	В	Г	Д			
1е кон-	0П		1	растяжение	растяжение	растяжение	растяжение	растяжение			
	IdHC	,	2		растяжение	растяжение	растяжение				
нен	ой 3(	си у	оси у	си у	3		_	растяжение	_		
означ	НЫЦ	0	4		сжатие	_	сжатие				
00	трс		5	сжатие	сжатие	сжатие	сжатие	сжатие			

## 4.2.2 Оценка стабильности измерений при оценке деформаций рычага траверсы секции МКЮ.2У-12/25 при многократной переустановке АСТП и комбинированном способе закрепления

Оценка стабильности результатов оценки деформаций по  $U_{664x}$  в контрольной зоне рычага траверсы секции МКЮ.2У-12/25 с многократной переустановкой АСТП проводилась с использованием комбинированного способа закрепления. Для этого на переднюю поверхность рычага, согласно схеме (рисунок 3.7), были установлены винтовые стойки для трех образцов АСТП. После монтажа АСТП (рисунок 4.14) были в два раза увеличены коэффициенты преобразования каналов макета МТС (согласно п. 3.2.3), после чего производилось 6 циклов нагружения рычага на лабораторном стенде. Три цикла со ступенями 30-60-90 кН и три цикла со ступенями 40-60-80-100 кН, время выдержки на ступенях около минуты. При этом перед каждым циклом нагружения производилось снятие и переустановка каждого АСТП без демонтажа винтовой стойки, то есть ослабление фиксирующих гаек и их затяжка.



Рисунок 4.14 – Положение АСТП на передней поверхности рычага

Зафиксированное и учтенное изменение температуры в помещении за время проведения эксперимента составило 0,2 °C – с +24.9 до +25.1 °C. На обозначенных ступенях нагружения производилась регистрация данных макетом МТС. Каждый отсчет представлял собой среднее значение  $U_{6blx}$  из соответствующих одной ступени нагружения. Полученные данные после шести циклов сведены в таблицу 4.12.

Таблица 4.12 – Изменение выходного сигнала макета МТС от величины прикладываемой нагрузки

Нагрузка <i>F</i> , кН	$U_{\rm bbix}$ ACTII 1, B	$U_{\rm bbix}$ ACTII 2, B	$U_{\rm bbix}$ ACTII 3, B
30	0,23471	0,22408	0,26640
30	0,22473	0,26904	0,25196
30	0,21898	0,27836	0,22447
40	0,29136	0,30315	0,35643
40	0,32682	0,36504	0,30356
40	0,29823	0,29855	0,28753
60	0,43018	0,43896	0,43716
60	0,43685	0,43379	0,46276
60	0,42147	0,49079	0,45613
60	0,44300	0,42005	0,40270
60	0,46313	0,45026	0,47318
60	0,47235	0,41283	0,43527
80	0,55837	0,58762	0,57299
80	0,59132	0,58312	0,61447
80	0,59432	0,60136	0,54261
90	0,66834	0,60553	0,62842
90	0,64133	0,66320	0,61215
90	0,61183	0,65378	0,63281
100	0,68058	0,70765	0,69411
100	0,73737	0,68185	0,69849
100	0,76680	0,71724	0,74202

Пирсона  $0,9 < r_{xy} = 0,989 < 1$  указывает на тесную связь *F* и  $U_{gblx}$  (по шкале Чеддока – весьма высокая), то есть с увеличением нагрузки *F* увеличивается выходное напряжение  $U_{bblx}$ . С уравнением линейной аппроксимации

$$U_{\rm Bbix} = 0.045 + 0.066 \cdot F \tag{4.5}$$

коэффициент детерминации  $R^2$  составил 0,978 %. Проверка значимости зависимости (4.5) по F-критерию Фишера на уровне значимости 0,05 показала отклонение нулевой гипотезы и значимость уравнения регрессии со значительным превышение  $F_{\phi a \kappa r} = 2670,61$  в сравнении с  $F_{raбл} = 4$ . Средняя ошибка аппроксимации составляет 4,76 %.



Рисунок 4.15 – Зависимость сигнала макета МТС по данным АСТП 1, АСТП 2, АСТП 3 от нагрузки на рычаг траверсы секции МКЮ.2У-12/25

Таким образом, по результатам эксперимента установлено, что относительная погрешность получаемых значений выходного сигнала при многократной переустановке АСТП на винтовых стойках не превышает 5 % от теоретических значений.

#### 4.2.3 Сопоставление полученных результатов с другими методами НК

Для контроля процесса оценки деформаций рычага секции МКЮ.2У-12/25 при проведении экспериментальных исследований по оценке стабильности измерения с многократной переустановкой АСТП параллельно фиксировались параметры нагруженности рычага с применением спектрально-акустического метода [118] и метода акустической эмиссии. Для этого на переднюю поверхность рычага были установлены преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ) и в контрольной зоне установлен датчик поверхностных акустических волн (рисунок 4.16) [101].



Рисунок 4.16 – Оборудование НК при исследовании рычага секции МКЮ.2У-12/25 на лабораторном стенде: 1 – макет МТС; 2 – измерительновычислительный центр «Астрон»; 3 – АЭ измерительный комплекс «A-line»

Методом АЭ по локализации сигналов удалось подтвердить значительную концентрацию напряжений от нагрузки в контрольной зоне, по малой амплитуде определить характер деформаций как упругую, а монотонно спадающему виду распределения, близкому к экспоненциальному, отсутствие дефектов на исследуемой поверхности. Для регистрации сигналов использовалась АЭ система

«A-line 32D» и ПАЭ GT200 с полосой пропускания 130...200 кГц. Установленный тип локации – линейная, способ локализации источников АЭ – временной (РВП).

По линейной динамике изменения времени задержки волн Релея при нагружении рычага на стенде (рисунок 4.17) спектрально-акустическим методом определен характер деформаций передней поверхности рычага в контрольной зоне как прямо пропорциональные к приложенной нагрузке. Время задержки поверхностных акустических волн чувствительны к изменениям структуры металла и имеют связь с механическими свойствами материалов, являются косвенной характеристикой деформированного поверхностного слоя металла ОК в режиме реального времени [118]. Фиксация параметров нагружения спектрально-акустическим методом проводилась на измерительно-вычислительном центре «АСТРОН».



Рисунок 4.17 – Изменение выходных сигналов ВЦ «Астрон» (а) и макета МТС (б) от нагрузки на рычаг траверсы секции МКЮ.2У-12/25

На рисунке 4.17 представлен результат оценки нагруженности рычага секции МКЮ.2У-12/25 спектрально-акустическим методом (ВЦ «Астрон») при нагружении на лабораторном стенде, который заключался в одновременном измерении шести циклов нагружения с макетным образцом МТС и АСТП.

