

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент
Толмачев Владимир Валерьянович

Екатеринбург 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ДЕФОРМАЦИИ. СОСТОЯНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ.....	11
1.1 Определение внутренних напряжений путем измерения деформаций.....	11
1.2 Состояние метрологического обеспечения измерений деформаций.....	19
1.3 Определение требований к эталонам деформации.....	23
Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования.....	32
ГЛАВА 2. НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦЫ ДЕФОРМАЦИИ НА ПОВЕРХНОСТИ УПРУГОДЕФОРМИРОВАННОЙ БАЛКИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ, НАГРУЖАЕМОЙ ПО СХЕМЕ ЧИСТОГО ИЗГИБА.....	33
2.1 Обоснование принципов построения и конструкции установки, обеспечивающей чистый изгиб балки постоянного сечения при воспроизведении единицы деформации.....	33
2.2 Усовершенствование физико-математической модели процессов измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба.....	34
2.3 Обоснование основных целевых показателей методики измерений воспроизводимой деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба.....	42
2.4 Исследование влияющих факторов при измерении деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба.....	45
2.5 Установление показателей точности методики измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба при воспроизведении единицы деформации.....	61
Выводы по главе 2.....	81
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ.....	82
3.1 Создание установки воспроизведения деформации.....	82
3.2 Проблемы экспериментального подтверждения эквивалентности установки воспроизведения деформации аналогичным установкам иностранных государств.....	94
3.3 Подтверждение наивысшей точности результатов измерений.....	95
Выводы по главе 3.....	97

ГЛАВА 4. СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ ДЕФОРМАЦИИ СРЕДСТВАМ ИЗМЕРЕНИЙ И РАБОЧИМ ЭТАЛОНАМ.....	98
4.1 Определение организационно-технических и структурных параметров поверочной схемы.....	98
4.2 Разработка документации, устанавливающей статус и состав исходного эталона единицы деформации и правила его применения	99
4.3 Обоснование принципов воспроизведения единицы деформации рабочими эталонами	100
4.4 Методы передачи единицы рабочим эталонам деформации.....	104
4.5 Разработка локальной поверочной схемы	106
4.6 Эталоны, предусмотренные локальной поверочной схемой для средств измерений деформации, принцип работы которых основан на измерении перемещений.....	108
Выводы по главе 4	114
ГЛАВА 5. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ	115
5.1 Применение результатов исследований на практике	115
5.2 Перспективы развития эталонов деформации	121
Выводы по главе 5	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	127
СПИСОК ТЕРМИНОВ	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ А Результаты исследования информативных параметров и влияющих факторов при измерении деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба.....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Результаты оценивания показателей точности методики измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ В Создание системы передачи единицы деформации средствам измерений и рабочим эталонам.....	164

ВВЕДЕНИЕ

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 32А-85, 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 [1 – 3]. 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.

Цели и задачи исследования

Цель работы: Увеличение диапазона измерений и повышение точности воспроизведения 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 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.

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

Объект исследования

Метрологическое обеспечение измерений деформации, которое представляет собой теоретические основы, набор технических средств, методов и методик, направленных на получение измерительной информации, обладающей свойствами, необходимыми для выработки решений по приведению объекта управления в целевое состояние.

Предмет исследования

Предметом исследования являются процессы воспроизведения, хранения и передачи единицы деформации.

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.

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 [4]. 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. Lupинский, Л.Б. Потапова, В.П. Ярцев [5], Е.В. Патокин [6]. 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 [7]. В отечественной практике метод DIC исследуется как самостоятельный метод диагностики и как инструмент для градуировки приборов неразрушающего контроля (В.С. Плешанова [8]), а также для изучения пластического течения материалов (В.М. Фарбер, О.Н. Полухина, Д.И. Вичужанин, В.А. Хотинов, С.В. Смирнов [9]).

Для расчётов стандартных неопределённостей использовались алгоритмы, изложенные в стандартах ГОСТ 34100.1–2017/ISO/IEC Guide 98–1:2009 [10, 11] общий подход к оцениванию неопределённости соответствует ГОСТ 34100.3–2017/ISO/IEC Guide 98–3:2008 [12].

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 неопределённости 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 %.

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, исключающих продольные и поперечные силы на рабочем участке балки, обеспечивает стабильное воспроизведение единицы деформации в диапазоне от минус 5000 до 5000 млн⁻¹ с неопределённостью 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 %.

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:

- поверке 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).

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 «Государственному первичному специальному эталону 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. N 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 установки эталонной, 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-го разряда – интерферометров лазерных), МК 4–233 тензокалибраторов (метод косвенных измерений с помощью эталонов длины 2-го 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. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), ООО «Высокоточные измерения», г. Москва.

Публикации

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.

Краткое описание структуры диссертационной работы

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

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ДЕФОРМАЦИИ. СОСТОЯНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

1.1 Определение внутренних напряжений путем измерения деформаций

1.1.1 Значение измерений напряжений и деформаций в науке и технике

Прочность материала – это его способность сопротивляться деформированию и разрушению под действием внешних нагрузок. Этот показатель критически важен для обеспечения надёжности и долговечности деталей машин, конструкций и сооружений, поэтому задачи повышения качества и оптимизации конструкции современной техники во многом сводятся к адекватному расчету и учёту прочностных характеристик [12].

Однако прямое измерение локальных напряжений в сложных конструкциях затруднено технически, поскольку напряжение определяется как предел отношения приложенной силы к элементу площади, перпендикулярному её действию. В практических исследованиях и испытаниях обычно регистрируют деформации и затем, используя известные соотношения между деформацией и напряжением, вычисляют искомые величины. Измерения могут проводиться как при лабораторных испытаниях материалов для определения их механических свойств, так и в натурных или модельных исследованиях сооружений [13].

Таким образом, измерение механической деформации позволяет:

- совместно с измерениями нагрузки устанавливать механические характеристики изделий и продукции;
- прогнозировать остаточный ресурс оборудования и оптимизировать сроки технического обслуживания на основе реального состояния материала. Широкое применение находит сочетание экспериментальных данных с расчётными методами оценки деформированного состояния и прочностных возможностей конструкции, возводимых сооружений [24 - 28]. В работе [19] предложен метод iFEM (inverse Finite Element Method) для реконструкции полей деформаций призматических балок в реальном времени на основе дискретных измерений. Метод объединяет кинематические соотношения теории Тимошенко и дискретизацию конечных элементов, что позволяет получать полный профиль деформаций балок различного сечения. Экспериментальная проверка на традиционно и аддитивно изготовленных тонкостенных образцах показала высокую точность восстановления (зависимость от схемы дискретизации и числа датчиков);
- контролировать состояние технологических процессов и оборудования (штамповка, прокатка, сварка) и обеспечивать гарантированное качество изделий;

– оперативно выявлять зоны повышенной опасности и предотвращать аварии при эксплуатации сложных конструкций и машин. Современные системы мониторинга состояния конструкций обеспечивают контроль напряжённо-деформированного состояния на протяжении всего жизненного цикла объектов [30 – 33]. В работе [24] в течение трёх лет проводилось измерение и моделирование состояния П-образного анкерного узла на опорах моста. Анализ данных показал, что неравномерные нагрузки, температурные колебания и внешние воздействия приводят к значительным изменениям внутренних напряжений и деформаций, а применение автоматизированных методов получения и передачи данных способствует своевременному выявлению критических состояний.

1.1.2 Анализ основных мер деформации, применяемых в науке и технике

Как известно, механическая деформация в зависимости от её изменения после снятия нагрузки может быть упругой или пластической [25]. Пластическая деформация характеризуется перемещением атомов на большое расстояние или поворотом блоков кристаллов, что вызывает остаточное изменение формы и размеров после снятия нагрузки без макроскопических нарушений. Зависимость деформации от вызвавшего ее напряжения представляется выражениями [13, 25, 26]:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}, \quad (1.1)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \quad (1.2)$$

$$v = \frac{p}{K}, \quad (1.3)$$

- где ε_z – деформация (одноосная), м/м;
 σ – нормальное механическое напряжение, Н/м²;
 E – модуль упругости I рода (модуль Юнга), Н/м²;
 γ_{xy} – деформация сдвига, м/м;
 τ_{xy} – касательное механическое напряжение, Н/м²;
 G – модуль упругости II рода (модуль сдвига), Н/м²;
 v – объемная деформация, м³/ м³;
 p – давление, Па;
 K – модуль объёмной упругости, Па.

Модули упругости материалов существенно различаются и зависят от температуры (как правило, для конструкционных сталей снижаются на 2 – 4 % при +100 °С), степени наклепа, легирования и кристаллографической ориентации (анизотропия может давать расхождения до десятков процентов). В настоящее время нормативные документы предполагают для расчётов

использовать табличные значения модулей упругости, на практике их измеряют статическим растяжением или сжатием образцов на испытательных машинах: фиксируют деформацию при заданных нагрузках и по закону Гука вычисляют модуль упругости [27, 28].

Вместе с тем следует отметить, что характеристики прочности обусловлены не столько абсолютным изменением взаимного положения частиц тела, сколько его относительным изменением, т.е. механической деформацией (изменением размеров и формы физических тел, вызванных взаимным перемещением атомов или структурных элементов тела под воздействием полей напряжений). На практике используют различные *меры деформации*¹, которые позволяют оценить отдельные компоненты деформации или деформации отдельных элементов изделия: изменения линейных размеров, изменения углов, некоторых площадей и т.д. [29]. К распространённым мерам деформации относят:

- относительную деформацию (деформацию Коши) [30]

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0}, \quad (1.4)$$

где ε – деформация (обычно выражается в процентах или относительных единицах), или нормальная инженерная деформация;

l_0 – начальная измеренная линейная геометрическая характеристика образца в единицах измерения длины;

l_1 – конечная измеренная линейная геометрическая характеристика образца в единицах измерения длины;

- логарифмическую (истинную) степень деформации, называемую также деформацией Генки (используется при расчетах параметров волочения) [30]

$$e = \ln \left(\frac{l_1}{l_0} \right), \quad (1.5)$$

где e – истинная деформация, или деформация Генки;

l_0 – начальная измеренная линейная геометрическая характеристика образца в единицах измерения длины;

l_1 – конечная измеренная линейная геометрическая характеристика образца в единицах измерения длины;

- деформацию Альманси – Эйлера и деформацию Грина – Лагранжа. Эти меры описывают деформацию в виде тензора 2-го ранга, уравнения содержат квадратичные члены, что позволяет анализировать большие деформации, но сводятся к линейной зависимости для малых (в том числе упругих) деформаций. Значения деформации Альманси – Эйлера и деформации Грина – Лагранжа совпадают если начальное деформируемое состояние мало отличается от

¹ В механике сплошных сред мера деформации - деформация бесконечно малой окрестности материальной точки.

конечного деформируемого состояния, т.е. при малых деформациях и малых поворотах тензоров Грина и Альманси [31].

При рассмотрении деформируемого материала как условно однородной среды, с усреднением свойств по объёму, содержащему множество структурных элементов (например, зёрен) использование меры относительной (инженерной) деформации, является обоснованным. Адекватность такого подхода для решения практических инженерных задач с требуемой точностью подтверждается: успешным использованием в расчётах прочностной надёжности; согласованием с экспериментальными данными; простотой и наглядностью данной меры деформации [32, 35].

В качестве единицы измерения деформации принята млн^{-1} , на практике также применяются: проценты (%) и strain (за рубежом) – 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.

В механике материалов и отечественной метрологии деформация традиционно рассматривается как знакопеременная величина. Согласно основополагающим принципам сопротивления материалов, при растяжении относительная деформация положительна, при сжатии – отрицательна. Это находит отражение в методиках испытаний (например, ГОСТ 1497-2023, ГОСТ 4651-2014), где диаграммы деформирования строятся в координатах «напряжение — деформация» с учётом знака. В настоящей работе также знак перед значением деформации указывает на относительное изменение длины относительно первоначального состояния: растяжение – положительная, сжатие – отрицательная.

Понимание физических процессов деформации и её мер необходимо для расчёта прочности конструкций, проектирования технологических процессов и выбора материалов при изготовлении оборудования. Выбор конкретной меры деформации определяется условиями нагружения, требуемой точностью и характером деформирования. В свою очередь, методы определения деформаций можно разделить на методы прямого получения измерительной информации о деформации (или функционально связанных величин) и методы, реализация которых требует сложной обработки измерительной информации [34, 35].

