

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии
им. Д.И. Менделеева»

На правах рукописи

Трибушевская Лидия Александровна

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА И ПОВЫШЕНИЯ
ТОЧНОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦЫ
МЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Специальность 2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2026

Работа выполнена в лаборатории метрологии массы, силы и линейно-угловых величин УНИИМ – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (лаборатория 233).

Научный руководитель: **Толмачев Владимир Валерьянович**, кандидат физико–математических наук, доцент, заведующий отделом метрологии механических и геометрических величин и характеристик (отдел 25) УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 620075 Свердловская обл., г. Екатеринбург, Красноармейская ул., 4.

Официальные оппоненты: **Владимиров Александр Петрович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник ФГБУН Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук;

Сушников Виктор Александрович, кандидат технических наук, доцент высшей школы компьютерных технологий и информационных систем ФГАОУ ВО Санкт–Петербургский политехнический университет Петра Великого.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, с. 1.

Защита состоится «26» мая 2026 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета 32.1.001.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно–исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева» по адресу: 190005, Санкт–Петербург, Московский пр., 19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» и на сайте по ссылке: <https://www.vniim.ru/dissert.html>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направить по адресу: 190005, Санкт–Петербург, Московский пр., д. 19, ученому секретарю диссертационного совета 32.1.001.01 Чекирде Константину Владимировичу.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук

К.В. Чекирда

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Механическая деформация (далее деформация) является одним из базовых физических параметров, отражающим состояние материала и сигнализирующим о начале накопления повреждений. Виды деформации зависят от характера приложенной нагрузки и включают растяжение (сжатие), изгиб, сдвиг (срез) и кручение. Измерение любой сложной деформации сводится к измерению растяжения (обозначаются со знаком «+») и сжатия (обозначаются со знаком «-»). Измерения деформаций составляют основу для решения ключевых инженерных задач, таких как определение механических характеристик материалов, выявление зон повышенной опасности в конструкциях, прогнозирование остаточного ресурса оборудования, контроль технологических процессов и обеспечение качества продукции.

С 1986 года основой обеспечения единства измерений в этой области служила государственная поверочная схема, регламентированная в ГОСТ 8.543-86 и возглавляемая установкой высшей точности УВТ-82-А-93, имеющей диапазон измерений до 3000 млн⁻¹. Однако промышленный спад 1990-х годов, в частности в отраслях – основных потребителях тензометрии (ОПК, авиастроение, тяжёлое машиностроение, атомная и космическая отрасли), привёл к резкому сокращению отечественного производства, в том числе средств измерений деформации, доминированию импортных средств измерений и отсутствию запроса на метрологические услуги. Ситуация изменилась после 2015 года на фоне роста требований к промышленной безопасности, ресурсосбережению (Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899), требующих интеграции мониторинга состояния (развития деформаций) в систему предиктивного управления ресурсом конструкций. Начали появляться отечественные производители тензорезисторов, оптоволоконных датчиков и средств неразрушающего контроля на основе методов цифровой корреляции изображений.

Поскольку применение средств измерений деформации сосредоточено преимущественно в наукоёмких отраслях промышленности, научно-исследовательских и испытательных центрах, данная область, имеющая высокую важность, относится к узкоспециализированным видам измерений, имеющим ограниченное распространение и относительно небольшой круг потребителей метрологических услуг. В соответствии с принципами оптимизации эталонной базы, закреплёнными в Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации на период до 2030 года (утв. распоряжением Правительства РФ № 3784-р от 21.12.2023) и в ГОСТ 8.061-2024, метрологическое обеспечение таких видов измерений предполагает создание исходного эталона и разработку локальной поверочной схемы. Вместе с тем анализ растущих потребностей промышленности показывает необходимость расширения диапазона и повышения точности воспроизведения и передачи единицы деформации.

Степень разработанности темы исследования

Теоретической и методической основой исследования послужили результаты исследований отечественных и зарубежных ученых в области измерений механических напряжений и деформаций. Значительный вклад в становление и развитие отечественной экспериментальной механики деформаций внесла научная школа профессора

Н.И. Пригоровского, основанная им лаборатория полей деформаций (ИМАШ РАН г. Москва) (впоследствии под руководством профессора Б.Н. Ушакова) и включенная в её состав лаборатория эксплуатационной нагруженности, развивавшая методы Г.Х. Хуршудова и М.Л. Дайчика для анализа напряженно–деформированного состояния конструкций по результатам тензометрических измерений с целью обоснования их прочности и ресурса. Развитие методов закономерно потребовало создания эталонной базы: важным шагом стало утверждение в 1985 году в УНИИМ Установки высшей точности (УВТ 32А–85) для воспроизведения и передачи единицы деформации. Существенный вклад в развитие основ тензометрии и её метрологического обеспечения внесли отечественные специалисты М.М. Лупинский, Л.Б. Потапова, В.П. Ярцев, Е.В. Патокин. Развитие метрологического аспекта оптических методов измерений деформации, таких как электронная спекл–интерференция (ESPI) и цифровая корреляция изображений (DIC), а также методологии комплексных механических испытаний во многом связано с исследованиями зарубежных ученых, включая Richard Burguete, Erwin Hack, Eann A. Patterson, Thorsten Siebert, Maurice P. Whelan. В отечественной практике метод корреляции цифровых изображений (DIC) исследуется как самостоятельный метод диагностики и как инструмент для градуировки приборов неразрушающего контроля (В.С. Плешанова), а также для изучения пластического течения материалов (В.М. Фарбер, О.Н. Полухина, Д.И. Вичужанин, В.А. Хотинов, С.В. Смирнов).

Для расчётов стандартных неопределённостей использовались алгоритмы, изложенные в стандартах ГОСТ 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009 общий подход к оцениванию неопределённости соответствует ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008.

Цель работы

Увеличение диапазона измерений и повышение точности воспроизведения единицы механической деформации в диапазоне от минус 5000 до 5000 млн⁻¹.

Основные задачи исследования

1 Анализ современного состояния метрологического обеспечения измерений деформации.

2 Проведение теоретических исследований физико–математической модели процесса измерений деформации поверхности упругодеформированной балки ¹ прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба.

3 Обоснование и установление целевых показателей и значений методических факторов при измерении деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба, разработка бюджета неопределённости результата измерений деформации с учетом инструментальных и методических факторов.

4 Обоснование принципов построения и конструкции установки, обеспечивающей чистый изгиб балки постоянного сечения при воспроизведении единицы деформации.

5 Разработка установки для воспроизведения механической деформации.

6 Разработка системы передачи единицы деформации.

¹ Балка - объект, работающий на изгиб, одно из измерений которого (длина) много больше двух других

7 Внедрение исходного эталона в метрологические работы, связанные с испытаниями СИ в целях утверждения типа, разработкой методик поверки и калибровки СИ.

Научная новизна исследования

Улучшена физико–математическая модель процесса измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба за счет установления зависимости неопределенности результата измерений деформации поверхности балки от первоначальной неплоскостности и непараллельности граней балки, разности изгибающих моментов, что позволило определить граничные значения этих параметров и повысить точность воспроизведения единицы деформации.

Обосновано и экспериментально подтверждено, что применение стенда чистого изгиба с симметричной рычажно–роликовой системой нагружения и пластинами–«подушками» с полуцилиндрическими выступами, обеспечивающими передачу нагрузки по образующим цилиндрических поверхностей и прохождение нормали через точку контакта балки, позволяет конструктивно исключить нежелательные продольные и поперечные силы на рабочем участке балки и обеспечить стабильность воспроизведения единицы деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения.

Разработан алгоритм передачи единицы деформации от исходного эталона средствами измерений высокой точности методом прямых измерений и методом сличения с помощью компаратора поверочным установкам (на основе стендов чистого изгиба и балок равного сопротивления изгибу), которые в свою очередь обеспечивают передачу единицы деформации для точных и грубых средств измерений.

Теоретическая значимость исследования

Теоретическая значимость исследования заключается в разработке научных основ обеспечения единства измерений деформации, что включает:

- улучшенную физико–математическую модель процесса измерений деформации поверхности балки при чистом изгибе, которая устанавливает количественные зависимости между деформацией, геометрическими параметрами балки и метрологическими характеристиками средств измерений с комплексным учетом влияющих факторов;

- принципы построения эталонной установки, обеспечивающие реализацию схемы чистого изгиба, которые позволяют создавать предсказуемое и однородное деформационное поле с заданными метрологическими характеристиками, что является основой для воспроизведения единицы величины с установленной точностью;

- схему передачи единицы деформации, устанавливающую методы и условия передачи единицы деформации от исходного эталона рабочим средствам измерений, которые обеспечивают метрологическую прослеживаемость для средств измерений с диапазоном точности от 0,2 % до 6 %.