Разброс значений *R* для спектрально-акустического метода при его чувствительности (100нс/10кН) не превысил 0,1 %. Относительная погрешность значений от линий регрессии для преобразователей АСТП 1 и АСТП 2 составила не более 5 %. Полученные результаты показывают высокое соответствие регистрируемых значений для используемых методов неразрушающего контроля.

#### 4.3 Заводские стендовые исследования секции МКЮ.2У-07/19

## 4.3.1. Оценка механических напряжений перекрытия секции МКЮ.2У-07/19 арочными СТП

Заключительным этапом экспериментальных исследований были испытания по оценке механических напряжений в контрольных точках перекрытия секции МКЮ.2У-07/19 в заводских условиях под нагрузкой на стенде для проведения исследовательских и сертификационных испытаний секций механизированных крепей ООО «Юргинский машзавод» с применением АСТП и макетного образца МТС.

Испытания проводились по разработанной заводом и утвержденной методике в соответствии с ГОСТ Р 52152-2003 и европейским стандартом EN 1804:2001, которая предполагает автоматизированное управление процессом самораспора секции с помощью компьютера и регистрацию показаний тензометрических датчиков посредством регистрации данных измерительной системой. Характер исследований – гидравлические испытания самораспора с давлением сопротивления до 56 МПа, перегрузка относительно номинального сопротивления секции с коэффициентом  $K_1$ = 1,2 при различных схемах распора секции в стенде «Gluckauf» (рисунок 1.5). Стенд предназначен для испытания крепи с усилием до 15000 кН, зарегистрирован в Управлении Ростехнадзора по Кемеровской области за № 68-ИД-20522-2006 от 30.03.06, аттестован в ФГУ «Кемеровский ЦСМ» и признан пригодным для проведения испытаний на соответствие EN 1804-1, ГОСТ 52152-2003 (протокол аттестации № 636 от 19.07.10)

Объект испытаний – секция механизированной крепи МКЮ.2У-07/19 (МКЮ.2У.75.00.000.000). Основные характеристики секции представлены в таблице 4.13.

Параметр	Значение	
Минимальная конструктивная высота, мм	850	
Максимальная конструктивная высота, мм	1900	
Сопротивление крепи, кН / м <sup>2</sup>	496617	
Тип основания	Жесткий катамаран	
Количество гидравлических стоек, шт.	2	
Тип стоек	Двойной гидр. раздв.	
Диаметр поршня, мм	250	
Давление настройки предохранительного кла- пана в стойке МПа	43	
	32	
	52	
Коэффициент начального распора	0,74	
Давление на почву, МПа	1,9	
Вид гидравлического управления	Электрогидравлическое	
Габариты секции крепи в транспортном (сло-		
женном) положении, мм:		
высота	900	
ширина	1450	
длина	5700	
Масса, т	10,4	

Таблица 4.13 – Основные характеристики секции МКЮ.2У-07/19

Схема распора перекрытия – имитация поперечного изгиба. Для этого перед распором секции в стенде на верхнюю поверхность перекрытия у основания и на краю консоли устанавливались стальные подкладки квадратного сечения, как показано на рисунках 4.18 а, б. На перекрытие секции были установлены элементы макета МТС: разработанные АСТП – 1 параллельно штатной поверенной тензометрической системе ZET-Lab-017-T8 [60] с проволочными тензорезисторами типа ПКС – 5, усилитель – 2, АЦП – 3, индикаторы температуры – 4 (рисунок 4.19).



Рисунок 4.18 – установка подкладок на перекрытие секции МКЮ.2У-07/19 при испытаниях на изгиб



Рисунок 4.19 – Секция МКЮ.2У-07/19 в испытательном стенде ООО «Юргинский машзавод» с установленными АСТП и элементами макета МТС

Контрольные точки для установки тензорезисторов и АСТП на нижней поверхности перекрытия секции МКЮ.2У-07/19 определены совместно с сотрудниками предприятия на основе расчета зон наибольших напряжений (рисунок 4.20 а) для давления самораспора 56 МПа и показаны на рисунке 4.20 б.



Рисунок 4.20 – Перекрытие секции МКЮ.2У-07/19: а – расчетное распределение напряжений, б – схема установки тензорезисторов (1–6) и АСТП

Измерительная база АСТП в 100 мм значительно превышает базу используемых со штатной системой проволочных тензорезисторов, в связи с чем для проведения испытаний в пределах измерительной базы АСТП установлены по три тензорезистора 1, 3 и 4, 6 на периферии и 2, 5 на средней точке, как показано на рисунках 4.20, 4.21 б, в.



Рисунок 4.21 – Расположение АСТП и тензорезисторов в контрольных зонах нижней поверхности перекрытия секции МКЮ.2У-07/19

Согласно методике и программе стендовых испытаний, с 0 МПа давления в стойках производилось нагружение до значения 5 МПа для завершения подготовительных операций, раскерновки и установления датчиков перемещений. Также

на данной ступени нагрузки производилась оценка необходимого уровня усиления макета МТС. Установлен коэффициент усиления, обеспечивающий 2В выходного сигнала при 60 МПа давления в стойках.

После этого был проведен цикл нагружения секции в стенде для нанесения шкалы соответствия между сигналом макета МТС – выходным напряжением и значениями механических напряжений в контрольных точках. Такая механическая тарировка производилась на основе данных штатной тензометрической системы. В результате цикла нагружения построен тарировочный график макета МТС, представленный на рисунке 4.22.



Таким образом, для текущего уровня коэффициента преобразования информации канала тензометрической системы зависимость механических напряжений  $\sigma$  поверхности ОК от выходного напряжения  $U_{\rm solx}$  макета МТС выражалась как:

$$\sigma = 1,149 - 249, 1 \cdot U_{\rm galx} \tag{4.6}$$

Далее производилось нагружение секции до давления в стойках 17 МПа, под которым удерживалась около минуты (для проведения измерений, записи и сохранения результатов). Затем секция разгружалась до давления 5 МПа. Такие же циклы выполнены для нагрузок под давлением 26 МПа, 34 МПа, 39 МПа, 43 МПа, 46 МПа, 49 МПа, 52 МПа и 56 МПа.

Характер изменения механических напряжений перекрытия от нагрузки по времени, регистрируемый макетом МТС по данным АСТП 1 и АСТП 2, представлен на рисунке 4.23.