1.1.3 Методы получения измерительной информации о деформации

а) Методы прямого получения измерительной информации о деформации (или функционально связанных величин)

Метод делительных сеток [36]

На поверхность образца типографским, фото- или механическим способом наносят координатную (прямоугольную, круглую и пр.) сетку. При нагружении ячейки изменяют форму и размеры, что позволяет:

- по изменению формы (например, для круговых ячеек) определить направление главных деформаций;
- по распределению деформаций сетки определять зоны максимальных напряжений и начала пластических деформаций;
- по изменению расстояний между линиями ячеек определить линейные деформации детали;
- расчетным путём по экспериментальным данным определять максимальные деформации сдвига.

Для указанного выше метода измерений ориентировочные характеристики точности измерений деформации составляют: относительная погрешность измерений деформации $\pm 6\%$ при малой базе ($< 5\%$) [37].

Вибрационно-резонансный метод или метод вибрирующей проволоки с использованием струнных тензометров, основанный на использовании зависимости собственной частоты резонансных колебаний проволоки от ее удлинения. Применяются, в частности для исследования деформаций бетонных конструкций. Обеспечивают стабильность длительного мониторинга: частотный сигнал нечувствителен к длине провода, встроенный терморезистор компенсирует деформацию, которая обусловлена изменением температуры [38].

С использованием механических тензометров

В механических тензометрах обычно используется рычажная или зубчатая передача. Принцип действия механического тензометра основан на перекачивании цилиндра (измерительный ролик), зажатого между неподвижной (корпус) и подвижной (испытываемая упругие деформации стенка барабана) плоскостями. К цилиндру (ролику) прикреплена стрелка, конец которой описывает кривую, представляющую собой ветвь удлиненной циклоиды. К преимуществам относят простоту, отсутствие дополнительной вторичной аппаратуры, недостаткам – большие габариты, низкую чувствительность, отсутствие дистанционного считывания и сложность испытаний при циклических нагрузках [39].

С использованием тензорезисторов

Принцип действия основан на изменении электрического сопротивления проволоки или плёнки при деформации [40]. Величина тензоэффекта проводников определяется в основном изменением геометрических размеров резистора (проволоки, пленки), а полупроводников – удельного сопротивления вследствие изменения эффективной массы и подвижности носителей тока. Используются в экстремальных условиях (низкие/высокие температуры, сильные магнитные поля, излучения). В Институте машиноведения им. А.А. Благонравова разработано четыре типа измерительных преобразователей для условий воздействия высоких и сверхнизких температур, сильных магнитных полей, ионизирующих излучений). Области применения – энергетика, металлургия, транспорт и др. Применяются в качестве первичных преобразователей – в различных датчиках механических величин. Расширение диапазона рабочих условий достигнуто применением соответствующих материалов и технологических процессов [41].

Поляризационно-оптический метод и метод хрупких покрытий

Исследуются главным образом напряжения на поверхности непрозрачных деталей и конструкций с применением полярископов отражательного типа [42]. Покрытие скрепляется с поверхностью исследуемой детали, в точках которой необходимо определить напряжения. При методе хрупких покрытий напряжения определяют по характеру трещин в покрытии и величине нагрузки, создающей эти трещины. В методе оптически чувствительных покрытий нужную информацию получают из измерений двойного лучепреломления, возникающего в покрытии под действием напряжений. Таким образом, в обоих методах напряженное состояние в исследуемой детали определяется по напряженному состоянию покрытия.

С использованием волоконно-оптических датчиков на основе решёток Брэгга (ВБР)

Решетки сформированы в оптическом волокне при помощи (чаще всего) ультрафиолетового лазера и представляют собой участок световода с периодическим изменением показателя преломления вдоль оси. ВБР каждого датчика отражает свет определенной длины волны с шириной спектра $\sim 0,2$ нм. При механическом и температурном воздействии изменяются период и показатель преломления решетки, вследствие чего наблюдается смещение длины волны отраженного света. Измеряя величину этого смещения, можно определить деформацию и изменение температуры. Волоконно-оптические датчики обладают следующими преимуществами по сравнению со своими электрическими аналогами [43, 93, 97]:

- а) невосприимчивость к электромагнитным полям и помехам;
- б) устойчивость к радиации;
- в) устойчивость к сложным климатическим условиям и агрессивным химическим средам;

- г) отсутствие необходимости электрического питания, заземления и гальванической развязки;
- д) пожаробезопасность и взрывобезопасность;
- е) датчик может находиться на большом расстоянии (десятки километров) от считывающего устройства (справедливо как для квазираспределенных систем на основе ВБР, так и любых распределенных систем);
- ж) высокое быстродействие датчика, малая тепловая инерционность;
- з) возможность последовательного соединения множества датчиков в одну цепочку;
- и) не являются источником радиоволн;
- к) не могут поразить электрическим током;
- л) не подвержены влиянию коррозии;
- м) обладают высоким экологическим индексом (безопасности окружающей среды);
- н) более высокое разрешение и меньшая погрешность по сравнению с классическими решениями;
- о) позволяют снизить нагрузку на структуру объектов за счет небольшого веса;
- п) компактность.

Помимо указанных методов с появлением новых материалов и развитием цифровых технологий создаются новые средства измерений и системы. Так, в [44] представлены высокоэластичные тензодатчики на основе гибридного материала из углеродных нанотрубок и графена, позволяющие сочетать большой диапазон измеряемых деформаций (650 % – 700 %) с коэффициентом чувствительности 12,1 и стабильностью до 600 циклов нагружения – разгружения при ± 500 % деформации. В работе [45] описана аналитическая модель процессов при больших деформациях стержневых конструкций, которая упрощает проектирование весоизмерительных механизмов: погрешность расчёта относительно метода конечных элементов не превышает 6 %, а интеграция модели в графический интерфейс обеспечивает интуитивно понятный анализ результатов контроля с использованием одноточечных тензодатчиков.

б) Методы, результаты которых требуют сложной обработки измерительной информации

Эти методы дают «косвенные», аналитически связанные с деформацией данные (интерферограммы, дифракционные картины, электрические потенциалы и пр.), которые требуют аналитической или численной обработки измерительной информации для определения деформаций и напряжений

Рентгеновский (дифракционный) метод [18, 19]

При его использовании измеряется смещение и ширина дифракционных линий кристаллической решётки напряжённого образца относительно ненапряжённого. Позволяет

оценить величину и знак поверхностных остаточных напряжений, но не даёт полного поля напряжений по всей толщине и не фиксирует радиальное напряжение σ_{zz} , так как на поверхности $\sigma_{zz}=0$. Применяют для оценки величины и знака напряжений в деталях малых размеров и сложной формы, для которых механические методы применять трудно, а также для исследования тонких слоев материалов.

Голографическая и электронная интерферометрия [20, 21, 74, 75]

Метод основан на записи и восстановлении волнового фронта двух когерентных пучков — предметного и опорного. При совмещении голограмм, зафиксированных в состояниях «до» и «после» нагружения, формируется интерферограмма, отображающая перемещения и деформации поверхности объекта. Обеспечивается визуализация как перемещения целого объекта, так и деформацию его поверхности, при этом общие и локальные перемещения хорошо разделяются. Голография позволила исследовать объекты со сложным рельефом поверхности. Главное требование - ее микрорельеф не должен измениться за время исследования. Исследуемую поверхность следует очистить, промыть и не загрязнить.

Электронная спекл-интерферометрия в значительной степени аналогична голографической интерферометрии: в обоих случаях используются лазерное излучение, сходные оптические схемы и результаты в форме интерферограмм. Технология голографии позволяет фиксировать полную информацию о геометрии тела, в том числе и объем, тогда как спекл-интерферометрия основана на регистрации электронной фотографией тонкой «зернистой» структуры света, отражённого диффузной поверхностью при лазерном облучении, — спекл-поля. Сравнение двух записанных спекл-картин (удобно в цифровом виде) позволяет выявить изменения положения или геометрии объекта в виде интерферограмм с той же чувствительностью, что и в голографической интерферометрии. Потеря информации из-за перехода от объёмного изображения к плоскому оказывается несущественной, тогда как сложная, разнородная по этапам голографическая процедура заменяется единым технологически связанным циклом с расширенными возможностями автоматизации [47], [48]. Существенное преимущество электронной спекл-интерферометрии состоит в возможности записывать практически неограниченное число экспозиций и затем произвольно комбинировать их. Каждая выбранная пара или последовательность кадров характеризует сдвиг объекта между соответствующими моментами времени. Это позволяет анализировать не только статические состояния, но и движение, подбирая время экспозиции и интервалы между ними, и восстанавливать траекторию перемещений объекта с «микронной точностью» [46].

Электрохимический метод

В микрообъёмах металла фиксируется смещение электродного потенциала при упругих деформациях (например, армко-железо, сталь 20). Изменение потенциала линейно зависит от

деформации вплоть до предела текучести, после чего связь нарушается. Позволяет фиксировать начало пластической деформации раньше механических методов [49].

Выбор метода экспериментального исследования (определения деформаций и напряжений) объекта контроля обусловлен комплексом рассмотренных ниже факторов, связанных как с природой самих измеряемых величин, так и с условиями их практического применения:

- деформации в упругой области малы, что требует высокочувствительных методов, тогда как в пластической области деформации могут быть существенно большими, но неоднородными, что усложняет их регистрацию;
- температурные воздействия (криогенные температуры, нагрев) требуют использование методов, устойчивых к тепловым помехам (например, волоконно-оптические датчики);
- агрессивные среды (химические, радиационные), которые исключают применение контактных методов;
- динамические нагрузки (удары, вибрации), которые обуславливают необходимость высокочастотных измерений;
- геометрическая сложность объектов, требующая оценивать внутренние напряжения, например с использованием ультразвуковых методов.
- сложноструктурированные (анизотропные) материалы (например, композиты, сплавы с памятью формы) требующие разработки специализированных методик измерений, например, с использованием метода акустической эмиссии [50, 51].

Разнообразие методов измерения деформаций объясняется отсутствием универсального технического решения для множества прикладных задач и существенно отличающихся граничных условий измерений: от лабораторных испытаний материалов до натуральных обследований сооружений и контроля производственных процессов и объектов. При этом большинство описанных методов и средств не имеют установленных в ходе государственных испытаний метрологических характеристик, а также данных о прослеживаемости результатов измерений и сопоставимости результатов, полученных разными методами [52].

1.2 Состояние метрологического обеспечения измерений деформаций

Создание средств измерений с техническими характеристиками, удовлетворяющими современным и перспективным требованиям науки и промышленности без соответствующего метрологического обеспечения, не гарантирует единство и требуемую точность измерений.

В настоящее время требования к средствам измерений деформации при испытаниях материалов регламентированы в стандартах, например:

ГОСТ 25.503–97 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие.

ГОСТ 1497–84 Металлы. Методы испытаний на растяжение.

ГОСТ 25.502–79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.

ГОСТ 3248–81 Металлы. Метод испытания на ползучесть.

ГОСТ 11262–80 Пластмассы. Метод испытания на растяжение.

ГОСТ 25.601–80 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах.

ГОСТ 25.602–80 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах.

В действующих стандартах на методы испытаний материалов для измерения деформации, как правило, рекомендуются контактные тензометры по ГОСТ 18957–73 «Тензометры для измерения линейных деформаций строительных материалов и конструкций. Общие технические условия», а также тензорезисторы. Нормируемая погрешность таких средств измерений обычно составляет 1 % – 3 % от измеряемой величины, при этом в стандартах на методы испытаний полимерных композиционных материалов устанавливается требование не более 1 % от предельного значения деформации. Следует отметить, что значительная часть стандартов на методы испытаний композиционных материалов и тензометрических средств измерений была принята более десяти лет назад и до настоящего времени не пересматривались.

Требования к точности измерения деформации регламентированы и в стандартах на машины для испытания материалов [53 – 55]. В [53] машины классифицируются по допускаемой погрешности измерения деформации (удлинения) на четыре группы (1,0 %; 2,0 %; 3,0 % и 5,0 % – от измеряемой величины, причем с 01.01.1995 г.), а в [55] машины для испытания на ползучесть подразделяются на три группы (0,5; 1,0 и 2,0 для металлов и 1,0; 2,0 и 3,0 для полимерных материалов в процентах от предельного значения диапазона).

Отечественные стандарты на испытательные машины в части технических и метрологических требований к измерению силы соответствуют рекомендациям OIML R 65 [56], которые, подразделяются по допускаемой погрешности измерения силы на четыре класса точности (0,5; 1,0; 2,0; и 3,0). Требования к точности измерения удлинения или деформации не регламентированы и можно предположить, что и погрешность измерения деформации должна соответствовать погрешности измерения силы и находиться в пределах от 0,5 % до 3,0 %. В

отечественном стандарте для машин класса точности 0,5 допускаемая погрешность измерения деформации – 1 %.