Практическая значимость исследования

1 Разработан и утвержден исходный эталон, позволяющий проводить поверку и калибровку различных типов средств измерений деформации, включая эталонные установки, волоконно–оптические датчики и тензорезисторы.

2 Разработана и утверждена локальная поверочная схема для средств измерений деформации, возглавляемая исходным эталоном, регламентирующая методы передачи единицы деформации и обеспечивающая прослеживаемость результатов для средств измерений с относительной погрешностью от 0,2 % до 6 %.

Внедрение результатов работы

Аттестованы, утверждены и внедрены в практику деятельности УНИИМ – филиала ФГУП «ВНИИМ им.Д.И.Менделеева» исходный эталон воспроизведения единицы деформации (рег. № 3.1.ZZB.0402.2021), а также «Локальная поверочная схема для средств измерений деформации».

Результаты работы используются при:

- проверке средств измерений с помощью исходного эталона (более 200 партий тензорезисторов, 7 партий тензометров волоконно–оптических и три установки с балками, нагружаемыми по схеме чистого изгиба);
- испытании средств измерений с целью утверждения типа с помощью исходного эталона (5 типов).

Разработаны и внедрены методики калибровки: МК 44-233 на тензометры для полотен пил и МК 4-233 на тензокалибраторы.

Методология и методы диссертационного исследования

При решении задач диссертационного исследования были применены: теоретический анализ метрологического обеспечения в области измерения единицы деформации, общенаучные (анализ, идеализация, формализация, эксперимент, индукция, дедукция) и специальные методы (сопротивления материалов, теоретической механики и теории упругости) при построении физико–математической модели измерений деформации поверхности упругодеформированной балки по схеме чистого изгиба, экспериментальные методы при исследовании метрологических характеристик, включая алгоритмы статистической обработки результатов измерений.

Положения, выносимые на защиту

Исходный эталон единицы деформации на основе усовершенствованной физико–математической модели измерений деформации ϵ поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, учитывающей значимые геометрические и физико–механические факторы, и принципах построения конструкции стенда чистого изгиба, исключая продольные и поперечные силы на рабочем участке балки, обеспечивает стабильное воспроизведение единицы деформации в диапазоне от минус 5000 до 5000 млн⁻¹ с неопределенностью результатов измерений от 3,6 до $(2,8+9 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon)$ млн⁻¹.

Доказательство адекватности физико-математической модели измерения деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения на основе полученных положительных результатов сличений с прецизионной установкой для измерения коэффициента чувствительности тензорезисторов SK–1 (Государственное управление оборонной науки, техники и промышленности (SASTIND), Китай).

Трехступенчатая поверочная схема, возглавляемая исходным эталоном, основанная на применении в качестве рабочих эталонов установок на базе балок постоянного сечения и

установок с балками равного сопротивления изгибу, предусматривающая метод сличений с помощью компаратора для передачи единицы деформации рабочим эталонам и метод прямых измерений – средствам измерений, обеспечивает передачу единицы деформации средствам измерений с относительной погрешностью от 0,2 % до 6 %.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность научных результатов, полученных в диссертационной работе, базируется на адекватности применённой математической модели измерений, корректности инструментальной реализации чистого изгиба, а также обеспечивается применением поверенных и калиброванных средств измерений, прослеживаемых к Государственным первичным эталонам ГЭТ 2-2021 «Государственному первичному эталону единицы длины – метра» посредством применения эталонов государственной поверочной схемы для средств измерений длины в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до 100 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм, утвержденной приказом Росстандарта № 2840 от 29 декабря 2018 г. и ГЭТ 183-2022 «Государственный первичный специальный эталон единицы длины в области измерений параметров отклонений от плоскостности оптических поверхностей» посредством применения эталонов из государственной поверочной схемы для средств измерений параметров отклонений от плоскостности оптических поверхностей, утвержденной приказом Росстандарта от 25 ноября 2019 г. № 2819 г.

Личный вклад автора

Автором проведён анализ состояния метрологического обеспечения измерений деформации, сформулированы цель и задачи исследований. Автором разработана физико-математическая модель измерения деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба с учетом конструктивных особенностей узлов приложения изгибающих моментов при реализации схемы чистого изгиба балки прямоугольного постоянного сечения и конструкции средств и методов измерений прогиба балки, учитывающая помимо инструментальных источников следующие методические факторы: геометрические параметры балки, изменение этих геометрических параметров при изменении температуры в процессе цикла измерений; изменение положения нейтрального слоя в зависимости от начальной кривизны балки; разность изгибающих моментов на концах балки. Автором установлены и количественно оценены факторы, влияющие на неопределённость измерений деформации. Автор принимал участие в изготовлении и сборке установки эталонной. Автором непосредственно проведены все экспериментальные работы в рамках исследования метрологических характеристик эталонной установки, разработана программа оценивания точностных характеристик результата измерений и проведены теоретические и экспериментальные исследования. Проведена аттестация исходного эталона деформации. Разработана локальная поверочная схема для средств измерений деформации. Автором проведены испытания с целью утверждения типа тензорезисторов, волоконно-оптических датчиков деформации, датчиков деформации струнных, установок для воспроизведения единицы деформации (чистый изгиб). Разработаны методики калибровки МК 44-233 тензометров для полотен пил (метод косвенных измерений от эталонов длины

2 разряда – интерферометров лазерных), МК 4-233 тензокалибраторов (метод косвенных измерений с помощью эталонов длины 2 разряда – интерферометров лазерных). В соавторских работах личный вклад автора заключался в постановке задач исследований, теоретическом обосновании, проведении экспериментов, анализе и интерпретации результатов, а также подготовке текста публикаций.

Апробация результатов исследования

Результаты работы докладывались на:

- I международном ТЕНЗОФОРУМЕ 2018 г., г. Москва;
- XXXII Уральской конференции с международным участием «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)», Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН г. Екатеринбург, 2021 г.;
- Международной научно-технической конференции «Механометрика – 2025», ФГУП «ВНИИМ им.Д.И.Менделеева», ООО «Техно-Диалог», г. Санкт-Петербург;
- Авиационном тензофоруме 2025, Институт машиноведения им. А.А. Благодного Российской академии наук (ИМАШ РАН), ООО «Высокоточные измерения», г. Москва.

Публикации, структура и объем работы

По теме диссертационной работы автором опубликовано 7 работ, в том числе: четыре статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов; одна статья в научном журнале, индексируемом базой данных Scopus, получен один патент.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, приложений, заключения и списка литературы, включающего 97 библиографических ссылок. Работа изложена на 165 страницах машинописного текста, содержит 50 таблиц, 45 рисунков и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены обоснования актуальности темы диссертационной работы, показана её научная новизна и практическая ценность. Сформулирована цель исследования.

Первая глава посвящена анализу современных методов и метрологического обеспечения измерений деформации, особенностям единицы измерения деформации и известных схем градуировочных установок.

В качестве единицы измерения деформации принята млн^{-1} , на практике также применяются: проценты (%) и strain – безразмерная относительная деформация (1 strain соответствует 100 %), производная единица microstrain равна 10^{-6} strain, что эквивалентно 1 млн^{-1} (1 мкм/м). Будучи безразмерной величиной, деформация служит «мерой» изменения внутреннего состояния материала. Для решения метрологических задач обосновано применение относительной (инженерной) деформации, адекватность которой в рамках модели усреднённо-однородной среды подтверждается её использованием в расчетах и согласием с экспериментальными данными.

Обоснован выбор схемы чистого изгиба балки постоянного сечения.

Проведённый анализ позволил сформулировать цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе представлено комплексное научно–методическое обоснование системы для воспроизведения единицы деформации на основе теории Эйлера–Бернулли и закона Гука, основанной на следующих гипотезах:

- гипотеза плоских сечений (гипотеза Бернулли): сечения балки плоские и нормальные к оси до деформации, остаются после деформации плоскими и нормальными к изогнутой оси балки;
- перемещения и деформации предполагаются малыми (зависимость деформации от напряжения линейна). Балка предполагается нерастяжимой;
- размеры сечения балки предполагаются малыми по сравнению с радиусом кривизны оси балки ($R/h > 10$);
- материал рассматривается как линейно упругий согласно закону Гука.

Принцип измерений основан на фундаментальных свойствах чистого изгиба, при котором деформация является следствием действия только изгибающего момента, что приводит к повороту поперечных сечений и изгибу нейтральной оси по дуге окружности. Поверхность балки является эквидистантой нейтральной оси и соответственно так же изгибается по дуге окружности, что позволяет оценить значение деформации поверхности балки от радиуса её кривизны с помощью прогибомера (рисунок 1).