Определено, что при нагружении секции левая сторона консоли перекрытия (сторона с установленными АСТП 1, тензорезисторами 1, 3 на рисунке 4.21) воспринимала незначительно бо́льшую нагрузку – в среднем на 4-6 %. Это может быть обусловлено характером установки распорочных брусков, качеством контактных поверхностей или особенностью конструкции секции и конематических связей её элементов.

Максимальные значения напряжений по данным АСТП 1 и АСТП 2 составили 428 МПа и 402 МПа соответственно. Соответствующие значения, регистрируемые штатной тензосистемой, составили 433 МПа (по данным тензорезитора 3, расположенном на левой стороне перектытия, см. рисунок 4.21) и 428 МПа (по данным тензорезитора 6, расположенном на правой стороне перекрытия, см. рисунок 4.21).

Итоговая зависимость механических напряжений от нагрузки в контрольных зонах перекрытия секции МКЮ.2У-07/19 в результате стендовых испытаний, полученная по разработанной методике с использованием АСТП, оборудованием макетного образца МТС и программной системы «Стенд-Инфо» представлена на рисунке 4.24.







Рисунок 4.24 – Зависимость напряжений от давления при нагрузке для АСТП 1 и АСТП 2

При сравнительной оценке результатов измерений с расчетными значениями, полученными по уравнению линейной регрессии, среднее отклонение данных для АСТП 1 и АСТП 2 не превысило 5,1 %. При сравнении полученных данных с результатами измерения напряжений штатной тензометрической системой отклонения данных АСТП 1 составили не более 1 %, для АСТП 2 – не более 2 %.

#### 4.4 Выводы по главе 4

1. Установлено, что использование АСТП на базе УЭ и полупроводниковых тензорезисторов KSP-6-350 позволяет повысить чувствительность оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи более чем в 12 раз в сравнении с результатами приклеиваемых металлофольговых тензорезисторов типа ПКС-5-120, компенсируя падение чувствительности АСТП за счет включения УЭ в измерительную цепь.

2. Показано, что чувствительность АСТП 1, закрепленного на комбинированное винтовое крепление на 9 % выше, чем АСТП 2, закрепленного на при-

138

жимное магнитное крепление. При этом прижимное крепление может быть использовано для установки датчика на элементы металлоконструкций секции механизированной крепи для оперативного измерения деформаций в произвольной зоне объекта контроля.

3. Предложенный метод экспресс-анализа НДС при установке АСТП на NdFeB магниты позволяет в произвольном месте плоской поверхности металлоконструкции элемента секции механизированной крепи проводить исследования деформаций по оси, совпадающей с осью АСТП и наглядно визуализировать деформированное состояние исследуемой поверхности со средним отклонением расчетных и измеренных значений не более 12 %.

4. По результатам эксперимента установлено, что при многократной переустановке АСТП на винтовых стойках при оценке деформаций рычага траверсы секции МКЮ.2У.12/25 относительная погрешность получаемых значений выходного сигнала не превышает 5 % от расчетных значений.

5. В процессе заводских испытаний секции механизированной крепи АСТП позволяют регистрировать характер изменения механических напряжений перекрытия секции в диапазоне от 0 до 450 МПа в режиме реального времени при рабочих нагрузках на стенде в диапазоне давления распора секции от 0 до 56 МПа с возможностью изменения местоположения зоны измерения.

6. В результате испытаний секции МКЮ.2У-07/19 установлено, что максимальные значения механических напряжений в контрольных точках перекрытия, по данным АСТП 1 и АСТП 2, при нагрузке 56 МПа составили 428 МПа и 402 МПа соответственно. Отклонения значений, полученных с использованием АСТП, относительно значений штатной поверенной и сертифицированной тензометрической системы не превышают 2 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований получены новые научно обоснованные технические решения актуальной задачи оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи под воздействием рабочих нагрузок, имеющие существенное значение для развития горного машиностроения.

Основные научные и практические результаты сводятся к следующему:

1. Установлено, что для оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи путем измерения уровня деформаций и напряжений, перспективным является использование съемных тензометрических преобразователей, применение которых позволяет изменять положение контрольной зоны.

2. Выявлено, что максимальные значения деформаций УЭ СТП для оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи с базой 100 мм и высотой 10 мм при сопоставимых деформациях объекта контроля обеспечиваются для конфигурации арочного УЭ с вогнутым сводом переменного сечения от монтажных площадок до вершины со значениями от 10 до 5 мм и радиальным сопряжением дуг свода радиусом 10 мм.

3. Разработаны методика оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи под воздействием рабочих нагрузок с использованием арочных СТП и технические средства для её практической реализации, в составе нагружающего стенда, макетного образца мобильной тензометрической системы и программы визуализации и обработки данных, позволяющие повысить эффективность за счет возможности оперативной переустановки ПИП и корректировки контрольной зоны.

4. Экспериментально определены коэффициенты тензочувствительности СТП на основе арочного УЭ с вогнутым сводом и полупроводникового тензорезистора типа KSP для оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи, которые составляют при комбинированном способе закрепления – 29,76, а при прижимном способе закрепления – 26,71.

5. Показано, что предложенный метод экспресс-анализа при установке арочных СТП на NdFeB магниты (прижимной способ закрепления) позволяет в элементах металлоконструкции секции механизированной крепи проводить оценку деформаций по оси, совпадающей с осью СТП, и наглядно визуализировать деформированное состояние исследуемой поверхности со средним отклонением от расчетных значений не более 12 %.

6. По разработанной методике с использованием СТП произведена оценка нагруженности перекрытия секции МКЮ.2У-07/19 на стенде «Gluckauf» в заводских условиях ООО «Юргинский машзавод» и получена зависимость механических напряжений в контрольных точках от статической нагрузки, при этом среднее значение отклонений полученных напряжений от напряжений, измеренных с использованием штатной тензометрической системы, составило 2 %.

Направления дальнейших исследований:

- оценка динамических процессов при нагружении элементов металлоконструкций секции;

- оценка нагруженности элементов секций механизированной крепи во взрывоопасной среде.

## Список сокращений

- АСТП арочный съемный тензометрический преобразователь
- ГШО горношахтное оборудование
- МКЭ метод конечных элементов
- МТС мобильная тензометрическая система
- НК неразрушающий контроль
- ОК объект контроля
- ПИП первичный измерительный преобразователь
- ПК персональный компьютер
- ПО программное обеспечение
- РПМ рабочая программа и методика испытаний
- СТП съемный тензометрический преобразователь
- УЭ упругий элемент

## Список литературы

 Рудаченко А. В. Исследование напряженно-деформированного состояния трубопроводов: учеб. пособие / А. В. Рудаченко, А. Л. Саруев; ТПУ. – Томск, 2011. – 136 с.