На момент начала исследований по данным федеральной государственной информационной системы Росстандарта (ФГИС «АРШИН») утверждено около 30 типов средств измерений деформации, из них 16 типов тензорезисторов, 10 типов датчиков деформации струнных, два типа установок эталонных.

ГОСТ 8.543-86 Поверочная схема устанавливающая назначение установки высшей точности для воспроизведения единицы деформации — относительной величины (миллионная доля, млн^{-1}), комплекс основных средств измерений, входящих в ее состав, основные метрологические характеристики установки высшей точности и порядок передачи размера единицы деформации от установки высшей точности при помощи образцовых средств измерений рабочим средствам измерений с указанием погрешностей и основных методов поверки до 2011 года (рисунок 1.1). По результатам обзора существующих средств измерений, методик измерений и требований нормативных документов в области метрологического обеспечения выявлены следующие проблемы:

- поверочную схему возглавляет установка высшей точности УВТ 32А–85, что не соответствует требованиям Приказа Минпромторга РФ от 11.02.2020 № 456, согласно которому во главе поверочной схемы должен находиться Государственный первичный эталон или шкала измерений;

- поверочная схема не в состоянии обеспечить единство измерений деформации в силу широкого спектра вновь разрабатываемых и применяемых средств измерений деформации, конструкции которых и реализуемые ими методы измерений зависят от деформируемого материала, диапазона деформации, условий измерений.

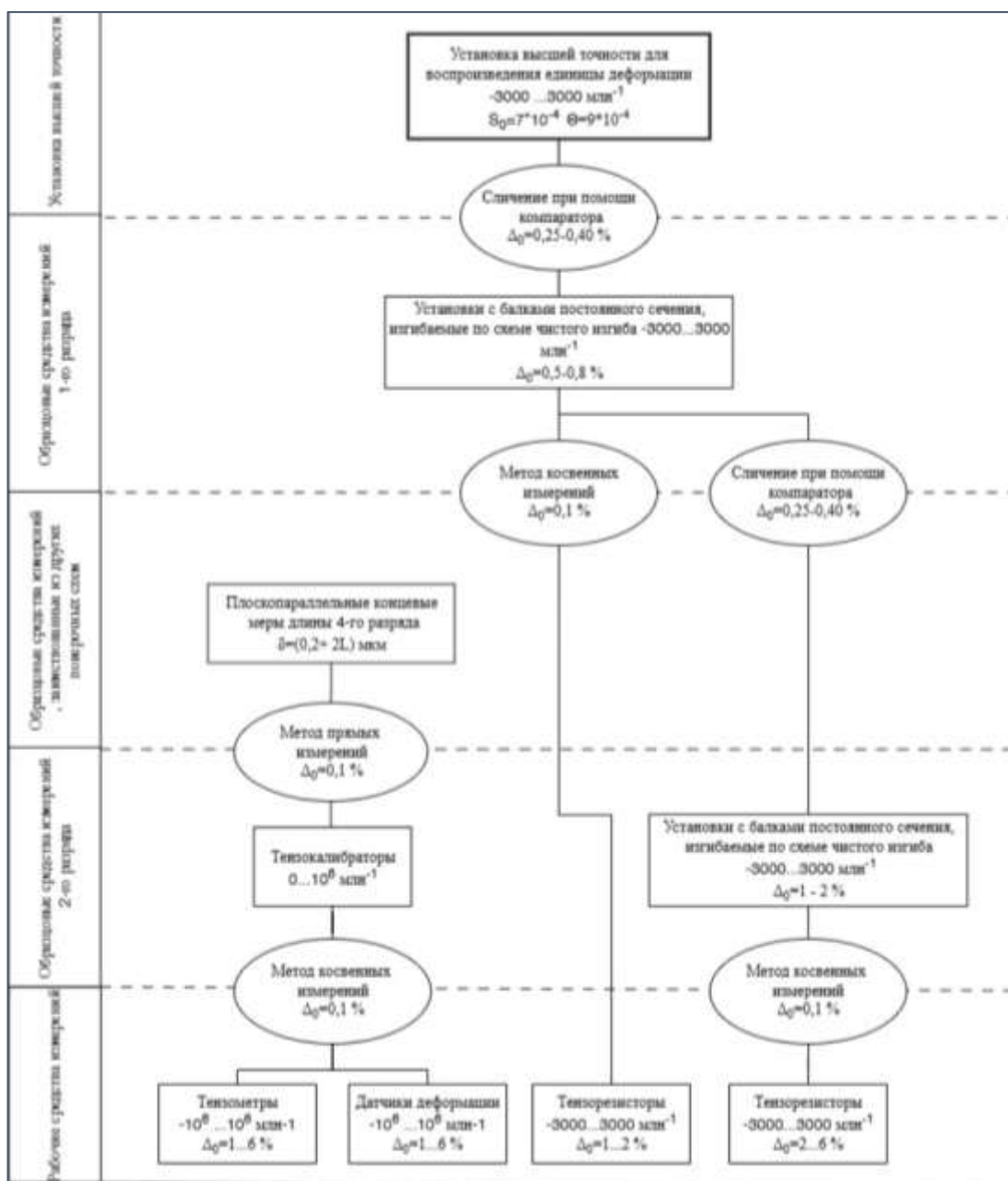


Рисунок 1.1 – Государственная поверочная схема для средств измерений деформации в соответствии с ГОСТ 8.543-86

Таким образом, в настоящее время отсутствует метрологическое обеспечение измерений деформации, включающее технические средства и нормативную документацию. Существующие отечественные стандарты регламентируют методы испытаний, но не обеспечивают комплексного подхода к оценке погрешностей и требований к поверке средств измерений. Большинство стандартов на методы испытаний не обновлялись более 10 лет. Эталонные установки аттестованы косвенными методами.

Ключевым вопросом (проблемой) обеспечения единства измерений является разработка и создание эталонов деформации, а также нормативных документов, регламентирующих их применение.

1.3 Определение требований к эталонам деформации

Для формирования путей развития метрологического обеспечения измерений деформации требуется обосновать и установить технические требования к эталонам деформации:

- выделить основные применяемые и перспективные типы средств измерений деформации в производственной и строительной отраслях;
- проанализировать их метрологические и технические характеристики;
- исследовать конструктивные особенности средств измерений.

Также необходимо обосновать принципиальную схему нагружения, применяемую в эталоне деформации, для чего:

- проанализировать кинематические и конструктивные особенности эталонов деформации (нагружающих эталонных установок), используемых в нашей стране и за рубежом;
- проанализировать их точностные характеристики и методы измерений деформации при воспроизведении единицы деформации для оценки возможности и целесообразности использования их при разработке эталонов деформации (нагружающих эталонных установок).

1.3.1 Анализ требований к точности воспроизведения деформации

Средства измерения деформации можно разделить на 2 больших класса:

- СИ деформации принцип действия, которых основан на измерении относительного перемещения двух точек исследуемого объекта, которые составляют базовую длину. Усреднение измеряемых деформаций происходит математически при допущении однородности деформации на всей поверхности базовой длины исследуемого объекта (более 25 типов СИ). Данный класс СИ представлен преимущественно экстензомерами: навесными, длинноходовыми, оптическими и др. Передача единицы экстензомерам осуществляется от средств измерений длины, таких как микрометрические винты – тензокалибраторы, интерферометры, которые в свою очередь прослеживаются Государственному первичному эталону длины [35].

- СИ деформации полного поля, данные СИ преимущественно имеют малую площадь контакта с испытываемым объектом (до нескольких сантиметров), в рамках которых происходит автоматическое усреднение измеряемых деформаций, обусловленное принципом измерений данных СИ (более 20 типов СИ). К ним относятся тензорезисторы, оптоволоконные преобразователи деформации, пьезоэлектрические преобразователи и др.

Для передачи единицы требуется артефакт – образец, на поверхности, которого воспроизводится деформация с необходимой точностью. Кроме тензорезисторов следует учесть датчики деформации на основе ВБР (принцип действия основан на изменении периода и показателя

преломления решетки при механическом). Типы средств измерений деформации, применяемых в производственной и строительной отраслях приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1– Средства измерений деформации - общие сведения

Наименование СИ	Принцип действия	Применение	Характеристика	Примечания
Тензорезисторные датчики (тензометрические датчики сопротивления)	Измерение изменения электрического сопротивления при деформации	Контроль напряжений в конструкциях, весоизмерительные системы, испытания материалов	Диапазон измерений от 0 до 5000 млн ⁻¹ $\delta = \pm 0,1\% - 2\%$ Чувствительность (коэффициент тензочувствительности) 1,8–2,1 (для металлических тензорезисторов) Температурная погрешность 0,01% – 0,1% / °С Собственная частота 1 – 50 кГц Линейность 0,1 % – 1 % от полной шкалы	Для проверки МХ требуется образец, на поверхности которого воспроизводится заданная деформация
Оптоволоконные датчики (на основе брэгговских решеток, ВБР)	Измерение сдвига длины волны отраженного света при деформации	Мониторинг строительных конструкций, авиация, нефтегазовая промышленность	Диапазон измерений от 0 до 5000 млн ⁻¹ $\delta = 0,1\% - 0,5\%$ Частота опроса до 10 кГц Линейность >99 %	Для проверки МХ требуется образец, на поверхности которого воспроизводится заданная деформация
Струнные датчики деформации	Изменение собственной частоты колебаний струны в зависимости от ее деформации	Контроль напряжений конструкций зданий, сооружений, технологического оборудования	Диапазон измерений от 0 до 3000 млн ⁻¹ $\delta = \pm 1\% - 2\%$	Для проверки МХ требуется образец, на поверхности которого воспроизводится заданная деформация – растяжения или нагружающее оборудование, оснащенное датчиками перемещения

Наименование СИ	Принцип действия	Применение	Характеристика	Примечания
Лазерные интерферометрические системы (бесконтактные)	Измерение деформации по изменению интерференционной картины лазерного луча.	Прецизионные измерения в метрологии, нанотехнологиях, машиностроении.	Диапазон измерений до нескольких миллиметров Метрологические характеристики не установлены	Методики поверки и определения МХ отсутствуют
Бесконтактные (оптические) системы (DIC, цифровая корреляция изображений)	Анализ деформации по изменению изображения поверхности.	Испытания материалов, биомеханика, аэрокосмическая промышленность.	Диапазон измерений от 1 до 10000 млн ⁻¹ Метрологические характеристики не установлены Частота съемки до 1 МГц (высокоскоростные камеры) Зависимость от освещения	Для проверки МХ требуется образец, на поверхности которого воспроизводится заданная деформация
где δ – пределы допускаемой относительной погрешности.				

Таким образом, можно сформулировать основные требования к эталонам деформации:

- тип эталона – средство сравнения, обладающее установленными в результате исследований механическими характеристиками, воспроизводящее на рабочей поверхности заданную деформацию;
- диапазон воспроизведения деформации от 1 до 5000 млн⁻¹;
- относительная погрешность воспроизведения деформации при обеспечении минимального запаса по точности $\frac{1}{2}$ от 0,1 % до 1,5 %;
- гармонизация с международными стандартами.

1.3.2 Конструктивные особенности установок для измерений деформации

Имеется ряд технических решений реализации схемы чистого изгиба эталонной балки постоянного сечения, одним из наиболее эффективных решений является четырехточечный изгиба эталонной балки, указанный на рисунке 1.2.

В этом случае балка изгибается при перемещении подвижной траверсы в направлении сверху – вниз под воздействием специальных опор, надавливающих сверху на балку, установленную на неподвижных опорах. Как правило, для исключения продольных нагрузок при изгибе балки применяют роликовые опоры. Данный принцип реализован в установках воспроизведения деформации типа УВИД–300 и установки «МЕССТЕХНИК» (рисунок 1.3).