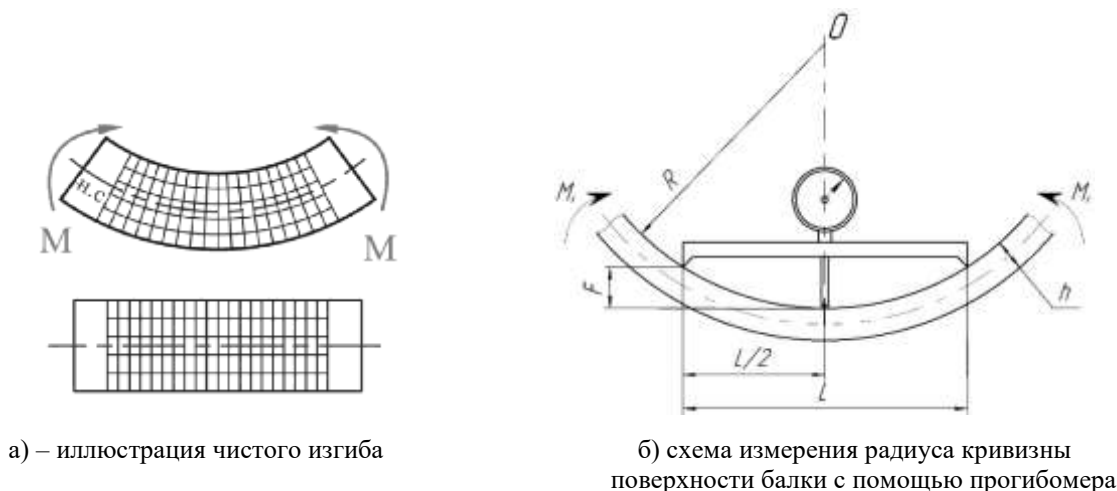


Рисунок 1 – Измерение деформации поверхности балки

Выведена и обоснована физико–математическая модель измерений деформации:

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot \bar{h} \cdot (\bar{f} + \Pi_1 + \Pi_2(\Pi_2'))}{L^2 + 4(\bar{f} + \Pi_1 + \Pi_2(\Pi_2'))^2 \pm 4\bar{h}(\bar{f} + \Pi_1 + \Pi_2(\Pi_2'))} \cdot 10^6, \quad (1)$$

$$\text{где } \bar{f} = l_{\text{кнд}} + \bar{f}_d - \bar{f}_0, \quad (2)$$

- ε – деформация, млн^{-1} ;
- \bar{h} – среднее арифметическое значение толщины балки, мм;
- \bar{f} – среднее арифметическое значение изменения прогиба деформированной балки, мм;
- \bar{f}_d – среднее арифметическое значение прогиба деформированной балки по показаниям прогибомера, мм;

- \bar{f}_0 – среднее арифметическое значение прогиба недеформированной балки по показаниям прогибомера, мм
- L – длина базы прогибомера, мм;
- $l_{кмд}$ – длина концевой плоскопараллельной меры длины, соответствующая ожидаемому прогибу, мм;
- Π_1 – поправки к показаниям прогибомера, обусловленные поперечным изгибом балки, для учета положения парных опор относительно преобразователя прогибомера, мм;
- $\Pi_2(\Pi_2')$ – поправки к показаниям прогибомера, обусловленные смещением точки касания балки и опоры прогибомера при растяжении (сжатии) балки, мм;
- 10^6 – множитель для перевода в млн^{-1} .

При этом знак «+» выбирается при установке прогибомера на балку для случая растяжения верхних волокон, знак «-» – для случая сжатия.

Установлены основные целевые показатели методики измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба с учетом наличия априорной информации о степени разработанности метода, положенного в основу: порог чувствительности из соотношения сигнал/шум не менее 2:1; диапазон измерений от минус 5000 до 5000 млн^{-1} ; достоверность модели, оцениваемая по метрологическим характеристикам, расчетного значения деформации через измеренные значения прогиба и геометрических характеристик балки согласно установленной функциональной зависимости; число параллельных измерений 3 (5).

Для достижения заданных показателей исследованы основные источники неопределенности при измерении деформации с использованием диаграммы «причина–следствие», приведенной на рисунке 2.

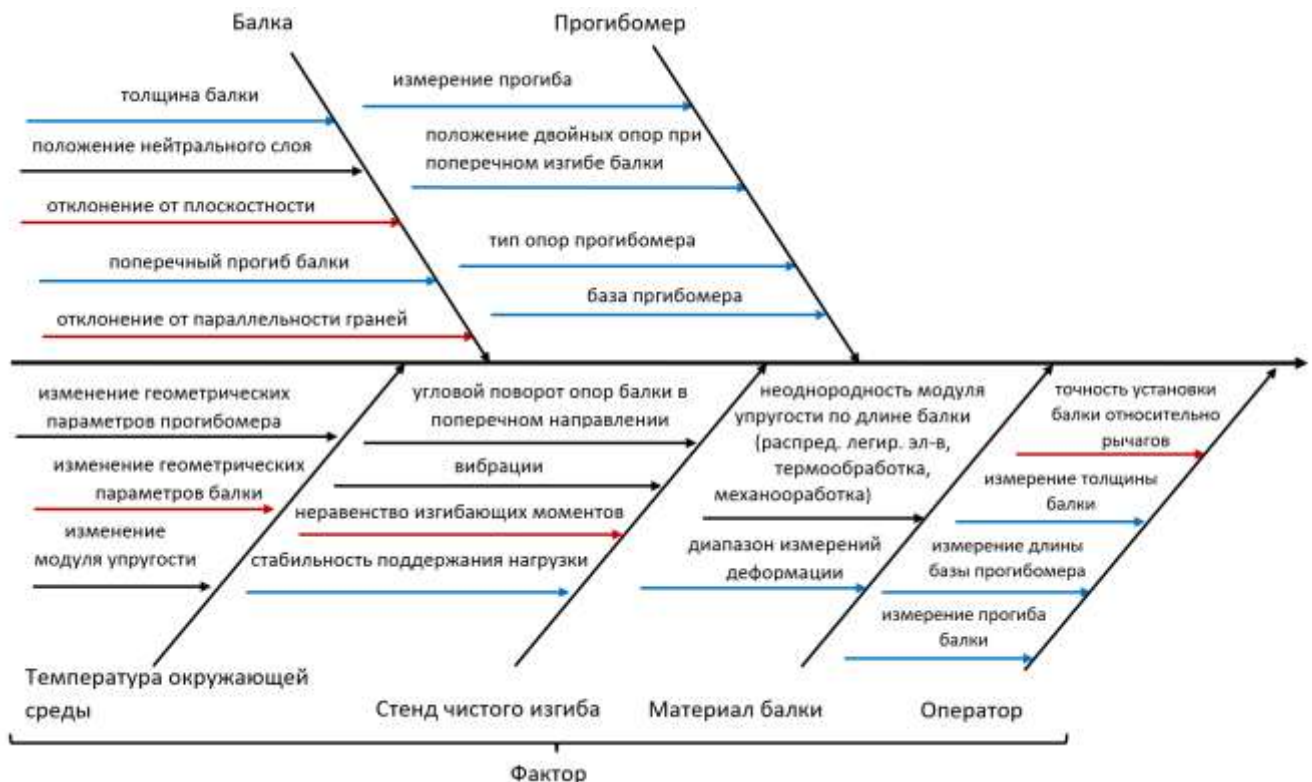


Рисунок 2 – Диаграмма «причина–следствие»

Рассмотрены влияющие факторы, требующие установления допусковых значений (граничных условий), контроля и (при необходимости) компенсации в процессе измерений (геометрия балки и её первоначальная неплоскостность, температурные влияния на размеры, стабильность приложенной нагрузки и неоднородность деформационного поля).

Установлены геометрические параметры балки

Максимальные размеры поперечного сечения балки ограничены конструкцией стенда: длина не менее 500 мм, ширина не более 30 мм, толщина не более 10 мм. Толщина балки определяет диапазон измерений прогиба, так для воспроизведения единицы деформации 3000 млн^{-1} требуемый прогиб балки уменьшается с ростом её толщины: от 1,386 мм (при толщине 4 мм) до 0,611 мм (при толщине 10 мм). Увеличение абсолютного значения прогиба при использовании тонких балок позволяет уменьшить неопределенность его измерения, в то же время уменьшение толщины снижает устойчивость к влияющим факторам: непараллельности граней, паразитным скручивающим моментам и исходной неплоскостности. Измерение прогиба в диапазоне от 0,01 до 1 мм реализуется дифференциальным методом, при этом прибор «Микрон–04» используется в узком диапазоне от 0 до 20 мкм, что накладывает требования к однородности модуля упругости, первоначальной неплоскостности и параллельности граней балки.