2. О внесении изменений в Правила безопасности в угольных шахтах, утвержденные Постановлением Гостехнадзора России от 05 июня 2003 г. № 50» : Приказ Ростехнадзора от 20.12.2010 г. № 1158 // «Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти», – № 16. – 18.04.2011.

 Гелескул, М. Н. Справочник по креплению горных выработок. – М., 1972.

4. Об утверждении стратегии социально-экономического развития Кемеровской области до 2025 года : Закон Кемеровской области от 11.07.2008 г., № 74-ОЗ // «Законодательный вестник Совета народных депутатов Кемеровской области». – № 74. – I часть. – 21.07.2008.

5. Об утверждении Стратегии развития тяжелого машиностроения на период до 2020 года // Приказ Минпромторга РФ от 09.12.2010 г., № 1150. – URL: <u>http://minpromtorg.gov.ru/docs/#!173</u> (дата обращения: 01.08.2014).

6. Об утверждении Методических указаний по проведению экспертизы промышленной безопасности очистных механизированных комплексов : Постановление Гостехнадзора РФ от 10.06.2003 г. № 82 // «Российская газета» (специальный выпуск). – № 120/1. – 21.06.2003

 ГОСТ Р 52152-2003. Крепи механизированные для лав. Основные параметры. Общие технические требования. Методы испытаний. Введ. 01.01.2005. – Москва. 2003. – 28 с.

8. Никитенко М. С. Технические требования к системе диагностики состояния конструкций секций механизированных крепей // Современные техника и технологии: сб. трудов XIX Международной науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 3. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 150-151.

Демура В. М. Технологические схемы подготовки и отработки выемочных участков на шахтах ОАО «СУЭК-Кузбасс» / В. М. Демура, В. Б. Артемьев,
С. В. Ясюченя – М.: «Горное дело», – 2014. – 256 с.

Бурков, П. В. Анализ концентраторов напряжений, возникающих при испытаниях секции крепи МКЮ.2Ш-26/53 в COSMOS-Works / П. В. Бурков, К. В. Епифанцев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № ОВЗ. – С. 16-26.

 Кузнецов Г. Н. Изучение проявлений горного давления на моделях / Г. Н. Кузнецов, М. Н. Будько. – М.: Углетехиздат, 1959.

 Ерохин А. И. Шахтные исследования режимов нагружения крепи 1МК // Горные машины и автоматика. – 1969. – № 7.

13. Кузнецов С. Т. Проявление горного давления в очистных выработках при применении механизированных крепей. – М.: Недра, 1966.

Глушихин Ф. П. Моделирование в геомеханике / Ф. П. Глушихин, Г. Н.
Кузнецов, М. Ф. Шклярский. – М.: Недра, 1991. – 240 с.

15. Трумбачев, В. Ф. Измерение напряжений и деформаций методом фотоупругих покрытий / В. Ф. Трумбачев, Γ. А. Катков. – М.: Недра, 1966.

16. Абросимов Н. Д. Взаимодействие механизированной крепи «Донбасс» с породами кровли / Н. Д. Абросимов, Г. А. Катков // Технология добычи подземным способом. – 1968. – № 4.

17. Любимов А. Н. Исследование внутренних напряжений в элементах крепи комплекса МК // Горные машины и автоматика. – 1968. – № 10.

18. Александров Б. А. Исследование процесса взаимодействия с почвой основания механизированных крепей для пластов наклонного падения в условиях Кузнецкого бассейна: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Александров Борис Алексеевич. – Кемерово, 1970. – 180 с.
19. Глазов Д. Д. Исследование взаимодействия перекрытия механизированных крепей наклонного падения с обрушенными породами: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Глазов Дмитрий Дмитриевич. – Кемерово, 1970. – 240 с.

А.с.1135906 СССР, МКИ4 Е21D 23/04. Основание секции механизированной крепи / Кузбас. политехн. ин-т; Б. А. Александров, Н. Д. Бенюх, Ю. А. Антонов, Г. Д. Буялич. – Опубл. в Б.И., 1985, № 3.

 А.с.1067221 СССР, МКИЗ Е21D 23/04. Устройство для крепления забоя / Кузбас. политехн. ин-т; А. Н. Коршунов, Б. А. Александров, Ю. А. Антонов. – Опубл. 15.01.1984, бюл. № 2.

22. А.с.883486 СССР, МКИЗ Е21D 23/04. Устройство для крепления забоя / Кузбас. политехн. ин-т; А. Н. Коршунов, Б. А. Александров, Ю. М. Леконцев. – Опубл. в Б.И., 1981, № 43.

23. Мышляев Б. К. О направлениях развития техники и технологии очистных работ на шахтах РФ // Уголь. – 1999. – № 4. – С. 39-43.

24. Титов С. В. Эксплуатационные свойства современных механизированных крепей для пологих средней мощности и мощных пластов / С. В. Титов, Б. К. Мышляев // Горные машины и автоматика. – 2004. – № 5. – С. 2-6.

25. Буялич Г. Д. Направления совершенствования механизированных крепей для отработки угольных пластов в сложных горно-геологических условиях : Горная техника: добыча, транспортировка и переработка полезных ископаемых : каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2007. – С. 10-16.

26. Буялич Г. Д. Повышение сопротивления консолей механизированной крепи / Г. Д. Буялич, Б. А. Александров, Ю. А. Антонов, В. В. Воеводин // Физи-ко-техническаие проблемы разработки полезных исковаемых. – 2000. – № 5. – С. 82-87.

27. Буялич Г. Д. Лабораторные исследования взаимодействия крепи с кровлей / Г. Д. Буялич, Ю. А. Антонов, В. И. Шейкин // Горный информационноаналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № ОВЗ. – С. 114-118. 28. Буялич Г. Д. Регулярная сетка конечных элементов манежного уплотнения гидростоек / Г. Д. Буялич, К. Г. Буялич // Горный информационноаналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № ОВЗ. – С. 119-122.

29. Жуковская Ю. В. Автоматизированный анализ несущих элементов металлоконструкций механизированных крепей // Вестник КАСУ. – 2009. – № 1. – С. 238-244.

30. Бурков П. В Определение параметров напряженно-деформированного состояния перекрытия механизированной крепи МКЮ.2Ш-26/53 производства ООО «Юргинский машзавод» при ее испытании на изгиб и на изгиб с кручением / П. В. Бурков, К. В. Епифанцев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 12. – С. 93-100.