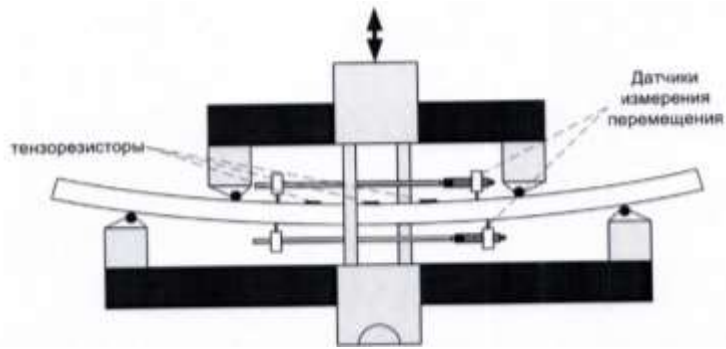
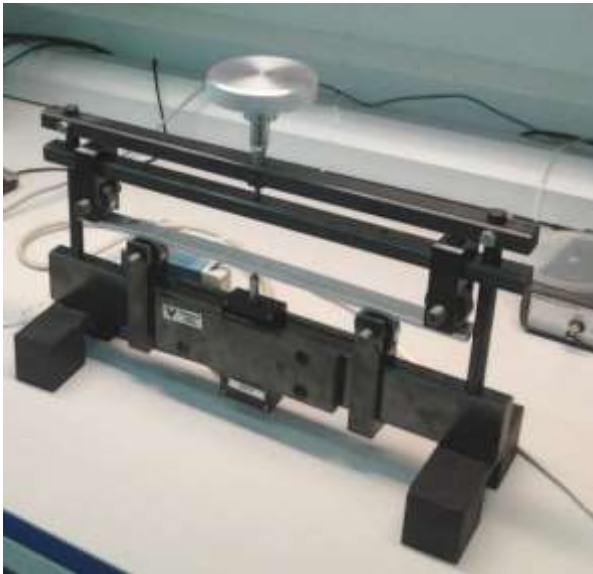
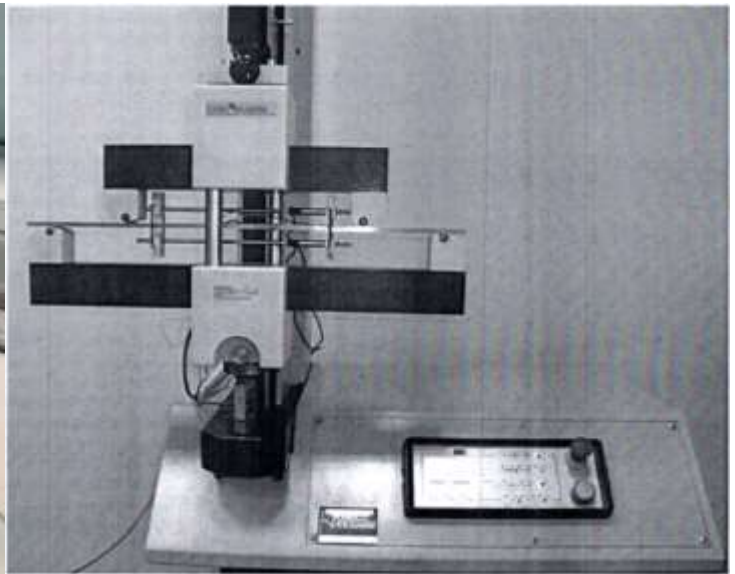


Рисунок 1.2 – Изгиб балки в одном направлении



а) Установка УВИД-300



б) Установка «МЕССТЕХНИК»

Рисунок 1.3 – Установки, реализующие знакопостоянный изгиб

Для реализации изгиба балки в двух направлениях применяют схему, указанную на рисунке 1.4.

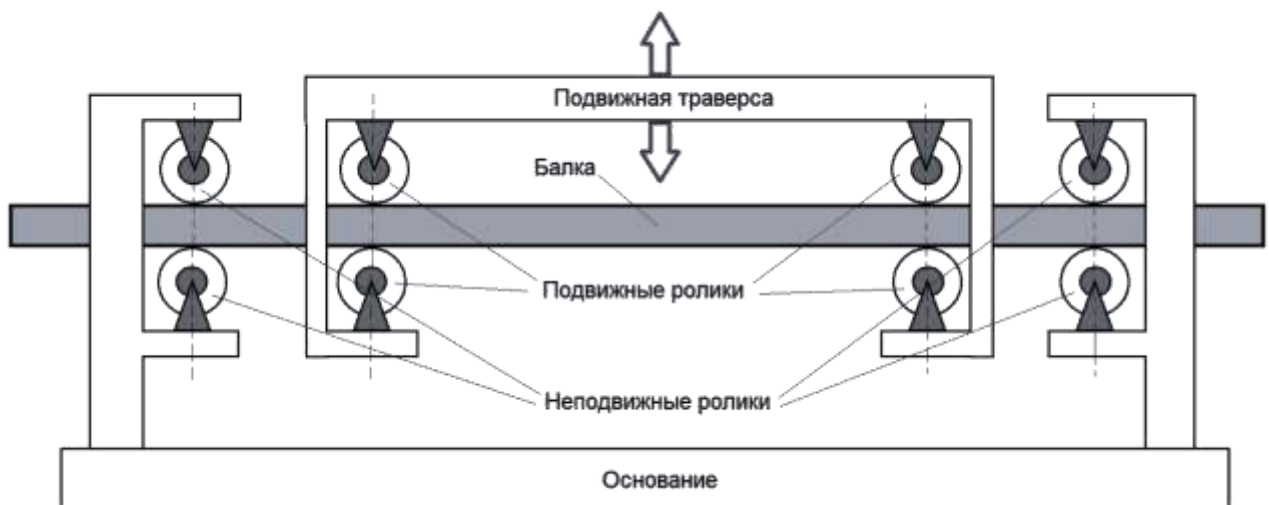


Рисунок 1.4 – Схема двухстороннего изгиба

Балка устанавливается между двумя парами роликовых опор, неподвижно закрепленными и связанные с основанием. При перемещении подвижной траверсы с установленными на ней двумя парами роликовых опор балка изгибается по схеме чистого изгиба в направлении перемещения траверсы. Данная схема реализована в частности в установке воспроизведения деформации ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина», г. Новосибирск, (рисунок 1.4 а), установке УВТ 32А–85 ФГУП «УНИИМ», г. Екатеринбург, (рисунок 1.5 в) и в установке УВД-А института машиноведения РАН (ИМАШ РАН), г. Москва (рисунок 1.5 б).



а)



б)



в)

а) ФГУП «СибНИА» б) ИМАШ РАН в) УВТ 32А–85 ФГУП «УНИИМ»

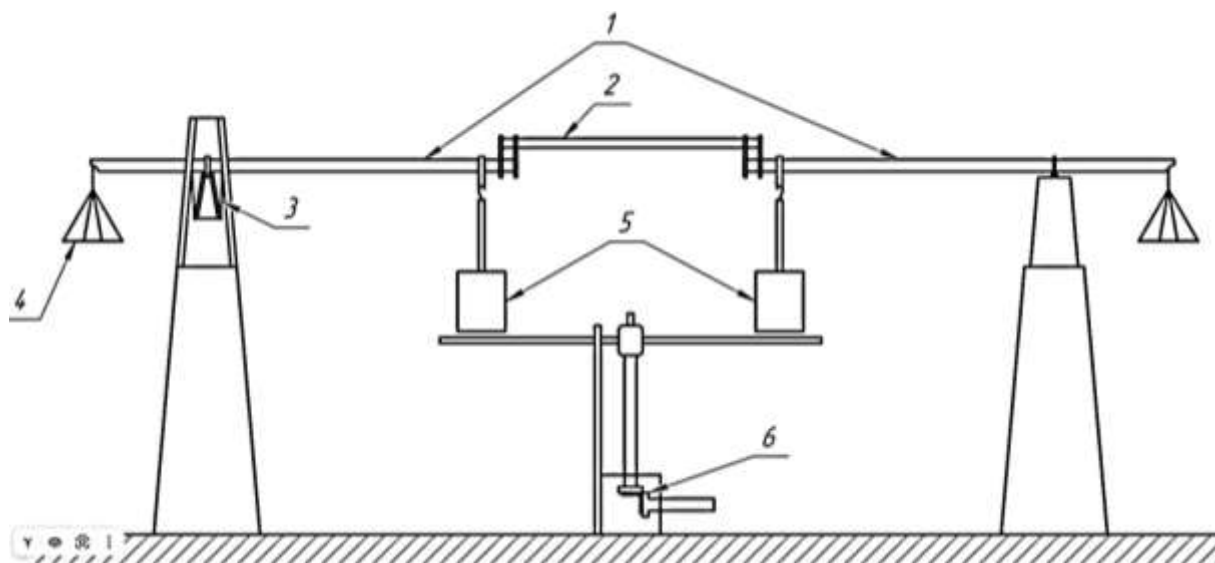
Рисунок 1.5 – Установки воспроизведения деформации

Также внимание уделено требованиям к аналогичным установкам, предъявляемым зарубежными стандартами: [57 – 59].

Требования к установке чистого изгиба ASTM E251-20

Типичная механическая система показана на рисунке 1.6. Испытательная балка может быть выполнена из любого подходящего материала и должна иметь размеры $19 \times 25 \times 760$ мм ($0,75 \times 1 \times 30$ дюймов). Минимальное расстояние между точками поворота на опорах должно быть равно 2,45 м (96 дюймов). Весь узел балки симметричный относительно вертикальной линии, проходящей через ее среднюю точку. Положения точек поворота испытательной балки и значения нагрузки от разновесов отрегулированы так, чтобы обеспечивались требуемые деформации. Отклонение деформации в пределах используемого участка этой балки не более 1 % от величины деформации в контрольной точке. Используемый участок балки должен составлять по меньшей мере половину длины свободной части балки.

Необходимость в измерении деформации непосредственно во время каждого испытания устраняется благодаря калибровке данной системы путем измерения с помощью экстензометра класса А фактической деформации, создаваемой на поверхности балки при приложении к ней нагрузки. Балку подвергают полной повторной калибровке после 50 случаев практического использования или через каждые 6 месяцев в зависимости от того, какой из этих моментов времени наступает позже.



- 1 – Удлинитель испытательной балки; 2 – Испытательная балка; 3 – Гибкие пластины;
4 – Поддон с противовесами; 5 – Грузы; 6 – Механизм для подъема и опускания грузов.

Рисунок 1.6 – Испытательный стенд с постоянным изгибающим моментом [58]

Оборудование воспроизведения деформации, предусмотренное AIA/NAS 942

Образец представляет собой балку с постоянным моментом из термообработанного материала, размеры которой указаны на рисунке 1.7. На этом же чертеже показано расположение

верхнего (растяжение) и нижнего (сжатие) датчиков, а также точки приложения нагрузки и реакции.

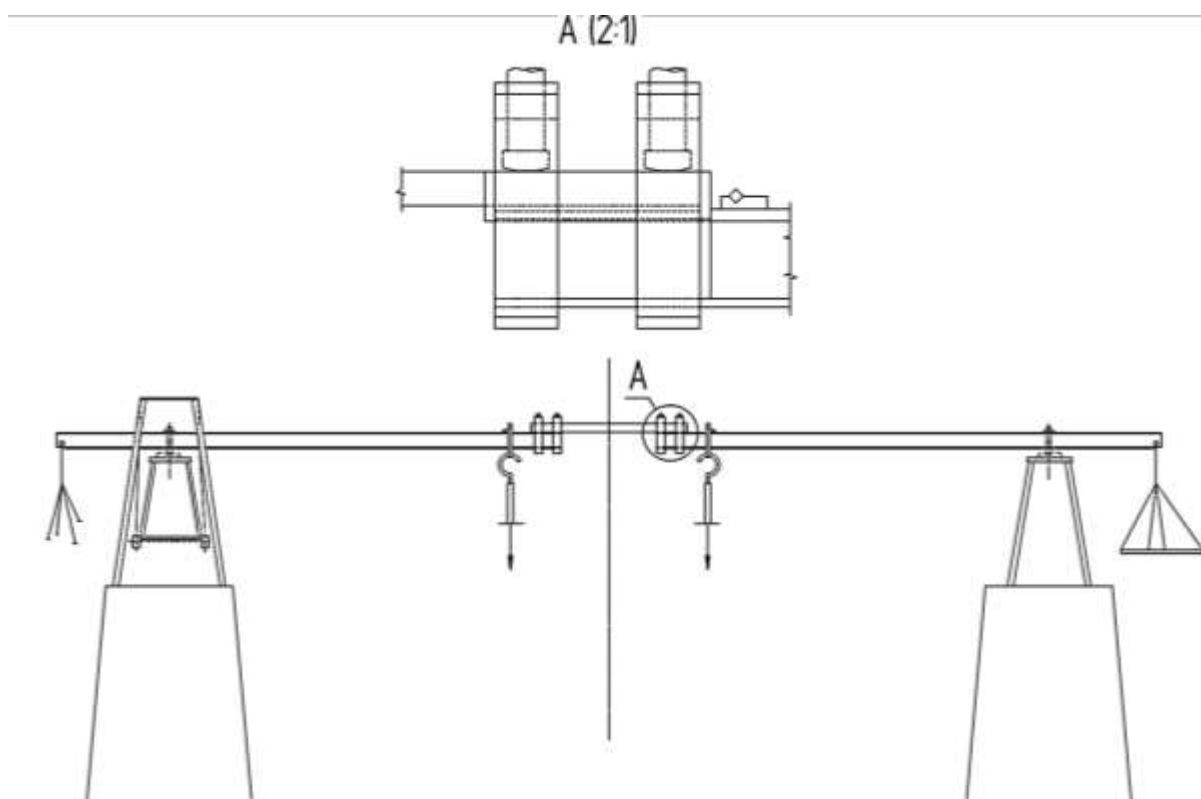
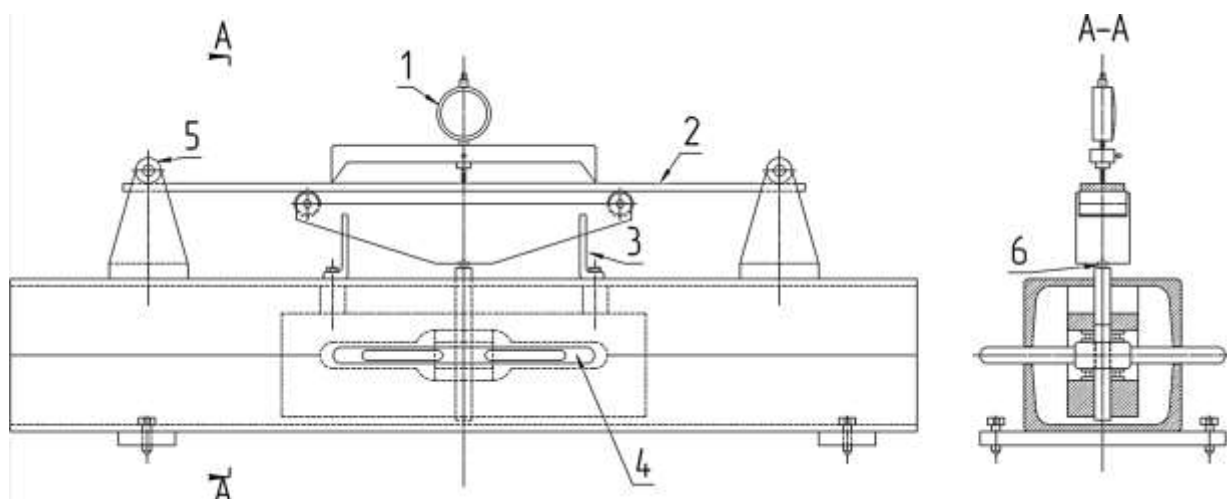