Установлена допуская непараллельность рабочих и боковых граней балки

Непараллельность граней балки является причиной изменения момента инерции площади сечения относительно нейтральной оси по длине балки и, следовательно, неравномерности деформации в рабочей зоне балки. Непараллельность рабочих и боковых граней балки нормирована таким образом, чтобы изменение прогиба по длине балки не превышало $1/3$ диапазона датчика прогибомера. Допускаемое значение непараллельности составляет 6 мкм, что технически достижимо; при этом неопределенность обусловленная непараллельностью рабочих и боковых граней балки не превышает 0,8 % от измеряемой деформации. Несоответствие балки по однородности модуля упругости устанавливается по факту выхода значения прогиба за диапазон датчика в процессе измерений.

Установлена допуская первоначальная неплоскостность балки

Рассчитаны значения неопределенности измерений деформации, обусловленной первоначальной неплоскостностью балки для балок различной толщины при деформации 3000 млн^{-1} и приведены на рисунке 3. Приемлемое значение первоначальной неплоскостности балки исходя из результатов измерений составило 16 мкм (неопределенность, обусловленная первоначальной неплоскостностью балки, при измерении деформации в таком случае не превышает $0,010 \text{ млн}^{-1}$), дополнительно этот параметр ограничен измерительными возможностями датчика прогибомера до 6 мкм, что составляет $1/3$ диапазона измерений датчика прогибомера и является технически реализуемым при изготовлении балки при этом неопределенность, обусловленная первоначальной неплоскостностью балки, при измерении деформации не превышает $0,0045 \text{ млн}^{-1}$.

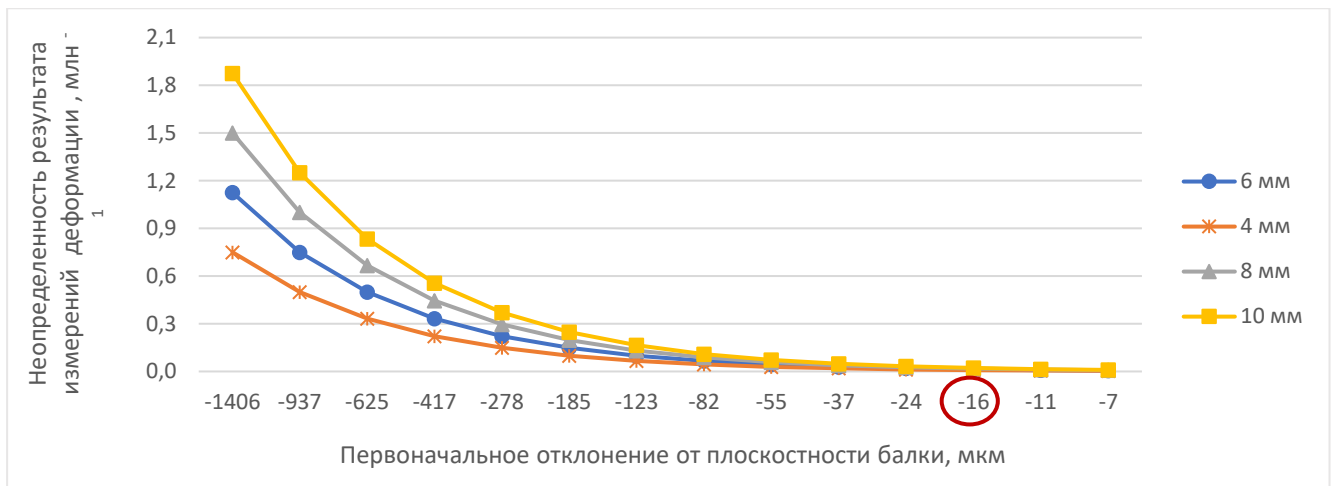


Рисунок 3 – Неопределенность, обусловленная первоначальной неплоскостью балки, при измерении деформации для балок различной толщины для деформации 3000 млн⁻¹

Установлен допустимый диапазон температуры окружающего воздуха при измерении

Изменение температуры окружающей среды вызывает дополнительные температурные деформации, которые накладываются на искомые механические, что затрудняет их разделение и вносит соответствующую неопределенность в результаты измерений механической деформации. При этом температурная деформация может быть сопоставима по величине с механической и определяется температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР). Рассчитаны значения неопределенности, обусловленной изменением температуры окружающего воздуха при измерении деформации для балок одинаковой толщины 9 мм при разных значениях деформации, в зависимости от материала балки с принятыми температурными коэффициентами линейного расширения материала балки из стали 40Х – $12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, сплава алюминия В95 – $22 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и поликарбоната (РС) $70 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (результаты приведены на рисунке 4 при деформации 500 (1000, 2000, 3000, 5000) млн⁻¹).

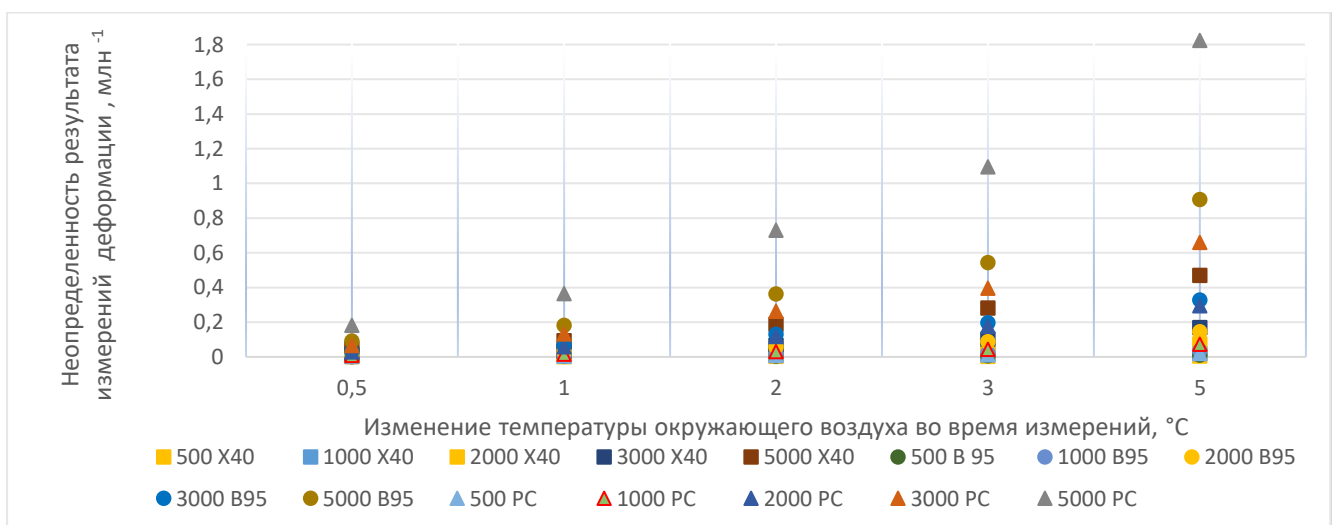


Рисунок 4 – Неопределенность, обусловленная изменением температуры окружающего воздуха при измерении деформации в зависимости от материала балки и диапазона изменения температуры для балки толщиной 9 мм

Температура окружающего воздуха $20,0^{\circ}\text{C} \pm 1,0^{\circ}\text{C}$, допустимое изменение температуры во время измерений деформации не более $0,5^{\circ}\text{C}$ для балок из материалов со значением ТКЛР не более $70 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ позволяет обеспечить значения неопределенности, обусловленной изменением температуры окружающего воздуха не более $0,0072\%$ от измеряемой деформации.

Установлены допустимое значение нестабильности поддержания нагрузки и интервал времени, затрачиваемого на измерение

Недостаточная жесткость стенда может быть причиной ошибочного вывода о ползучести балки и, соответственно, нарушении условий измерений, т.е. о переходе материала в состояние текучести (пластического деформирования). Конструкция стенда должна обеспечивать стабильное приложение изгибающих моментов за все время проведения измерений. Так как известные типовые испытания на ползучесть средств измерений ограничиваются длительностью 1 час (ГОСТ 21616-91), стенд должен обеспечить стабильность поддержания нагрузки не менее 5 часов. Стабильность поддержания нагрузки оценивалась по изменению показаний прогибомера и не превысила $0,1$ мкм, что соответствует деформации $0,2 \text{ млн}^{-1}$.