Диагностика горных машин и оборудования / Б.Л. Герике, П.Б. Герике,
 Г.И. Козловский. – М: ИПО «У Никитинских ворот», 2012. – 400 с.

 Ефимов П. П. Экспериментальные методы исследования мостов. Ом-ГТУ. – Омск, 1994. – 195 с.

 Степанова Л. Н. Микропроцессорные многоканальные тензометрические системы для динамических испытаний конструкций / Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов, С. А. Бехер, М. С. Никитенко // Датчики и системы. – 2011. – № 8. – С. 29-34.

34. Stepanova L. N. Microprocessor multi-channel strain-gauge systems for dynamic test of structures / L. N. Stepanova, S. I. Kabanov, S. A. Bekher, M. S. Nikitenko // Automation and Remote Control. -2013. -T. 74. -N 5. -C. 891-897.

35. Степанова Л. Н. Ресурсные испытания конструкций с использованием микропроцессорных тензометрических систем / Л. Н. Степанова, В. Л. Кожемякин // Дефектоскопия. – 2007. – № 7. – С. 85-90.

36. Степанова Л. Н. Измерительный преобразователь быстродействующей тензометрической системы для динамических испытаний конструкций / Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов, Е. Ю. Лебедев // Датчики и системы. – 2007. – № 5. – С. 29-32.

37. Пат. РФ 2292051, МПК G 01 R27/2. Преобразователь изменения сопротивления резистивных датчиков в электрический сигнал / Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов, Е. Ю. Лебедев. Опубл. 10.01.2007, бюл. № 2.

Лысенко С. А. Тензометрический контроль состояния конструкций / С. А.
 Лысенко, Я. Д. Черненко, Г. Д. Петров // В мире неразрушающего контроля. –
 2001. – № 4 (14). – С. 21-23.

39. Измерительный модуль многоканальной ИИС на 4000 тензорезисторов для зала натурных испытаний ЦАГИ / Е. Г. Зубов, И. А. Кодина, А. И. Лебедева // Научно-технический отчет ЦАГИ, 2003. – С. 356-357.

40. Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций /
А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов; под ред. Л. Н. Степановой,
А. Н. Серьезнова. – М.: Машиностроение, 2008. – 440 с.

41. Тензодатчики силы и их применение в сило- и весоизмерительной технике / В. А. Абанин, В. А. Паршуков, Г. В. Леонов. – Барнаул: Изд-во Алтайского гос. тех. университета, 2004. – 92 с.

42. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В. В. Клюев, Φ. Р.
 Соснин, В. Н. Филинов. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с.

43. Модельные исследования и натурная тензометрия энергетических реакторов / Н. А. Махутов, К. В. Фролов, Ю. Г. Драгунов. – М.: Наука, 2001. – 293 с.

44. Степанова Л. Н. Первичные преобразователи на железнодорожном транспорте: учеб. пособие / Л. Н. Степанова, А. Н. Серьезнов, Е. В. Лесных. – Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2009. –164 с.

45. Об утверждении Перечня типовых видов опасных производственных объектов для целей регистрации в государственном реестре: Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25 апреля 2006 г. № 389.

46. Об утверждении Административного регламента Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору по исполнению государственной функции по регистрации опасных производственных объектов и ведению государственного реестра опасных производственных объектов : Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 4 сентября 2007 г., № 606.

47. Крепи механизированные // Юргинский машзавод. – URL: <u>http://www.yumz.ru/product/mine/krepi/</u> (дата обращения: 01.08.2014).

48. Крепь сопряжения с боковым ограждением КСБЮ // Юргинский машзавод. – URL: <u>http://www.yumz.ru/product/mine/krepi/ksbu/</u> (дата обращения: 01.08.2014).

49. Клокова Н. П. Тензорезисторы / Н. П. Клокова. – М.: Машиностроение, 1990. – 222 с.

50. Микропроцессорная многоканальная тензометрическая система для прочностных испытаний конструкций / Л. Н. Степанова, Е. Ю. Лебедев, С. И. Кабанов // Дефектоскопия. – 2001. – № 4. – С. 82-89.

51. Научно-исследовательское отделение усталостной, статической и тепловой прочности авиационных конструкций // СибНИА. – URL: <u>http://sibnia.ru/nauchnaya-baza/nio-2/vyipolnyaemyie-rabotyi.php?sphrase\_id=527</u> (дата обращения: 05.11.2014).

52. Аппаратура сбора данных при тензометрии механических конструкций – URL: <u>http://afrid.narod.ru/Strain.htm</u> (дата обращения: 05.11.2014).

53. Тензометрическая система «Эпсилон» // ЦАГИ НПП «Аэротест». – URL: http://www.tsagi.ru/rus/res/measurements/epsilon/ (дата обращения: 10.03.2013).

54. Измерительная система для работы с тензорезисторами СТММ // ЦАГИ НПП «Аэротест». – URL: <u>http://www.tsagi.ru/rus/res/measurements/stmm/</u> (дата обращения: 10.03.2013).

55. Устройство измерительно-управляющее УИУ 2002 // НПП «ПАРК-ЦЕНТР». – URL: <u>http://www.parc-centre.spb.ru/prod2002.htm</u> (дата обращения: 05.11.2014).

56. MIC-185 Многоканальная тензостанция для статического тензометрирования // НПП «MEPA». – URL: <u>http://www.nppmera.ru/mic-183</u> (дата обращения: 05.11.2014). 57. МІС-026 Универсальный переносной многоканальный измерительновычислительный комплекс // НПП «MEPA». – URL: <u>http://www.nppmera.ru/mic-026</u> (дата обращения: 05.11.2014).

58. МС-212 Модуль для работы с тензометрическими датчиками // НПП «MEPA». – URL: <u>http://www.nppmera.ru/mc-212</u> (дата обращения: 05.11.2014).

59. Измерительные комплексы TEPEM-4 (системы мониторинга) // Интерприбор. – URL: <u>http://www.interpribor.ru/terem4.php</u> (дата обращения: 05.11.2014).

60. Тензометрическая станция ZET 017-Т8 // ZETLAB. – URL: <u>http://www.zetlab.ru/catalog/analyzers/a17\_t8.php</u> (дата обращения: 05.11.2014).

61. Измерительная система Тензор-08.128 // Лаборатория Мостовых Конструкций. – URL: <u>http://uvsr.stu.ru/foto/nauka04/nauka/lmk/izm.html</u> (дата обращения: 05.11.2014).

62. PCD-300 Series Sensor Interfaces // KYOWA. – URL: <u>http://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/acquisition/s\_pcd-300\_series/index.html</u> (дата обращения: 05.11.2014).