Рисунок 1.7 – Испытательный стенд AIA/NAS 942 [59]

Измерение механической деформации балки с тензорезисторами выполняется с использованием дополнительного средства измерений деформации. Калибровка выполняется на балке и нагрузочном устройстве. Измерение механической деформации проводится на одном и том же участке. Результаты измерения деформации могут считаться репрезентативными для других участков балки, только если они подтверждены испытаниями с дополнительного средства измерений деформации. Нагружение балки с точностью $\pm 5 \text{ млн}^{-1}$ обеспечиваются тензодатчиками с чувствительностью более 10^{-3} Ом/см , уровня качества А (по отношению к коэффициенту тензочувствительности) и системой измерения деформации с точностью $\pm 2 \text{ млн}^{-1}$.

Оборудование воспроизведения деформации, предусмотренное в BS 6888:1988

Установки применяются для воспроизведения и измерения деформации с точностью $\pm 1 \text{ млн}^{-1}$. Примеры калибровочных установок и испытываемых образцов, считающихся подходящими, представлены на рисунке 1.8.



1 – dial gauge (циферблатный индикатор); 2 – testing specimen (испытываемый образец); 3 – guide (направляющая); 4 – loading screw jack (винтовой зажим); 5 – needle roller bearing (иглольчатый роликовый подшипник); 6 – ball bearing (шариковый подшипник)

Рисунок 1.8 – Калибровочная установка для определения коэффициента тензочувствительности [57]

Для реализации схемы растяжение – сжатие используют машину силоизмерительную (силовоспроизводящую) и балку постоянного сечения, в качестве средств измерений удлинения – сжатия используют индикатор, для определения размеров поперечного сечения – микрометр.

Применение консольной балки равного сопротивления как несущего элемента в градуировочных установках не рекомендуется вследствие неточности задания деформации по длине балки.

Требования ASTM E251–92(2009) к установке воспроизведения деформации с прямым растяжением или сжатием

В данной системе образец для испытаний подвергается прямой деформации растяжения или сжатия с помощью испытательной машины или другого устройства, способного обеспечивать приложение нужной осевой нагрузки к образцу для испытаний. Горизонтальное положение данного образца для испытаний удобно для установки контрольного экстензометра, но это не является необходимостью. Приложение нагрузки может осуществляться с помощью гидравлических, механических или иных средств, но при этом исключая кручение или изгибание образца для испытаний. Кручение в механической системе, показанной на рисунке 1.9, предотвращается с помощью реактивной штанги. Тензодатчик, который подвергается испытанию, должен устанавливаться в центре участка уменьшенного сечения; экстензометр класса А должен быть установлен так, чтобы перекрывать собой весь датчик. Данный экстензометр должен иметь измерительную базу, как можно более близкую к измерительной базе

датчика для того, чтобы свести к минимуму эффект неравномерности деформации по длине образца для испытаний.

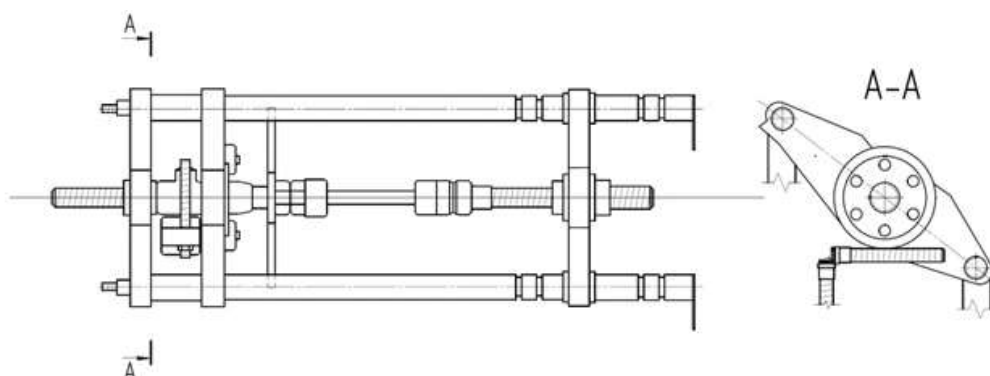


Рисунок 1.9 - Испытательная машина для воспроизведения деформации с прямым растяжением или сжатием [58]

При реализуемых схемах воспроизведения деформации возникают несколько систематических источников погрешности, обусловленных конструкцией узлов передачи нагрузки на балку и ограничивающих точность формирования деформации на рабочих поверхностях по всей длине рабочей зоны. К основным источникам относятся:

- несимметричность приложения изгибающих усилий от подвижных роликовых опор относительно неподвижных;
- непараллельность осей роликовых опор, приводящая к возникновению скручивающих эффектов в балке при ее изгибе;
- отклонения образующих роликов от прямолинейности, вызывающие неодновременное соприкосновение опор с балкой, что приводит к появлению крутящего момента и, как следствие, к неоднородности деформации на рабочей поверхности балки.

Проведенный анализ выявил существенные различия в подходах к воспроизведению и измерению деформаций, установки основаны на схемах как растяжения, так и изгиба с диапазоном воспроизведения деформации от минус 3000 до 3000 млн⁻¹ с показателями точности ≤1% и ценой наименьшего разряда 1 млн⁻¹. При воспроизведении единицы деформации используются в качестве средств измерений воспроизводимой деформации высокоточные экстензометры и лазерные интерферометры, что позволяет осуществлять постоянный контроль во время измерений.

Схема нагружения «чистого изгиба» является предпочтительным вариантом, потому что риски разрушения балки при обеспечении диапазона измерений от 0 до 5000 млн⁻¹ значительно ниже, чем при реализации схемы растяжения. Такой вид нагружения позволяет обеспечить предсказуемость и простоту анализа деформационного состояния, мягкий, контролируемый характер нагружения, минимизируя влияние внецентренных усилий и сложных напряженных

состояний, что критично для точного воспроизведения механической деформации в метрологических установках.

Использование спекловых интерферометров для контроля и измерений деформационного поля возможно и целесообразно по результатам исследований их метрологических характеристик.

Таким образом, необходима разработка физико–математической модели измерений деформации поверхности упругодеформированной балки, изгибаемой по схеме чистого изгиба для обоснования конструкции и создания установки для воспроизведения механической деформации.

Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования

Проведённый анализ современных методов и метрологического обеспечения измерений механической деформации в области контроля механических напряжений, а также оценки ресурса и надежности конструкций, позволил сформулировать цель и задачи диссертационного исследования.

Цель работы: Увеличение диапазона измерений и повышение точности воспроизведения 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 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 системы передачи единицы деформации.

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

ГЛАВА 2. НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦЫ ДЕФОРМАЦИИ НА ПОВЕРХНОСТИ УПРУГОДЕФОРМИРОВАННОЙ БАЛКИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ, НАГРУЖАЕМОЙ ПО СХЕМЕ ЧИСТОГО ИЗГИБА

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

В качестве базовой кинематической схемы для воспроизведения единицы деформации выбрана схема чистого изгиба, при котором в поперечном сечении балки возникают только нормальные напряжения. Для достижения чистого изгиба необходимо соблюдение ряда условий, связанных с характером приложения нагрузки, геометрией образца и конструкцией испытательной установки. При этом должно обеспечиваться равномерное распределение нагрузки, чтобы исключить возникновение крутящих моментов и поперечных сил и быть минимизировано влияние внешних факторов (температурные и вибрационные воздействия).

На основании выводов первой главы (раздел 1.3.2) и теоретических принципов обеспечения чистого изгиба сформулированы требования к конструкции: она должна реализовывать симметричное чистое изгибное нагружение, обеспечивать контролируемое деформационное поле и исключать известные источники погрешностей — асимметрию приложения усилий, скручивающие эффекты от непараллельности опор и неоднородности контакта из-за отклонений роликов.

В отличие от классической четырёхточечной схемы [60], в предлагаемой компоновке (приведена на рисунке 2.1) реализован способ задания изгибающего момента, обеспечивающий чистый изгиб без жёсткой привязки к четырём точкам приложения: горизонтально расположенные рычаги (вдоль балки) связанные через шатунную систему, согласованно передают момент к концам балки, а механическое задание угла их наклона осуществляется с помощью червячной передачи.

Чистый изгиб балки прямоугольного сечения обеспечивается за счет следующих принципов построения и конструктивных особенностей:

1) балка на своих концах фиксируется подушками, устанавливаемыми между двух пар роликов с минимальным зазором, что исключает появление «мертвых зон» при изменении знака прогиба;

2) каждые две пары роликов жестко закреплены на своих рычагах, параллельность осей роликов обеспечивается технологией фрезерования отверстий и точностью изготовления осей;

3) рычаги установлены на шатунах, позволяющих обеспечить симметричность приложения усилий при изгибе балки;

4) шарнирное коромысло обеспечивает снижение влияния нелинейности оси перемещения ползуна и биения вала червячной передачи.