Установлены допустимые параметры неоднородности деформационного поля

Наибольшее влияние на неоднородность оказывает разность изгибающих моментов, возникающая при асимметричном положении опорных подошв в кулаках установки. Отсутствие жесткой фиксации подошв исключает возникновение продольных сил и деформаций растяжения–сжатия, но их смещение приводит к монотонному изменению прогиба и деформации по длине балки. Разность изгибающих моментов оценивается по разности прогибов по краям рабочего участка. Неопределенность измерений прогиба, обусловленная разностью моментов, описывается зависимостью:

$$u_H = C_1 \cdot \frac{f_H - f_K}{m \cdot 2\sqrt{3}}, \quad (3)$$

где u_H – неопределенность измерений деформации, обусловленная разностью изгибающих моментов, млн^{-1} ;

f_H, f_K – прогибы на краях рабочего участка, мкм;

m – количество участков;

C_1 – коэффициент влияния неопределенности измерений прогиба при измерении деформации, $\text{млн}^{-1}/\text{м}$.

По данным экспериментального исследования разность прогибов может достигать 10 мкм (рисунок 5), а соответствующая неопределенность измерений деформации, обусловленная разностью изгибающих моментов – до $2,2 \text{ млн}^{-1}$ ($0,04\%$ – $2,2\%$ от измеряемого значения), с максимальным вкладом для балок толщиной 10 мм.

Путем введения дополнительной операции – регулировки положения балки относительно рычагов удастся ограничить разность прогибов по краям рабочего участка до $0,5$ мкм, что ограничивает неопределенность измерений деформации, обусловленной разностью изгибающих моментов до $0,11\%$ от измеряемой деформации.

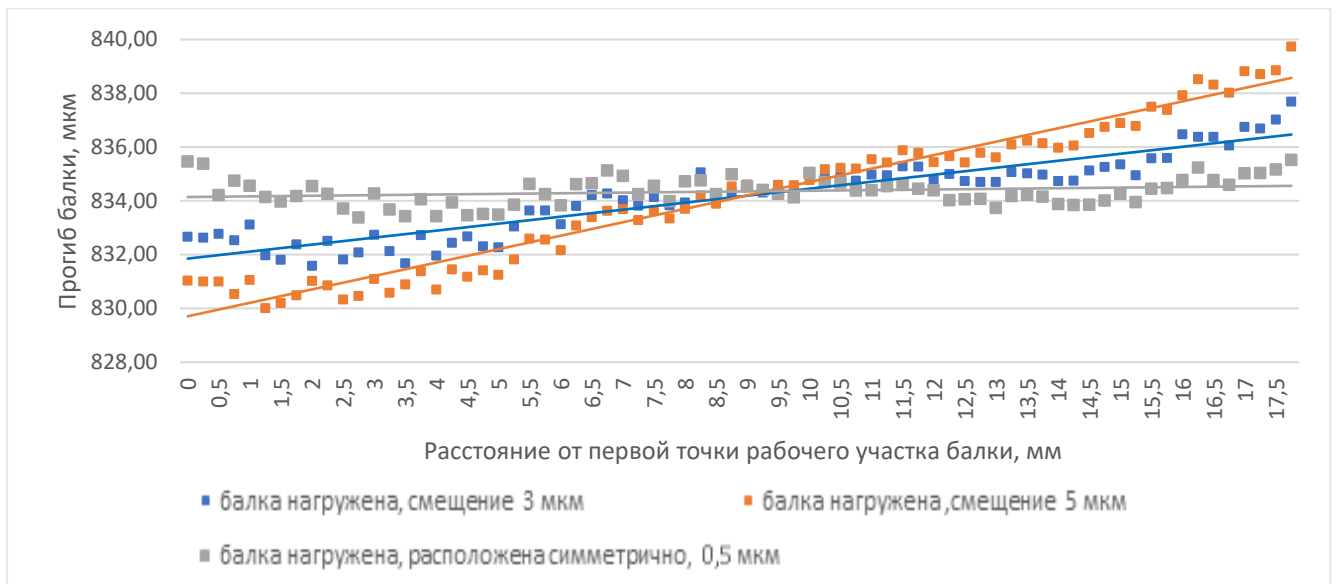


Рисунок 5 – Изменение прогиба балки по ее длине в зависимости от смещения подошв относительно кулаков

Установлены геометрические параметры при измерении прогиба балки.

Основными источниками неопределенности измерений деформации, обусловленными применением прогибомера, являются неопределенности измерений базы и отклонения положения датчика от центрального положения относительно опор. Также влияют на результат измерений деформации смещение шаровых опор при изгибе балки и изменение положения парных опор относительно датчика, обусловленное поперечным изгибом балки. В зависимости от геометрических параметров балки, прогибомера и измеряемой деформации отклонения действительного значения прогиба балки от измеренного достигают 10 мкм, что значительно превышает показатели точности датчика прогибомера и при пренебрежении может значительно исказить результаты измерений, поэтому предусмотрены способы расчета и учета поправок на поперечный изгиб Π_1 и смещение точки контакта Π_2 (Π_2').

Поправка, обусловленная смещением парных опор прогибомера по причине поперечного изгиба балки:

$$\text{где } \Pi_1 = \frac{\mu \cdot \bar{l}_{\Pi}^{-2} \cdot \epsilon_H}{8 \cdot h} \cdot 10^{-6}, \quad (4)$$

где Π_1 – поправка к показаниям прогибомера, мм;

μ – коэффициент Пуассона (таблицы стандартных справочных данных (ССД));

\bar{l}_{Π} – среднее арифметическое расстояния между центрами отпечатков парных опор, мм;

ϵ_H – номинальное значение деформации балки, млн^{-1} ;

h – общая средняя толщина балки, мм.

При использовании шаровых опор прогибомера необходимо введение поправки обусловленной смещением точки касания балки и опоры прогибомера при изгибе балки, с учетом предположения, что форма упругой линии балки – дуга окружности. Поправки к показаниям прогибомера вычисляются исходя из условий, что центр окружности изгиба поверхности балки и центры сферических наконечников опор лежат на одной плоскости, а точки касания определяются геометрией двух сопрягаемых окружностей по формулам:

$$\Pi_2 = \left[\sqrt{(R_{\text{НОМ}} + r)^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} - \sqrt{R_{\text{НОМ}}^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} - r \right], \quad (5)$$

$$\Pi_2' = - \left[\sqrt{R_{\text{НОМ}}^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} - \sqrt{(R_{\text{НОМ}} - r)^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} - r \right], \quad (6)$$

$$\text{где } R_{\text{НОМ}} = \frac{L^2 + 4f_{\text{НОМ}}^2}{8f_{\text{НОМ}}}, \quad (7)$$

$R_{\text{НОМ}}$ – радиус кривизны рабочей поверхности балки при нагружении, мм;

L – длина базы прогибомера, мм;

$f_{\text{НОМ}}$ – расчетный прогиб балки на базе прогибомера, мм;

Π_2 – поправка к показаниям прогибомера, обусловленная смещением точки касания балки и опоры прогибомера при растяжении верхних волокон балки, мм;

Π_2' – поправка к показаниям прогибомера, обусловленная смещением точки касания балки и опоры прогибомера при сжатии верхних волокон балки, мм;

r – радиус опор прогибомера, мм.

Использование комплексного подхода при нормировании граничных значений влияющих факторов, учитывающего минимизацию вклада неопределённости и наличие технических средств для практической реализации установленных ограничений (точность ручной доводки поверхностей балок, характеристики климатического оборудования для поддержания заданных условий испытаний и др.), показало техническую возможность изготовления установки воспроизведения единицы деформации в соответствии с принятой концепцией реализации чистого изгиба и выбранным способом измерений. Для стандартных неопределенностей определены уравнения предельных значений характеристики в зависимости от измеряемой деформации (рисунки 6,7), справедливые для всех, предусмотренных методикой исследуемых балок, независимо от их толщины и материала:

$$u_B = 1,6 + 3 \cdot 10^{-5} \varepsilon, \quad (8)$$

$$u_A = 0,2 + 6 \cdot 10^{-4} \varepsilon, \quad (9)$$

где u_B – суммарная стандартная неопределенность измерений деформации типа В, млн⁻¹;

u_A – стандартная неопределенность измерений деформации типа А, млн⁻¹.