63. Wireless Strain Measurement Systems – Applications and Solutions // Lord Micro Strain. – URL: <u>http://www.microstrain.com/wireless-strain-measurement-</u> systems-applications-and-solutions (дата обращения: 05.11.2014).

64. High Speed Digital Dynamic Strainmeter DRC-3410 // Tokyo Sokki Kenkyujo CO., Ltd. – URL: <u>http://www.tml.jp/e/product/instrument/instrument\_sub/drc3410.html</u> (дата обращения: 05.11.2014).

65. EX1629 48-Channel High Performance Strain Gauge Measurement Instrument // VTI Instruments. – URL: <u>http://www.vtiinstruments.com/Ex1629.aspx</u> (дата обращения: 05.11.2014).

66. Laboratory multi-channel systems 28000 // strainsense. – URL: <u>http://www.strainsense.co.uk/products/laboratory-multi-channel-systems</u> (дата обращения: 23.04.2013).

67. Система Q.raxx A116-32 slimline // Sensor Systems. – URL: <u>http://www.sensor-systems.ru/product\_106.html</u> (дата обращения: 05.11.2014).

68. Bielen P. A low cost wireless multi-channel measurement system for strain gauges / P. Bielen, M. Lossie, D. Vandepitte // PROCEEDINGS OF ISMA 2002. – 2002. –VOLUME II. – C. 663-670.

69. Датчик перемещения для бетонных поверхностей BCD-E-70S // Неразрушающий контроль и техническая диагностика. – URL: <u>http://www.ndt-td.ru/katalog/tenzometricheskoe-oborudovanie/tenzometricheskie-datchiki/datchiki-</u> <u>peremescheniya/datchik-peremescheniya-dlya-betonnih-poverhnostey-bcd-e-70s.html</u> (дата обращения: 12.06.2015).

 70. Тензорезисторы KCH-5A-1 // Неразрушающий контроль и техническая диагностика.

 — URL:
 <u>http://www.ndt-td.ru/katalog/tenzometricheskoe-oborudovanie/tenzorezistori/folgovie-tenzorezistori/tenzorezistori-kch-5a-1.html</u> (дата обращения: 15.08.2015).

71. US // ZetLab. – URL: <u>http://www.zetlab.ru/catalog/tenzodatchiki/us/</u> (дата обращения: 15.08.2015).

72. Тензорезисторные датчики для измерения напряжений и деформаций на поверхности бетонных, металлических конструкций, в толще бетонных конструкций и горных пород // Тензо-М. – URL: <u>http://novosibirsk.tenso-m.ru/tenzodatchiki/specialnogo-naznachenija/239/</u> (дата обращения: 15.09.2014).

73. Датчик деформации Samcell // SMS sensor. – URL: <u>http://sensor-sms.ru/full-</u> <u>catalogue-2/product/tenzodatchki-datchik-deformatsii-samcell</u> (дата обращения: 12.07.2015).

74. Тензометрия в машиностроении / Р. А. Макаров, А. Б. Ренский, Г. Х. Боркунский, М. И. Этингоф. – М.: Машиностроение, 1975. – 287 с.

75. Андреева, Л. Е. Упругие элементы приборов. – М.: Машгиз, 1962. – 236с.

76. Никитенко М. С. Подбор упругого элемента тензометрического датчика системы оперативного контроля состояния промышленных конструкций // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 9. – С. 42-45.

77. Маликов, Г. Ф. Расчеты упругих тензометрических элементов /
 Г. Ф. Маликов, А. Л. Шнейдерман, А. М. Шулемович. – М., 1964. – 190 с.

78. Никитенко М. С. Моделирование влияния геометрических параметров упругого элемента тензодатчика на интенсивность его деформации / М. С. Никитенко, Е. А. Гребенников // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИТСиТ-2014): материалы Всероссийской научно-практической конференции, г. Кемерово, 16–17 октября 2014 г. / Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева. – Кемерово, 2014. – С. 404-405.

79. Профос П. Измерение в промышленности: справочное издание в 3 кн. Кн.
1. Теоретические основы. – М.: Металлургия, 1990. – 492 с.

80. Профос П. Измерение в промышленности: справочное издание в 3 кн. Кн.
2. Способы измерения и аппаратура. – М.: Металлургия, 1990. – 384 с.

81. Тензорезисторы // SMS sensor. Тензорезисторы и тензодатчики. – URL:<u>http://sensor-sms.ru/full-catalogue-</u>

2/folder/tenzorezistory?\_openstat=ZGlyZWN0LnlhbmRleC5ydTs5MTI5NDcyOzM5Nj E5NzAxMTt5YW5kZXgucnU6Z3VhcmFudGVl (дата обращения: 10.12.14).

Мехеда В. А. Тензометрический метод измерения деформаций. – Самара:
 Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.

 Лаврова А. Т. Элементы автоматических приборных устройств: учеб. пособие для студентов авиационных специальностей высших учебных заведений. – М: Машиностроение, 1975. – 456 с.

84. Левшина, Е. С. Электрические измерения физических величин (Измерительные преобразователи): учеб. пособие для вузов / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

85. Джексон Р. Г. Новейшие датчики. – 2-е изд., доп. – М.: Техносфера, 2008.
– 400 с.

86. Тензорезисторы // Музей электронных раритетов. – URL: <u>http://www.155la3.ru/tenzoresistors.htm</u> (дата обращения: 05.06.2015)

87. Семёнов А. И. Создание тензорезисторов на основе р- / А. И. Семёнов,
Э. П. Гофман, А. Ф. Городецкий // Полупроводниковая тензометрия / НЭТИ. – Новосибирск, 1969. – Т. 2. – С. 62-70.

88. Семёнов А. И. Исследование тензорезисторов / А. И. Семёнов,
А. Ф. Городецкий // Физика полупроводников / НЭТИ. – Новосибирск, 1968. – Т. – С. 89-91.

89. Молдавер Т. И. Об изменении электрического сопротивления кремниевых тензорезисторов, вызванном их наклейкой / Т. И. Молдавер, Г. Н. Гук, А. Ф. Городецкий // Физика и техника полупроводников / НЭТИ. – Новосибирск, 1968. – С. 103-115.

90. Лукин В. А. Некоторые особенности измерения деформаций в широком интервале температур с помощью полупроводниковых тензорезисторов / В. А. Лукин, А. Ф. Городецкий // Полупроводниковая тензометрия / НЭТИ. – Новосибирск, 1969. – Т. І. – С. 100-118.