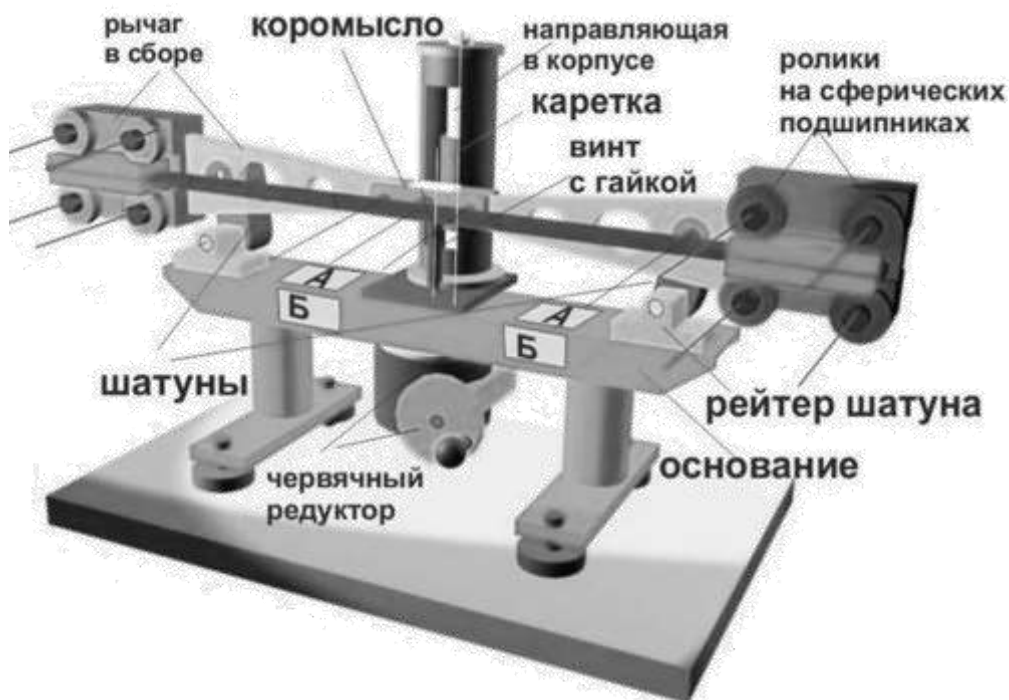


Рисунок 2.1 – Компоненка установки воспроизведения деформации

По сравнению с альтернативными подходами (растяжением, комбинированными нагрузками и др.) предложенная схема обеспечивает:

- предсказуемое и однородное деформационное поле;
- отсутствие поперечных сил и связанных с ними сложных компонент напряжённого состояния;
- сниженное влияние контактных эффектов;
- отсутствие рисков пластических деформаций при обеспечении заданного диапазона деформаций (например, от минус 5000 до 5000 млн⁻¹).

Устройство защищено патентом Российской Федерации № 2621462 от 06.06.2017, патентообладатель - ФГУП «УНИИМ» [26].

2.2 Усовершенствование физико-математической модели процессов измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба

На практике сложная деформация сводится к суперпозиции элементарных видов. Любую произвольную деформацию можно представить как комбинацию двух базовых – растяжения (или

сжатия) и сдвига. Именно поэтому в калибровочных и испытательных приспособлениях для воспроизведения деформации используют нагрузки по схемам растяжение–сжатие и изгиб. Классические кинематические схемы таких установок, позволяющие обеспечить строгое воспроизведение указанных видов деформации, приведены в разделе 1.3.2.

В основу методики измерений положена теория изгиба балки Эйлера – Бернулли [61] для случая чистого изгиба, основанная на следующих гипотезах:

- гипотеза плоских сечений (гипотеза Бернулли) [62]: сечения балки, плоские и нормальные к оси до деформации, остаются после деформации плоскими и нормальными к изогнутой оси балки. Таким образом, деформация сдвига слоёв относительно друг друга не учитывается. Единственным напряжением, рассматриваемым в этой теории, является осевое напряжение (σ_z);

- перемещения и деформации предполагаются малыми (зависимость деформации от напряжения линейна [40]). Балка предполагается нерастяжимой;

- размеры сечения балки предполагаются малыми по сравнению с радиусом кривизны оси балки ($R/h > 10$) [63];

- материал рассматривается как линейно упругий согласно закону Гука.

Принцип измерений основан на свойствах чистого изгиба. Нормальные напряжения и соответственно деформация, являются следствием воздействия только изгибающих моментов силы согласно формуле (2.1), что обуславливает относительный поворот поперечных сечений балки относительно друг друга на один и тот же один угол и изгиб нейтральной оси балки, при постоянном моменте инерции площади сечения относительно нейтральной оси по дуге окружности.

Таким образом, исходя из общей формулы для продольной деформации в произвольной точке сечения зависимость деформации от толщины и радиуса кривизны нейтрального слоя, в соответствии с законом Гука, представлена формулой (2.2) [26]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \cdot 10^6 = \frac{M \cdot y}{J \cdot E} \cdot 10^6 = \frac{6 \cdot M}{b \cdot h^2 \cdot E} \cdot 10^6, \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \frac{h}{2 \cdot \rho} \cdot 10^6, \quad (2.2)$$

где ε – значение деформации, млн^{-1} ;

σ – нормальное механическое напряжение, Н/м^2 ;

E – модуль упругости, Н/м^2 ;

M – изгибающий момент силы, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

J – момент инерции площади сечения относительно нейтральной оси, м^4 ;

b – ширина балки, м ;

h – толщина балки, м;

ρ – радиус кривизны нейтрального слоя, м;

10^6 – множитель для перевода в млн^{-1} .

Так как поверхность балки является эквидистантой нейтральной оси и, соответственно, так же изгибается по дуге окружности, то из (2.2) следует, что деформацию поверхностей балки можно описать зависимостью

$$\varepsilon = \frac{h}{2R \pm h} \cdot 10^6, \quad (2.3)$$

где ε – значение деформации, млн^{-1} ;

h – толщина балки на рабочем участке, мм;

R – радиус кривизны рабочей поверхности балки, мм;

10^6 – множитель для перевода в млн^{-1} .

При этом, знак «+» для расчета деформации поверхности балки, подвергающейся растяжению, знак «-» – сжатию.

Для вывода зависимости величины деформации поверхности балки от радиуса кривизны рабочей поверхности балки, оцениваемого с помощью прогибомера, будем считать, что его база является хордой окружности, по которой изгибается поверхность балки.

Для нейтрального слоя в соответствии с рисунком 2.2:

$$dl = \rho \cdot d\varphi, \quad (2.4)$$

где dl – бесконечно малая длина балки, мм;

ρ – радиус кривизны нейтрального слоя балки, мм;

$d\varphi$ – угол сектора, соответствующий dl .

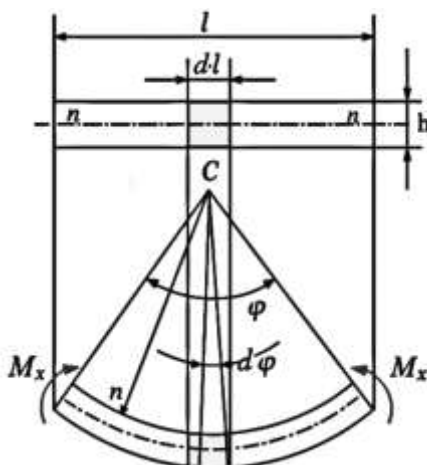


Рисунок 2.2 – Схема деформирования балки при чистом изгибе

Тогда изменение длины Δl на поверхности балки толщиной h , с учетом того, что длина нейтрального слоя остается первоначальной, составит

$$\Delta l = \left(\rho + \frac{h}{2} \right) d\varphi - \rho \cdot d\varphi = \frac{h}{2} d\varphi, \quad (2.5)$$

где h – толщина балки, мм.

Соответственно на основании выбранной меры деформации (глава 1), деформацию поверхности балки ε , мм/мм, можно представить зависимостью

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{dl} = \frac{\frac{h}{2} d\varphi}{\rho \cdot d\varphi} = \frac{h}{2 \cdot \rho}. \quad (2.6)$$

Далее рассмотрим зависимость значения деформации поверхности балки от радиуса её кривизны, оцениваемого с помощью прогибомера (схема измерений радиуса кривизны приведена на рисунке 2.3).

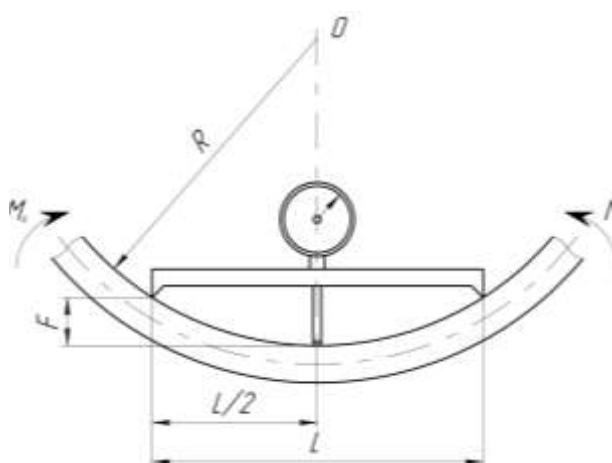


Рисунок 2.3 – Схема измерения радиуса кривизны поверхности балки с помощью прогибомера

Из рисунка 2.3 следует

$$R^2 = (R - F)^2 + \left(\frac{L}{2} \right)^2 = R^2 - 2RF + F^2 + \frac{L^2}{4}, \quad (2.7)$$

где R – радиус кривизны рабочей поверхности балки, измеренной с помощью прогибомера, мм;

F – прогиб балки на базе прогибомера, мм;

L – база прогибомера (длина хорды), мм;

h – толщина балки, мм.

В свою очередь, из (2.7) следует:

$$2RF = F^2 + \frac{L^2}{4}, \quad (2.8)$$

$$R = \frac{F^2 + \frac{L^2}{4}}{2F}, \quad (2.9)$$

Из (2.3) следует, что радиус кривизны нейтрального слоя балки при растяжении (прогибомер установлен на растянутых волокнах) и сжатии равен:

$$\rho_{\text{раст}} = R - \frac{h}{2}, \quad \rho_{\text{сж}} = R + \frac{h}{2}, \quad (2.10)$$

где $\rho_{\text{раст}}, \rho_{\text{сж}}$ - радиус кривизны нейтрального слоя балки при растяжении (прогибомер установлен на растянутых волокнах) и сжатии (прогибомер установлен на сжатых волокнах) соответственно, мм.

При подстановке (2.10) в (2.6) получаем значение деформация балки при растяжении

$$\varepsilon_{\text{раст}} = \frac{h}{2 \cdot \rho} = \frac{h}{2 \cdot \left(R - \frac{h}{2}\right)}, \quad (2.11)$$

где $\varepsilon_{\text{раст}}$ - расчетное значение деформация балки при растяжении (прогибомер установлен на растянутых волокнах), мм/мм.

При подстановке (2.9) в (2.11) получаем значение деформация балки через параметры прогибомера

$$\varepsilon_{\text{раст}} = \frac{h}{2 \cdot \left(\frac{F^2 + L^2}{2F} - \frac{h}{2}\right)} = \frac{h}{2 \cdot \left(\frac{4F^2 + L^2}{8F} - \frac{h}{2}\right)} = \frac{h}{\frac{4F^2 + L^2}{4F} - h} = \frac{h}{\frac{4F^2 + L^2 - 4Fh}{4F}} = \frac{4Fh}{4F^2 + L^2 - 4Fh}. \quad (2.12)$$

При подстановке (2.10) в (2.6) получаем значение деформация балки при сжатии:

$$\varepsilon_{\text{сж}} = \frac{h}{2 \cdot \rho} = -\frac{h}{2 \cdot \left(R + \frac{h}{2}\right)}, \quad (2.13)$$

где $\varepsilon_{\text{сж}}$ - расчетное значение деформация балки при сжатии (прогибомер установлен на сжатых волокнах), мм/мм.

При подстановке (2.9) в (2.13) получаем значение деформация балки через параметры прогибомера

$$\varepsilon_{\text{сж}} = \frac{h}{2 \cdot \left(\frac{F^2 + L^2}{2F} + \frac{h}{2}\right)} = \frac{h}{2 \cdot \left(\frac{4F^2 + L^2}{8F} + \frac{h}{2}\right)} = \frac{4Fh}{4F^2 + L^2 + 4Fh}. \quad (2.14)$$

Таким образом, функциональная зависимость результата измерений деформации $\varepsilon_{\text{расч}}$ от результатов непосредственных измерений прогиба может быть представлена формулой

$$\varepsilon_{\text{расч}} = \frac{4 \cdot h \cdot F}{L^2 + 4F^2 \pm 4hF}, \quad (2.15)$$

где $\varepsilon_{\text{расч}}$ – расчетное значение деформации, мм/мм;

h – толщина балки, мм;

F – изменение прогиба балки на базе прогибомера, мм;

L – база прогибомера, мм.

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

При разработке методики измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба, представляется целесообразным использование дифференциального метода измерений прогиба балки с последующим определением деформации.

Выражение деформации через геометрические параметры изогнутой оси балки (2.2) справедливо при выполнении условий гипотезы Бернулли для реальных условий необходимо учитывать параметры зависимости деформации через механическое напряжение, изгибающий момент и момент инерции сечения (2.2), в частности ширину балки, неравенство изгибающих моментов.

Также необходимо внесение поправок, обусловленных поперечным изгибом балки (Π_2, Π_2') и смещением точки касания балки и опоры прогибомера (Π_1).