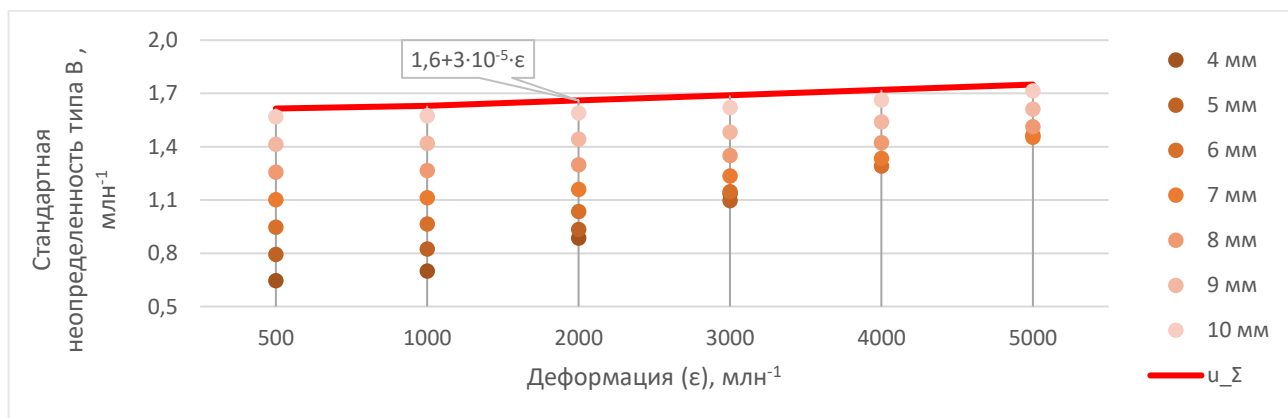


Рисунок 6 – Установление стандартной неопределенности результатов измерений типа В для балок толщиной от 4 до 10 мм

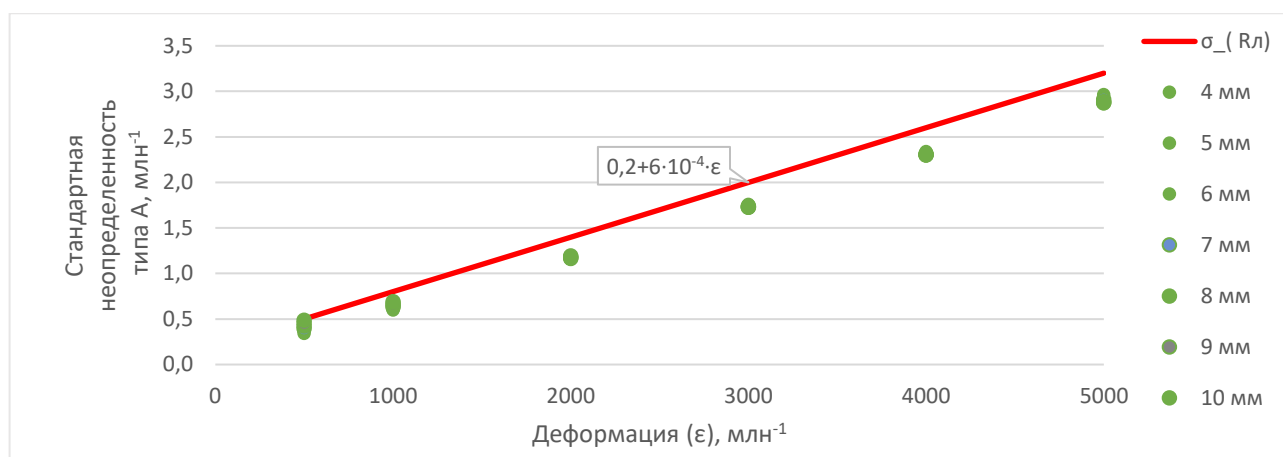


Рисунок 7 – Установление стандартной неопределенности результатов измерений, типа А для балок толщиной от 4 до 10 мм

В третьей главе представлены результаты:

- разработки и исследований установки воспроизведения единицы деформации и экспериментальное подтверждение установленных точностных характеристик. На основе изобретений (патенты №№ 2621462, 2526787) создан экспериментальный образец стэнда, реализующий чистый изгиб балки. В конструкции использованы горизонтальные рычаги, связанные через шатуны и коромысло с червячным приводом, что обеспечивает исключение продольных и поперечных сил на рабочем участке балки и обеспечивает стабильное воспроизведение единицы деформации. Экспериментально подтверждено формирование однородного деформационного поля: геометрические параметры балок соответствуют установленным требованиям: непараллельность граней ≤ 6 мкм и первоначальная неплоскостность ≤ 3 мкм; измерение радиуса изгиба по длине рабочей зоны балки (130 мм) методом перемещения прогибомера показало статистическую независимость радиуса кривизны от координаты ($R^2 \rightarrow 0$, $p > 0,05$);

- результаты экспериментального подтверждения эквивалентности эталонам иностранных государств. Так как непосредственное сличение результатов измерений деформации, воспроизводимой и измеряемой на разных установках воспроизведения деформации практически нереализуемо, в качестве образцов сличений были использованы средства измерений деформации (тензорезисторы), однородность которых по составу и геометрическим и электрическим характеристикам гарантировалась технологией изготовления тензорезисторов (фотолитография и термические процессы, которые выполняются одним технологическим запуском для партии тензорезисторов – из тензорезисторного материала одной плавки, подвергнутого одинаковой механической и термической обработке), а также проверкой геометрических и электрических характеристик. Графическое представление результатов определения коэффициента чувствительности образца сличений каждым участником представлено на рисунке 8.

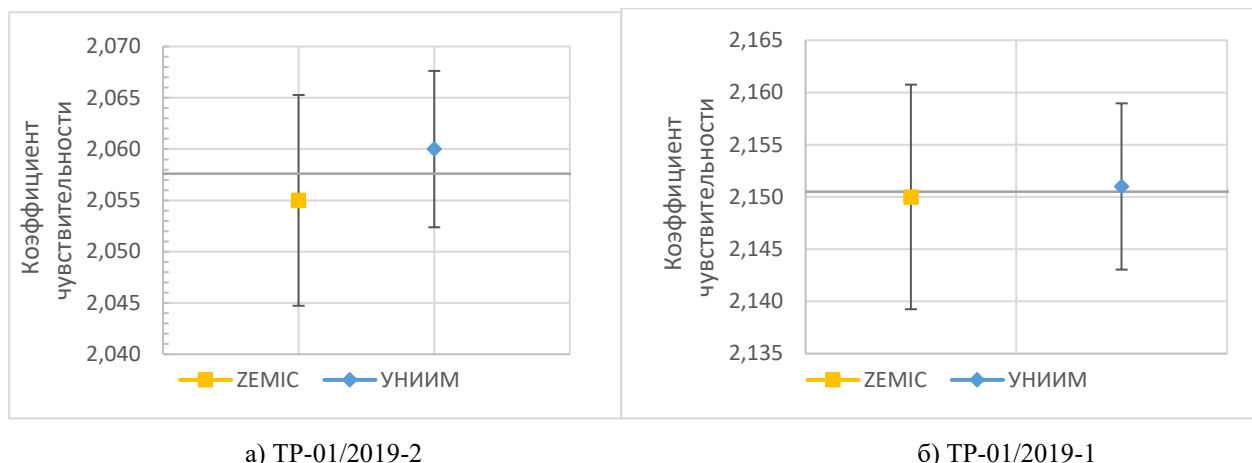
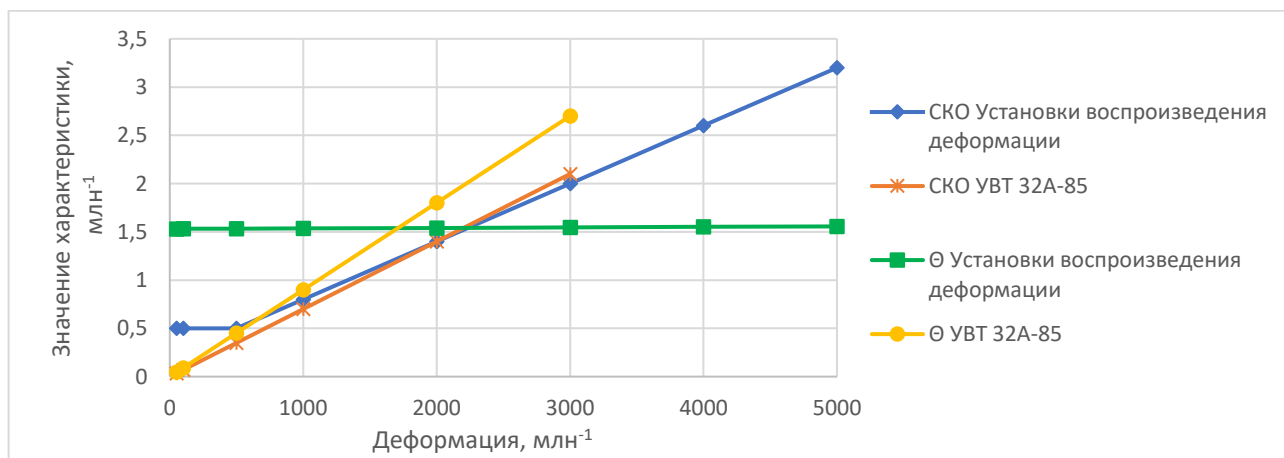