91. Structural health monjitoring 2010. Proceeding of Fifth European Workshop. Naples, Italy, June 28–July 4. Edited by Febio Casciaty, Vichele Giordano. 313–323 p . ISBN 978-1-60595-024-2

92. Nanomedicine: Technologies and applications. Edited by Thomas J. Webster. UK: Cambridge. Woodhead Publishing. 2012. 169–171 p. ISBN 978-0-85709-233-5

93. Степанова Л. Н. Исследование характеристик проволочных и полупроводниковых тензодатчиков, используемых для измерения ударных процессов / Л. Н. Степанова, Е. Ю. Лебедев, М. С. Никитенко // Датчики и системы. – 2013. – № 1. – С. 28-33.

94. Dorsey J. Semiconductor Strain Gage Handbook, Sect. I–VIII. Firmenduckchriften der BLH-Electronics, Inc. Waltham, Mass., USA.

95. Brackett A. Semiconductor Strain Gages, When and How. Technical Data № 4354-1. Firmenduckchriften der BLH-Electronics, Inc. Waltham, Mass., USA. 1968.

96. Тензорезисторы и аксессуары: Каталог // НВМ: Контрольноизмерительная и Весовая Техника; Эксклюзивный представитель Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Германия. – URL: <u>http://www.hbm.ru/catalog/tenzorezistory-i-aksessuary/</u> (дата обращения: 11.12.2014)

97. Тензорезисторы // Российское представительство Zemic. – URL: <u>http://www.zemic.ru/catalog/rasd2/</u> (дата обращения: 11.12.2014).

98. Тензодатчики // Zetlab: электронные технологии и метрологические системы. – URL: <u>http://www.zetlab.ru/catalog/tenzodatchiki/</u> (дата обращения: 11.12.2014).

99. Тензорезисторы для микродеформаций // Неразрушающий контроль и техническая диагностика. – URL: <u>http://www.ndt-td.ru/katalog/tenzometricheskoe-oborudovanie/tenzorezistori/tenzorezistori-dlya-mikrodeformatsiy.html</u> (дата обращения: 11.12.2014).

100. Костер У. Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков / пер. с англ. Б. Л. Горшкова. – ЗАО АВТЕКС, 2000. – 311 с.

101. Никитенко М. С. Разработка комплекса средств технической диагностики, восстановления и упрочнения элементов горнодобывающего оборудования / М. С. Никитенко, К. В. Князьков, Н. В. Абабков, Е. А. Ожиганов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № OB6. – С. 447-456.

102. Никитенко М. С. Разработка бесплатформенных встраиваемых независимых весоизмерительных комплексов для взвешивания грузов железнодорожного и автомобильного транспорта // Современные техника и технологии: XV Международная науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых, 4–8 мая 2009 года: тезисы докладов. – Томск: Издательство ТПУ, 2009. – С. 198-199.

103. Никитенко М. С. Комплексный способ диагностики, восстановления и упрочнения элементов горнодобывающего оборудования / М. С. Никитенко, К. В. Князьков // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: сб. трудов IV Международной научно-практической конференции. – Прокопьевск: Изд-во филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, 2014. – С. 208-211.

104. Никитенко М. С. Тензометрия как инструмент оценки ресурса горнодобывающего оборудования // Инновационный конвент «Кузбасс: образование, наука, инновации»: материалы Инновационного конвента. – Новокузнецк, – 2014. – С. 36-38.

105. Тензометрия в транспортном машиностроении / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов. – Новосибирск: Наука, 2014. – 272 с.

106. Бокарев С. А. Определение геометрических параметров упругого элемента тензометрического преобразователя / С. А. Бокарев, И. И. Козятник, М. С. Марченко // Строительство. – 2003. – № 10. – С. 141-143.

107. Никитенко М. С. Разработка системы оперативного контроля состояния промышленного оборудования с использованием многофункциональной тензометрической системы // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИТСиТ-2012): материалы Всероссийской молодежной конференции, г. Кемерово, 20–22 сентября 2012 г. / под ред. проф. А. Г. Пимонова; Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева. – Кемерово, – 2012. – С. 44-45.

108. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975.

109. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.

110. Алямовский А. А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. – ДМК, 2004. – 426 с.

111. Прохоренко, В. П. SolidWorks. Практическое руководство. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2004. – 448 с.

112. Тику, Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2004. – СПб.: Питер, 2004. – 768 с.

113. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. – М.: ДМК-Пресс, 2010. – 464 с.

114. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 445 с.

115. Никитенко М. С. Блок усиления для макета многоканальной тензометрической системы контроля НДС элементов шахтной крепи на базе чипа INA125P / М. С. Никитенко, В. О. Червов // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: сб. трудов IV Международной научно-практической конференции. – Прокопьевск: Изд-во филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, 2014. – С. 254-257. 

 116. ЛА-2USB-12/
 ЛА-2USB-14
 //
 РудневШиляев.
 –
 URL:

 http://www.rudshel.ru/show.php?dev=35
 (дата обращения: 12.06.2015).
 –
 URL:

117. Шанченко Н. И. Лекции по эконометрике: учеб. пособие / Н. И. Шанченко; УлГТУ. – Ульяновск, 2008. – 139 с.

118. Абабков Н. В. Современное методическое обеспечение для оценки состояния металла потенциально опасного оборудования. Часть 2. Спектральноакустический метод контроля / Н. В. Абабков, А. В. Бенедиктов, А. Н. Смирнов // Вестник КузГТУ. – 2010. – № 5. – С. 101-106.

119. Федоринин В. Н. Поляризационные оптические датчики для измерения физических величин / В. Н. Федоринин, В. И. Сидоров // Вестник СибГУТИ. – 2009. – № 3. – С. 46-56.

120. Федоринин В. Н. Поляризационные оптические датчики для измерения физических величин / В. Н. Федоринин, А. Г. Паулиш // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2010. – Т. 5. – № 1. – С. 136-138.

121. Ахметзянов М. Х. Определение больших пластических деформаций в металлических элементах методом фотоупругих покрытий / М. Х. Ахметзянов, Г. Н. Албаут // Физическая мезомеханика. – 2004. – № 3. – С. 35-42.

122. Использование тензометрии для контроля колес грузового вагона в движении / Л. Н. Степанова, С. А. Бехер, А. С. Кочетков, И. И. Снежков // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 8. – С. 19-23.

123. Малогабаритные автоматизированные системы для диагностики ИССО /
С. А. Бокарев, А. Н. Яшнов, И. И. Снежков, А. В. Слюсарь // Путь и путевое хозяйство. – 2007. – № 9. – С. 25-26.