Прогибомер состоит из корпуса с устройством для установки преобразователя линейных перемещений и трех опор для установки на балку. При изгибе балка деформируется как в продольном, так и в поперечном направлении. Растяжение верхних волокон балки в осевом направлении сопровождается уменьшением их поперечных размеров и наоборот при сжатии верхних волокон балки в осевом направлении верхние волокна в поперечном направлении растягиваются, например, на рисунке 2.4 ось X направлена вдоль поперечного сечения, верхнее изображение соответствует ненапряженному состоянию балки, а нижний соответствует изгибу балки при котором верхние волокна сжимаются. Таким образом, парные опоры прогибомера, при изгибе балки перемещаются относительно центрального сечения в зависимости от знака деформации.

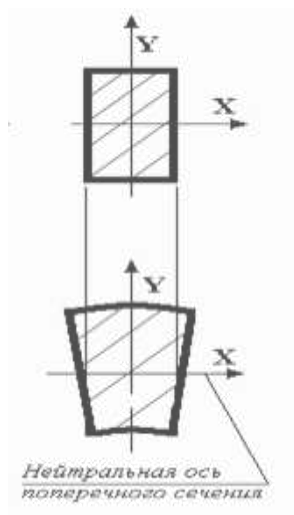


Рисунок 2.4 – Поперечный изгиб балки при воспроизведении деформации в продольном направлении

Поправка, обусловленная смещением парных опор прогибомера по причине поперечного изгиба балки [52]:

$$\Pi_1 = \frac{t}{2}, \quad (2.16)$$

$$t = \frac{\mu \cdot \bar{l}_{\Pi}^2 \cdot \varepsilon_H}{4 \cdot h} \cdot 10^{-6}, \quad (2.17)$$

- где Π_1 – поправка к показаниям прогибомера, мм;
 t – перемещение парных опор относительно третьей опоры в вертикальном направлении, 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 [52]:

$$\Pi_2 = \left[\sqrt{(R_{\text{ном}} + r)^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} - \sqrt{R_{\text{ном}}^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} - r \right], \quad (2.18)$$

$$\Pi_2' = - \left[\sqrt{R_{\text{НОМ}}^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} - \sqrt{(R_{\text{НОМ}} - r)^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} - r \right], \quad (2.19)$$

$$R_{\text{НОМ}} = \frac{L^2 + 4f_{\text{НОМ}}^2}{8f_{\text{НОМ}}}, \quad (2.20)$$

- где $R_{\text{НОМ}}$ – радиус кривизны рабочей поверхности балки нагружения, 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.

Таким образом, предлагаемая модель измерений деформации поверхности балки описывается следующим выражением:

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot \bar{h} \cdot (\bar{f} + \Pi_1 + \Pi_2(\Pi_2'))}{L^2 + 4(\bar{f} + \Pi_1 + \Pi_2(\Pi_2'))^2 \pm 4\bar{h}(\bar{f} + \Pi_1 + \Pi_2(\Pi_2'))} \cdot 10^6, \quad (2.21)$$

$$\text{где } \bar{f} = l_{\text{кнд}} + \bar{f}_d - \bar{f}_0, \quad (2.22)$$

- ε – деформация, млн⁻¹;
 \bar{h} – среднее арифметическое значение толщины балки, мм;
 \bar{f} – среднее арифметическое значение изменения прогиба деформированной балки по показаниям прогибомера, 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;
 $l_{\text{кнд}}$ – 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.

Обоснованная улучшенная физико–математическая модель измерений деформации поверхности балки подтверждает правильность выбора схемы нагружения – «чистый изгиб», позволяет установить количественные зависимости между деформацией поверхности балки, ее геометрическими параметрами, физико-механическими и другими значимыми влияющими факторами с учетом чувствительности измерительной цепи и построить бюджет неопределённости методики целевых метрологических и технических характеристик, которые необходимо обосновать для воспроизведения единицы деформации.

2.3 Обоснование основных целевых показателей методики измерений воспроизводимой деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба

Представляется целесообразным установить следующие целевые показатели методики, на основании которых провести оценку соответствия разработанной методики измерений назначению:

- порог чувствительности измерений;
- диапазон измерений;
- достоверность модели, оцениваемая по метрологическим характеристикам, расчетного значения деформации через измеренные значения прогиба и геометрических характеристик балки согласно установленной функциональной зависимости;
- устойчивость модели;
- число параллельных измерений в условиях повторяемости.

Выбор необходимых целевых параметров произведен с учетом наличия априорной информации о степени разработанности метода, положенного в основу методики измерений, степени его внедрения в практику стандартизации [52].

Порог чувствительности

Порог чувствительности позволяет оценить потенциальные возможности методики измерений, поскольку при малых значениях измеряемой величины усиливается влияние неопределённости измерений прогиба, первоначальной неплоскостности балки, непараллельности граней балки и неопределённости измерений геометрических параметров балки и шумов, обусловленных контактными измерениями, вследствие чего значения показателя точности (прецизионности) в относительных единицах с уменьшением значения измеряемой

величины постепенно увеличиваются, достигая величины сопоставимой с результатом измерений. Для инструментальных методов в качестве величины порога чувствительности обычно принимают отношение сигнал/шум равное 2:1.

Диапазон измерений деформации

Диапазон измерений определяется (устанавливается) для каждого материала балок с учетом ограничивающих условий, предусмотренных моделью, лежащей в основе методики измерений, а именно:

- нагружение производится в зоне упругих деформаций, определяемых в зависимости от материала балки;
- радиус кривизны оси балки при деформации остается большим по сравнению с размерами сечения балки ($R/h > 10$);
- наибольшие пределы деформации устанавливаются из соотношения (размер измеряемой величины) / (неопределенность измерений) не более 100/1.

Для балки из инструментальной стали толщиной 5 мм верхний предел измерений ограничен 3000 млн^{-1} , для балки из высокопрочного деформируемого алюминиевого сплава системы Al-Zn-Mg-Cu B95 толщиной 7 мм 5000 млн^{-1} .

Достоверность модели и функциональная зависимость методики

Достоверность модели процессов измерений может быть подтверждена при отношении ширины деформируемого образца его толщине менее 20/1, длины образца к его толщине более 20/1, что позволяет отнести образец к балке и утверждать, что изгиб происходит при малых кривизнах, и гипотеза неизменности нормали (Кирхгофа) [64] справедлива.

Корректность функциональной зависимости расчетного значения деформации от измеренного значения прогиба и геометрических характеристик балки проверяется сопоставлением профиля деформированной балки с идеальной дугой окружности на рабочем участке и оценкой составляющей погрешности измерений прогиба, обусловленной неоднородностью деформационного поля, в том числе отклонением профиля деформированной балки от дуги окружности [52], значение которой не должно превышать 0,11 % от величины измеряемой деформации.

Балки должны обладать следующими свойствами: совершенно упругие, изотропные, однородные. Балка – сплошное тело (применима гипотеза сплошности) прямоугольного постоянного сечения. Толщина балки от 3,9 до 10 мм, ширина от 29 до 30 мм, номинальная длина балки 500 мм.

Число параллельных измерений

Процедура измерений должна предусматривать получение окончательного результата измерений деформации на основе результатов трех параллельных измерений прогиба на различных участках балки. При необходимости количество параллельных измерений увеличивается.

Количество параллельных измерений определяется исходя из измерений в статическом режиме и минимизации температурных эффектов.

Проверку приемлемости результатов измерений, полученных в условиях повторяемости, проводить согласно методики, изложенной в пункте 5 ГОСТ Р ИСО 5725-6-2022 [65] для уровня вероятности 95 %, числа единичных измерений в базовом элементе (в каждой точке) $n = 3$ и индекса $p = 3$, в качестве окончательного принять среднее арифметическое значение результатов измерений по всем точкам. При необходимости получить еще два результата измерений и после проверки размаха результатов пяти измерений соответствия критическому диапазону для уровня вероятности 95 % в качестве окончательного результата принять среднее арифметическое значение результатов пяти измерений. В случае несоответствия необходимо выяснить и устранить причины.

Устойчивость методики

Проверка устойчивости методики измерений, способности не подвергаться воздействию не выходящих за установленные пределы отклонений, должна быть предусмотрена для следующих факторов:

- а) температура окружающего воздуха и её девиация во время измерений
- б) стабильность поддержания нагрузки;
- в) разность приложенных изгибающих моментов.

Для параметров а) проверка устойчивости расчетным способом, для параметров б), в) - методом факторного эксперимента.

Также методом факторного эксперимента необходимо предусмотреть оценку устойчивости методики измерений к отклонениям параметров, характеризующих чистый изгиб.

Значения целевых показателей методики измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Целевые показатели методики измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба

Целевые показатели методики	Значение
Порог чувствительности;	Определение в зависимости от полученных значений погрешности результата измерений
Диапазон измерений	от минус 5000 до 5000 млн ⁻¹
Функциональная зависимость методики и адекватность модели;	Нормирование пределов составляющей погрешности измерений прогиба, обусловленной неоднородностью деформационного поля, в том числе отклонением профиля деформированной балки от дуги окружности. Балка – сплошное тело прямоугольного постоянного сечения. Толщина балки от 3,9 до 10 мм, ширина от 29 до 30 мм, номинальная длина балки 500 мм.
Число параллельных измерений	3 (5)
Устойчивость	Оценка влияния параметров, установлены их допускаемые значения, определены методы контроля и (при необходимости) компенсации

Установленные значения целевых показателей методики измерений позволяют проанализировать процесс измерения деформации и воспроизведения её единицы, а также установить граничные значения влияющих факторов, оказывающих значимое влияние на результаты измерений, а также определить их допустимые границы.

2.4 Исследование влияющих факторов при измерении деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба

Выше рассмотрена физико-математическая модель измерений, определяющая соотношения между прогибом балки, её геометрическими параметрами и рассчитываемой деформацией. Однако в реальных условиях на результат оказывают воздействие широкий спектр влияющих факторов – от неоднородности материала до особенностей конструктивного исполнения. На диаграмме «причина-следствие» (рисунок 2.5) сгруппированы основные причины возникновения неопределённости результата измерений деформации.

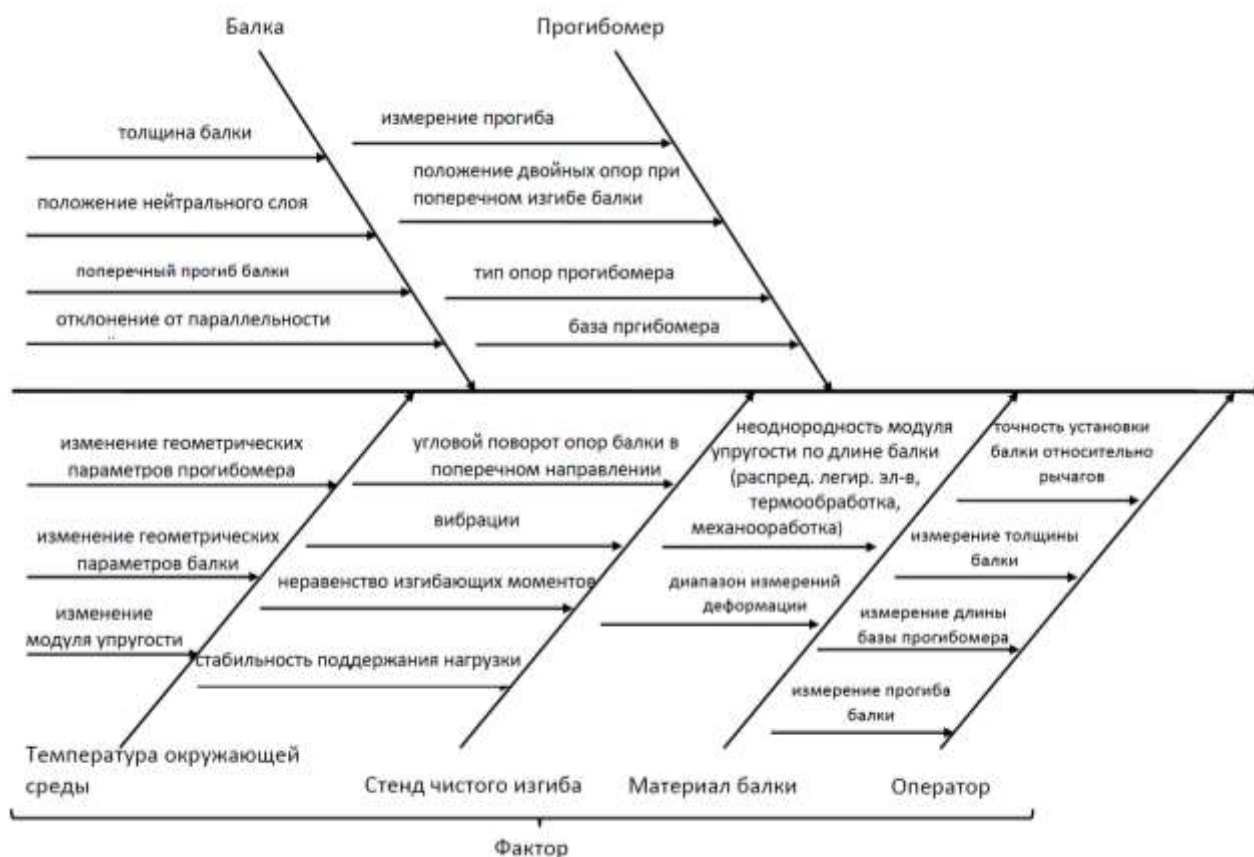


Рисунок 2.5 – Диаграмма «причина-следствие»

При оценке неопределённости результата измерений деформации должны быть учтены также факторы, не включённые непосредственно в уравнение измерения, но оказывающие влияние на результат измерений деформации.