Рисунок 8 – Графическое представление результатов определения коэффициентов чувствительности образцов сличений (тензорезисторов) участниками сличительных испытаний

Оценка разности результатов измерений (систематического сдвига) сличений не превосходит расширенной неопределенности этой оценки, что доказывает эквивалентность воспроизведения единицы деформации установкой воспроизведения деформации и прецизионной установкой для измерения коэффициента чувствительности тензорезисторов SK-1 (Государственное управление оборонной науки, техники и промышленности (SASTIND), Китай);

– описание созданной установки воспроизведения единицы деформации, включающей систему точного позиционирования (шаговый двигатель, контроллер), дифференциальную измерительную систему для прогиба («Микрон-04», концевые меры) и систему сбора данных UCAM 65C M14 для измерений, записи и обработки данных аналоговых выходных сигналов различных типов датчиков – с выходными сигналами электрического напряжения и силы тока, тензорезисторов и тензодатчиков по различным схемам подключения;

– результаты сравнения метрологических характеристик установки воспроизведения единицы деформации и установки высшей точности по ГОСТ 8.543-86 (рисунок 9), которые показали, что разработанная установка воспроизведения единицы деформации превосходит по диапазону (от минус 5000 до 5000 млн⁻¹) и точности.



SKO – среднее квадратическое отклонение результатов измерений, млн⁻¹;

Θ – неисключенная систематическая погрешность измерений, млн⁻¹

Рисунок 9 – Сравнение характеристик погрешности установки воспроизведения единицы деформации и УВТ 32А-85

В четвёртой главе решена задача создания схемы передачи единицы деформации средствам измерений и рабочим эталонам.

Установка воспроизведения деформации аттестована в качестве исходного эталона. Его состав включает эталонную установку, образцовые концевые меры длины и плоскую стеклянную пластину. Метрологические характеристики исходного эталона приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Метрологические характеристики исходного эталона

Диапазон измерений деформации, млн ⁻¹	Расширенная неопределенность при коэффициенте охвата k=2, U _p , млн ⁻¹
от -500 до 500 включ.	3,6
от -5000 до -500 и св. 500 до 5000	2,8+9·10 ⁻⁴ ·ε

Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений относительных приращений электрического сопротивления $\pm(0,0005 \cdot \xi + 1 \text{ е.м.р.}) \text{ мкОм/Ом}$, где ξ – измеряемое относительное приращение электрического сопротивления, мкОм/Ом.

Для эффективного охвата парка СИ предложена комбинация эталонов на базе:

- установок с балками постоянного сечения (чистого изгиба): обладают наивысшей точностью, но сложны и дороги;
- установок с балками равного сопротивления изгибу (БРС): могут работать в специальных условиях, имеют сложную математическую модель, предусмотрены только в качестве рабочих эталонов 3 разряда;
- экстензометры: не нашли широкого применения в качестве эталонов и схемой передачи не предусмотрены.

Определены методы передачи единицы от исходного эталона:

- метод сличения при помощи компаратора (тензорезисторы специального отбора) – основной метод для эталонов, с погрешностью $\sim 0,0005 \cdot \epsilon$;
- метод прямых измерений – для преобразователей, монтируемых на балку. Метод косвенных измерений (поэлементная поверка) признан трудоёмким, ограниченным по точности и не обеспечивающим приведение единицы величины, хранимой рабочим средством измерений, к единице величины, воспроизводимой исходным эталоном.

Разработана структура локальной поверочной схемы (рисунок 10), основанная на применении в качестве рабочих эталонов установок на базе балок постоянного сечения и установок с балками равного сопротивления изгибу, предусматривающая метод сличений с помощью компаратора для передачи единицы деформации рабочим эталонам и метод прямых измерений для передачи единицы деформации средствам измерений.

Число ступеней обусловлено: широким диапазоном точностных требований к средствам измерений; сложностью и дороговизной высокоточных установок воспроизведения единицы деформации; потребностью предприятий, использующих средства измерений деформации в наличии собственных эталонов; удовлетворяющих потребности исключительно в части исследований применяемых средств измерений на предприятии и спецификой измеряемой величины (деформация как специализированный и нераспространённый вид измерений).

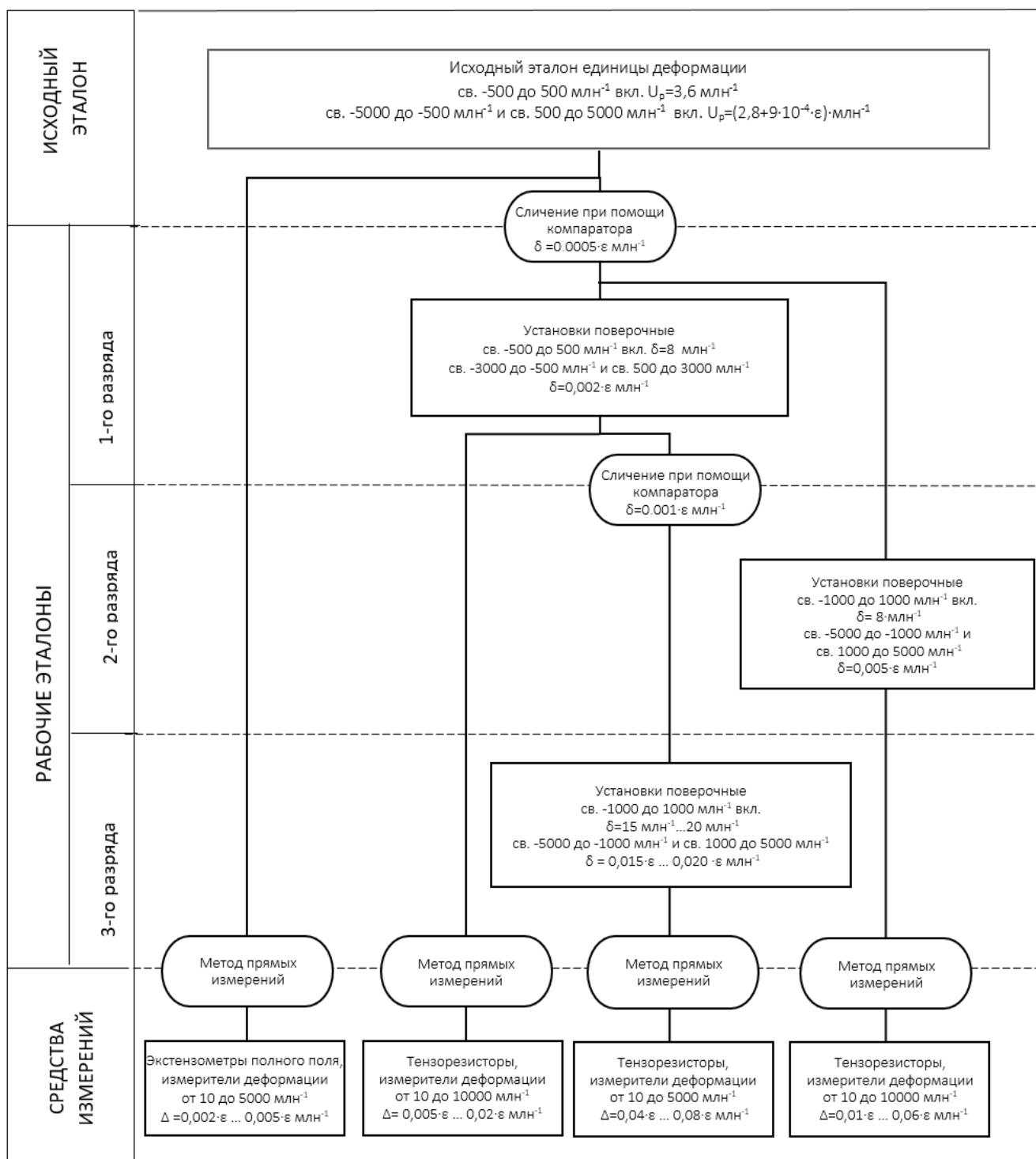


Рисунок 10 – Структура локальной поверочной схемы

В пятой главе представлены результаты внедрения разработок и перспективы развития системы метрологического обеспечения измерений деформации.