124. Снежков И. И. Пример применения измерительного комплекса «Тензор МС» в мостостроении / И. И. Снежков, П. Ю. Кузьменков // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. 2013. – С. 101-105.

# Приложение А

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



路路路路路

资

密

密

密

密

密

路路

密

斑

密

密

密

斑

弦段

密

弦弦

密

路路

密

密

斑

极极极

密

密

路路

密

斑

密

密

密

密

密

密

密

密

密

斑

密

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2011618442

«Стенд-Инфо»

Правообладатель(ли): Общество с ограниченной ответственностью «СибТензоСервис» (RU), Общество с ограниченной ответственностью «МС-Инжиниринг» (RU)

Автор(ы): Кречетов Андрей Александрович, Никитенко Михаил Сергеевич, Ткаченко Александр Игоревич, Марьенков Евгений Валерьевич (RU)

> Заявка № 2011616471 Дата поступления 26 августа 2011 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 октября 2011 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

see

Б.П. Симонов

路路路路路

母

密

密

密

斑

敬敬

密

密

密

斑

段

斑

密

斑

密

斑

斑

斑

**极 弦 弦 弦 弦** 弦

路路路

斑

斑

路路

斑

斑

密

斑

密

斑

斑

路路

斑

斑

密

斑

156

# Приложение Б



# ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ЮРГИНСКИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД»

ул. Шоссейная, д.3, г. Юрга, Кемеровская обл., Россия, 652050 Тел.:8-(384-51) 4-25-24 Факс: 8-(384-51) 4-79-50 <u>www.yumz.ru</u> E-mail: <u>yumz@yumz.ru</u>

ОКПО 76913134 ОГРН 1054230016180 ИНН/КПП 4230020425/424950001



АКТ

заводских испытаний опытных образцов тензометрических преобразователей для прямой оценки механических напряжений секций механизированной крепи при рабочем сопротивлении в условия ООО "Юргинский машзавод"

г. Юрга

1

«12 » августа 2015 г.

Настоящий Акт составлен о том, что в июле 2014 года в испытательном цехе ООО «Юргинский машзавод» комиссией в составе:

Главный конструктор ГШО	В. Г. Предеин
Руководитель группы ОНИИ	Ю. В. Блащук
Начальник испытательного цеха	С. Н. Федорук
Инженер ИУ СО РАН	М. С. Никитенко

проведены экспериментальные испытания опытных образцов арочных съемных тензометрических преобразователей (далее АСТП) для оценки механических напряжений элементов секций механизированных крепей, установленных на пилотной секции крепи МКЮ.2У.75.00.000.000 (секция из комплекта крепи МКЮ.2У-07/19).

Испытания проведены в соответствии с требованиями программы и методики сертификационных (стендовых) испытаний секции крепи МКЮ.2У.75.00.000.000 ПМ2, разработанной в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52152-2003.

### 1. Объект испытаний

Объектом испытаний являются опытные образцы АСТП для оценки механических напряжений элементов секции механизированных крепей, выполненные на базе полупроводниковых тензорезисторов KSP-E4-350, установленные на перекрытии секции МКЮ.2У-07/19.

## 2. Место, сроки, условия и объем испытаний

Испытания АСТП проведены в период с 30.07.2014 по 31.07 2014 года в условиях ООО "Юргинский машзавод" при стендовых прочностных испытаниях пилотной секции МКЮ.2У.75.00.000.000 механизированной крепи МКЮ.2У-07/19.

### 3. Краткое описание конструкции и принципа работы устройства

АСТП, состоят из арочного упругого элемента, тензорезисторов KSP-E4-350, терминальных площадок, кабельных выводов со штекерами, приклеиваемых монтажных винтовых стоек.

За 24 часа до начала испытаний на нижней поверхности перекрытия секции МКЮ.2У-07/19 на предварительно подготовленную поверхность были установлены монтажные элементы – приклеиваемые винтовые стойки. АСТП устанавливались симметрично продольной оси перекрытия на расстоянии 1000 мм от края консоли и 200 мм от боковой поверхности перекрытия секции, согласно схеме (приложение №1).

Оборудование для регистрации сигнала: блок усиления, блок АЦП, питания и индикаторы температуры устанавливался непосредственно на перекрытии секции.

Испытания проводились при автоматизированном управлении процесса самораспора секции с регистрацией показаний тензометрических датчиков и АСТП. Схема нагружения перекрытия секции при испытании – испытание на изгиб.

### 4. Результаты испытаний

Испытания опытных образцов АСТП выполнялись в режимах нагружения, выдержки и разгрузки секции ступенчато до максимального значения давления 56 МПа.

В процессе испытаний АСТП позволяют регистрировать характер изменения механических напряжений перекрытия секции в режиме реального времени при рабочих нагрузках на стенде в диапазоне давления распора секции от 0 до 56 МПа с возможностью последующей переустановки (неоднократного использования).

В результате обработки сигналов установлено, что максимальные значения механических напряжений АСТП1 и АСТП2 при нагрузке 56 МПа составили 428 МПа и 402 МПа соответственно.

Показания механических напряжений штатной тензометрической системы, взятые для сравнения, совпадают, погрешность составила для АСТП1 составили не более 1%, для АСТП2 не более 2%.

#### 5. Рекомендации по результатам испытаний

5.1. Уточнить предельные деформации объекта контроля, при которых АСТП сохраняет свою работоспособность.

5.2. По результатам указанных оценок регламентировать ограничения режимов работы АСТП в условиях приемосдаточных испытаний, а также в условиях эксплуатации механизированной крепи.

5.3. Провести исследования в направлении фиксации динамических быстропротекающих процессов нагружения механизированной крепи.

## 6. Выводы.

3

6.1. Конструкция монтажных элементов позволяет производить неоднократную переустановку АСТП для повторного использования и корректировку исследуемой зоны.

6.2. Комиссия считает возможным устанавливать АСТП для проведения предварительных и приемосдаточных испытаний на стенде для измерения и контроля механических напряжений элементов секций механизированных крепей ООО "Юргинский машзавод".

6.3. Конструкция АСТП позволяют использовать его в качестве основы первичного измерительного преобразователя многофункциональной автоматизированной тензометрической системы (МФАТС) для мониторинга состояния механизированных крепей ООО "Юргинский машзавод".

20,01

В.Г. Предеин

Ю.В.Блащук

С. Н. Федорук

М.С. Никитенко

Приложение №1 к Акту заводских испытаний опытных образцов тензометрических преобразователей (АСТП) от « 12 » августа 2015 г.



Схема установки тензометрических преобразователей.