На основе проведённых исследований разработан и аттестован исходный эталон единицы деформации (Приказ Росстандарта № 2231 от 08.10.2021, рег. № 3.1.ZZB.0402.2021).

С использованием исходного эталона обеспечено функционирование системы передачи единицы деформации, что подтверждается:

– испытаниями и утверждением типа 7 новых средств измерений. Отработаны методы прямых (через исходный эталон) и косвенных измерений (через эталоны длины);

- разработкой и внедрением методик калибровки (МК 44–233, МК 4–233);
- массовой поверкой средств измерений: с 2021 г. поверено более 500 средств измерений.

Создание рабочих эталонов в организациях–поверителях привело к устойчивому функционированию системы.

Анализ потребностей промышленности выявил три ключевых направления для развития системы метрологического обеспечения измерений деформации: измерения *больших деформаций* (свыше 5000 млн⁻¹, вплоть до 100 000 млн⁻¹), необходимые для оценки пластичности материалов; измерения *при высоких температурах* (до 1200 °С – 1500 °С), для авиационной и энергетической отраслей; *динамические измерения* (диапазон частот до 10 кГц), используемые для оценки усталостной долговечности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно–квалификационную работу, в которой решена актуальная научная задача – создание национальной системы обеспечения единства и требуемой точности измерений механической деформации в диапазоне от минус 5000 до 5000 млн⁻¹. На основе анализа современных методов и состояния метрологического обеспечения предложен и реализован системный подход, включающий разработку и аттестацию исходного эталона и создание схемы передачи единицы деформации.

На основании проведенных исследований получены следующие научные результаты работы:

1 На основании комплексного анализа существующих методов, подходов, используемых для измерений деформации определены основные сферы применения, требования к измерениям, подтверждена необходимость комплексной работы в части метрологического обеспечения измерений деформации, включающей разработку методических основ измерений, создание эталонов деформации, а также нормативных документов, регламентирующих их применение. Определены требования к эталонам деформации (диапазон измерения деформации от минус 5000 до 5000 млн⁻¹ и относительная погрешность измерений деформации от 0,1 % до 1,5 %) для создания системы передачи единицы деформации средствам измерений.

2 Улучшена физико–математическая модель измерений деформации поверхности упругодеформированной балки, основанная на теории изгиба Эйлера–Бернулли, подтвердившая правильность выбора схемы нагружения – чистый изгиб, позволившая установить количественные зависимости между деформацией поверхности балки и ее геометрическими и физико–механическими параметрами, а также влияющими факторами (изменение температуры во время измерений, стабильность приложенной нагрузки и неоднородность деформационного поля) с учетом чувствительности измерительной цепи и разработать бюджет неопределённости результата измерений деформации.

3 На основании улучшенной физико–математической модели и области применения результатов измерений деформации поверхности балки установлены значения целевых показателей методики измерений (порог чувствительности измерений, диапазон измерений, адекватность модели, оцениваемая по метрологическим характеристикам, расчетного значения деформации через измеренные значения прогиба и геометрических характеристик балки

согласно установленной функциональной зависимости, устойчивость модели и число параллельных измерений в условиях повторяемости) которые позволили проанализировать процесс измерения и воспроизведения единицы деформации, а также установить граничные значения влияющих факторов и произвести оценку показателей точности результата измерений деформации.

4 Научно обоснованы и разработаны принципы построения и конструкция установки для воспроизведения единицы деформации, обеспечивающие реализацию симметричного чистого изгиба, исключая влияние ключевых источников погрешности (асимметрию приложения усилий, скручивающие эффекты и неодновременность контакта) что позволило создать предсказуемое, однородное и воспроизводимое деформационное поле. Принципы действия установки защищены патентом России № 2621462.

5 На основании использования установленных граничных значений влияющих факторов с учетом доступных технических средств доказана возможность изготовления установки воспроизведения единицы деформации в соответствии с выбранной концепцией реализации чистого изгиба. Разработанная установка воспроизведения единицы деформации, включающая стенд чистого изгиба, обеспечивает воспроизведение единицы деформации на поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба с установленными показателями точности измерений деформации при воспроизведении ее единицы, с метрологическими характеристиками, установленными при теоретических исследованиях и соответствующих исходному эталону деформации, которые подтверждены экспериментальными исследованиями. Подтверждена расширенная неопределённость ($k=2$) от $3,6 \text{ млн}^{-1}$ (в диапазоне измерений деформации от минус 500 до 500 млн^{-1}) до $(2,8+9 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon) \text{ млн}^{-1}$ (в диапазоне от минус 5000 до 500 и св. 500 до 5000 млн^{-1}).

6 Разработан и аттестован исходный эталон единицы величины деформации (регистрационный номер 3.1.ZZB.0402.2021) и локальная поверочная схема для средств измерений деформации. Локальная поверочная схема, состоит из двух частей: средств измерений полного поля; средств измерений деформации, принцип работы, которых основан на измерении перемещений.

Рабочие эталоны и средства измерений прослеживаются к исходному эталону.

7 Результаты диссертационного исследования использованы в системе передачи размера единицы деформации от эталона к рабочим средствам измерений:

- проведены испытания и утверждены типы 7 новых средств измерений деформации;
- разработаны и внедрены методики калибровки;
- отработаны методы прямых и косвенных измерений при передаче единицы деформации.

Подтверждена эффективность созданной системы:

- поверено более 240 партий тензорезисторов;
- поверено 258 волоконно-оптических тензометров;
- поверено 3 установки с балками, нагружаемыми по схеме чистого изгиба (рабочие эталоны).

В результате диссертационного исследования решена актуальная научная задача – увеличение диапазона и повышение точности воспроизведения единицы механической деформации. В ходе исследования создана система обеспечения единства измерений механической деформации, которая включает в себя взаимосвязанные элементы: теоретическое обоснование (модель, бюджет неопределённости), аппаратную реализацию (исходный эталон с диапазоном от минус 5000 до 5000 млн⁻¹ и расширенной неопределённостью от 3,6 до $(2,8+9 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon)$ млн⁻¹), нормативно–техническую базу (поверочная схема) и отработанный механизм практического применения. Работа закладывает основу для дальнейшего развития метрологического обеспечения измерений деформации в высокотехнологичных отраслях промышленности (в областях расширения диапазона измерений и специальных условий измерений).

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях, включенных в перечень научных журналов ВАК

1 Трибушевская Л. А. Разработка поверочной схемы для средств измерений деформации, используемых при одноосных испытаниях //Эталоны. Стандартные образцы. – 2025. – Т. 21. – № 1. – С. 38-52. – DOI 10.20915/2077-1177-2025-21-1-38-52.

2 Шимолин Ю. Р., Трибушевская Л. А., Остроухова Л. А. Межлабораторные сличительные испытания в области измерений деформации //Эталоны. Стандартные образцы. – 2020. – № 2. – С. 57-61.– DOI 10.20915/2687-0886-2020-16-2-57-61.

3 Трибушевская Л. А., Митрофанов В. В., Осипов Л. Е. Применение установок с балками равного сопротивления изгибу в качестве рабочих эталонов деформации //Эталоны. Стандартные образцы. – 2024. – Т. 20. – № 1. – С. 7-15.– DOI 10.20915/2077-1177-2024-20-1-7-15.

4 Шимолин Ю. Р., Трибушевская Л. А. Современные тенденции развития метрологического обеспечения измерений деформации // Законодательная и прикладная метрология. – 2018. – №. 6. – С. 23-25.

Публикации в изданиях, индексируемых базой данных Scopus

1 Tribushevskaya L.A., Shimolin Y.R. Primary reference methodology (method) of measurements the surface deformation of an elastically deformed beam. Izmeritel'naya Tekhnika. 2022;(2):34–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-34-43>.

Публикации в остальных изданиях

1 Патент № 2581440 С1 Российская Федерация, МПК G01B 11/08. Способ измерения локального радиуса кривизны упругодеформированной эталонной балки и устройство для его осуществления: № 2015102950/28: заявл. 29.01.2015: опубл. 20.04.2016 / Ю. Р. Шимолин, В. В. Митрофанов, Л. А. Злыдникова; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие "Уральский научно-исследовательский институт метрологии" (ФГУП "УНИИМ").

2 Трибушевская, Л. А. Разработка схемы передачи единицы средствам измерений деформации // Механометрика – 2025. Механические измерения и испытания: Тезисы докладов, Санкт–Петербург, 01–03 июля 2025 года. – Санкт–Петербург: Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева, 2025. – С. 59–61.