Влияющие факторы, обусловленные применением балок из различных материалов, подлежащие изучению при разработке методики измерений:

- изменение температуры окружающего воздуха при измерении;
- поперечный изгиб.

Влияющие факторы, обусловленные применением стенда чистого изгиба, подлежащие изучению при разработке методики измерений:

- нестабильность поддержания нагрузки;
- разность приложенных изгибающих моментов.

Далее последовательно рассмотрим каждый из влияющих факторов, требующих установления допустимых значений (граничных условий), контроля и (при необходимости) компенсации в процессе измерений (геометрию балки и её первоначальную неплоскостность, температурные влияния на размеры и на модуль упругости, смещение нейтрального слоя, стабильность приложенной нагрузки и неоднородность деформационного поля).

Расчет и установление геометрических параметров балки

Критерии при выборе размеров балки и конструкции установки [52]:

1) возможность изготовления балок из различных материалов (цветные сплавы, полимерные материалы) для проверки применимости разработанной методики и выявления особенностей деформирования;

2) возможность изготовления дополнительных балок для исследований средств измерений деформации, которые крепятся к балке с частичным разрушением (сварка) или формируются непосредственно на материале балки в заводских условиях.

Особенности применения балок толщиной до 15 мм:

- повышенные требования к геометрическим параметрам при изготовлении и, соответственно необходимость использования прецизионных СИ (оптиметр, микроскоп);
- ограничение массы навесного оборудования;
- необходимость использования перчаток при выполнении измерений для исключения локального нагрева балки.

С целью обеспечения наивысшей точности методики измерений на каждом этапе измерений используются средства измерений с соответствующими показателями точности, так для уменьшения вклада в стандартную неопределённость типа В для определения ширины и толщины балки используются оптиметр электронный горизонтальный ИКГ-3э с диапазоном измерений от 0 до 500 мм и пределами допускаемой абсолютной погрешности $\pm 0,3$ мкм, и прибор для поверки концевых мер длины «Микрон-04» с диапазоном измерений от 0 до 1000 мкм, пределами допускаемой абсолютной погрешности от $\pm 0,06$ до ± 6 мкм.

Максимальные размеры поперечного сечения и длина балки ограничиваются конструкцией стенда: длина балки не менее 500 мм, ширина не более 30 мм, толщина не более 10 мм.

Помимо размеров балки необходимо установить допускаемую непараллельность граней. Деформация в соответствии с уравнением измерений определяется толщиной балки и радиусом кривизны. Точность определения радиуса кривизны определяется неопределённостью измерений с помощью прибора для поверки концевых мер длины «Микрон-04» [66]. Толщина балки определяет диапазон измерений прогиба и выбор соответствующего средства измерений. Так на рисунке 2.6 показана зависимость воспроизводимого прогиба для одной и той же деформации 3000 млн^{-1} в зависимости от толщины балки.

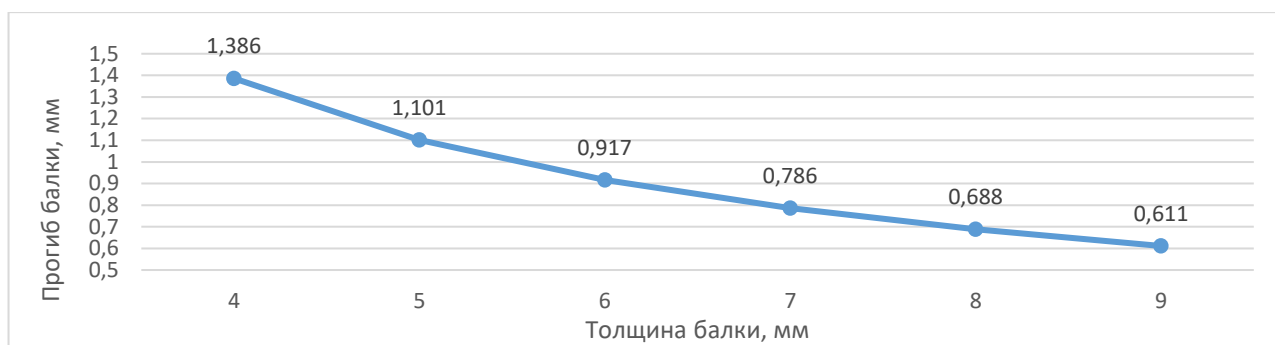
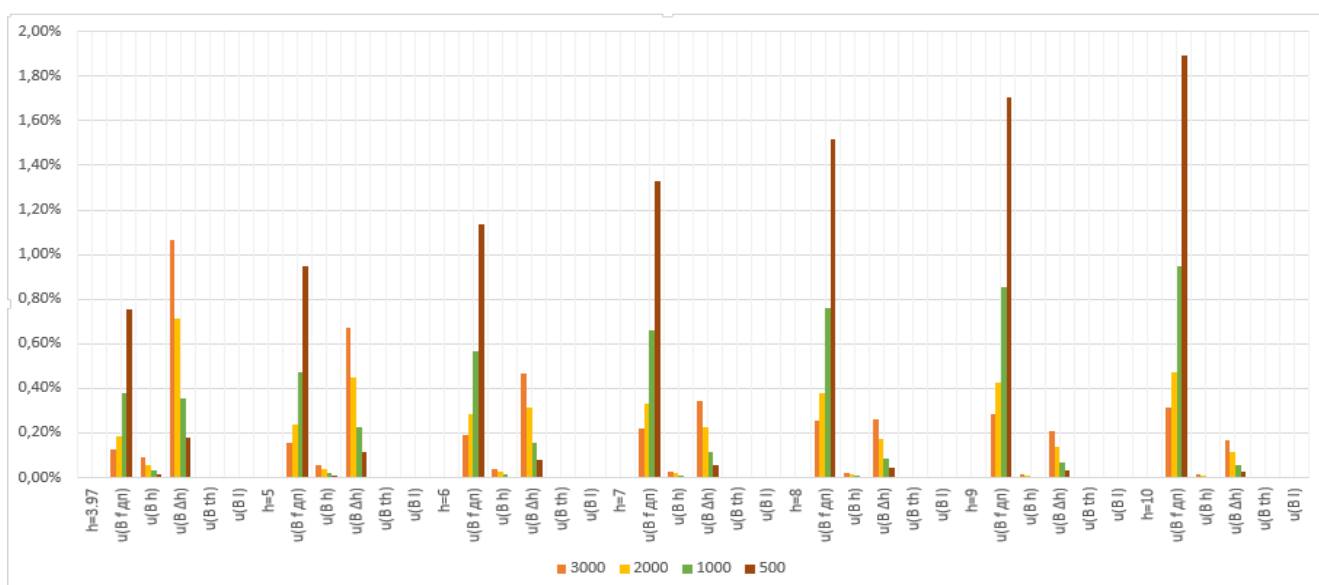


Рисунок 2.6 – Значение прогиба балки в зависимости от толщины балки для воспроизведения деформации 3000 млн^{-1}

С другой стороны, уменьшение толщины балки снижает устойчивость к таким влияющим факторам, как непараллельность граней, паразитные скручивающие моменты силы и исходная неплоскостность. Соотношение вкладов неопределённости типа В (обусловленные погрешностями измерения прогиба балки, толщины балки и базы прогиба, а также непараллельностью граней балки и изменением температуры), в зависимости от диапазона измерений деформации и толщины балки, приведены на рисунке 2.7.



$u(B f \Delta n)$ – неопределенность, обусловленная погрешностью измерения прогиба балки;
 $u(B h)$ – неопределенность, обусловленная погрешностью измерения толщины балки;
 $u(B \Delta h)$ – неопределенность, обусловленная непараллельностью граней балки;
 $u(B th)$ – неопределенность, обусловленная изменением температуры;
 $u(B l)$ – неопределенность, обусловленная погрешностью измерения базы прогиба

Рисунок 2.7 – Значение вкладов неопределённости, определяемой по типу В (% от измеряемой деформации) в зависимости от толщины балки при воспроизведении деформации от 500 до 3000 млн^{-1}

Обеспечение измерения прогиба балки в диапазоне от 0,01 до 1 мм с разрешением и погрешностью от 0,5 до 1 мкм реализуется дифференциальным методом измерений. При таком подходе вместе с опорными концевыми плоскопараллельными мерами длины допускается

использование индикатора прогибомера в узком диапазоне измерений от 0 до 20 мкм, в котором пределы допускаемой погрешности составляют $\pm 0,06$ мкм. Выбор дифференциального метода накладывает дополнительные требования, в частности к однородности модуля упругости вдоль балки, первоначальной неплоскостности и взаимной параллельности рабочих и боковых граней.

Так как неоднородность модуля упругости балки не поддается предварительной оценке и, по сути является результатом определения деформации, то несоответствие балки по данному признаку устанавливается по факту невозможности проведения измерений деформации с установленными в методике показателями точности (результат определения прогиба балки будет находиться вне диапазона измерений датчика прогибомера).

Деформация определяется изгибающими моментами, моментом инерции площади сечения относительно нейтральной оси и толщиной балки (2.1). Непараллельность граней балки является причиной изменения момента инерции площади сечения относительно нейтральной оси по длине балки и, соответственно, является также одним из источников неравномерности деформации в рабочей зоне балки. Допускаемое значение непараллельности рабочих и боковых граней балки на значение прогиба нормировано таким образом, чтобы изменение прогиба по длине балки не превышало $1/3$ диапазона датчика прогибомера. Непараллельность рабочих и боковых граней балки не должна превышать 6 мкм, является технически реализуемым параметром при изготовлении балки [52].

Установление допускаемой первоначальной неплоскостности балки

Характер распределения напряжений для случая чистого изгиба балки постоянного сечения определяется с учетом допущения того, что поперечные сечения балки первоначально плоские и нормальные к оси балки, остаются такими же при изгибе балки [40]. Т.е. ось балки – линия, соединяющая центры тяжести поперечных сечений, представляет собой плоскую кривую и каждое поперечное сечение имеет ось симметрии, лежащую в плоскости этой кривой. Балка подвергается действию сил, лежащих в указанной плоскости симметрии и изгиб имеет место в этой же плоскости [26], что гарантирует совпадение главных центральных осей инерции с осями симметрии сечения и исключение косоугольного изгиба при нагрузке в плоскости симметрии (все точки оси перемещаются строго в плоскости нагружения) и сохранение симметрии деформации – нейтральный слой остаётся в исходной плоскости кривизны. Для установления влияния первоначальной неплоскостности балки на соблюдение условий чистого изгиба и результат измерений деформации допустим несовпадение нейтральной оси nn и линии, соединяющей центры тяжести поперечных сечений в следствии изначальной кривизны.

Пусть ab и cd будут два бесконечно близких поперечных сечения бруса и пусть $d\varphi$ угол между ними до изгиба. Вследствие изгиба поперечное сечение cd поворачивается относительно ab на

малый угол $\Delta d\varphi$ (рисунок 2.8). Обозначая через y расстояние продольного сечения от оси, проходящей через центр тяжести поперечного сечения и перпендикулярной плоскости изгиба, принимая направление к центру кривизны оси бруса за положительное и обозначая через e расстояние нейтральной оси nn от центра тяжести c , удлинение какого-либо волокна при изгибе равно $(y - e)\Delta d\varphi$, то деформация может быть представлена формулой [26, 52]

$$\varepsilon = \frac{(y - e)\Delta d\varphi}{(r - y)d\varphi}, \quad (2.23)$$

где r – радиус кривизны оси балки вследствие изгиба, мм;

$\Delta d\varphi$ – изменение угла между поперечными сечениями балки вследствие изгиба, мм/мм;

y – расстояние поверхности балки от оси, проходящей через центр тяжести поперечного сечения и перпендикулярной плоскости изгиба, мм;

e – расстояние нейтральной оси nn от центра тяжести c , мм;

ε – деформация, мм/мм.

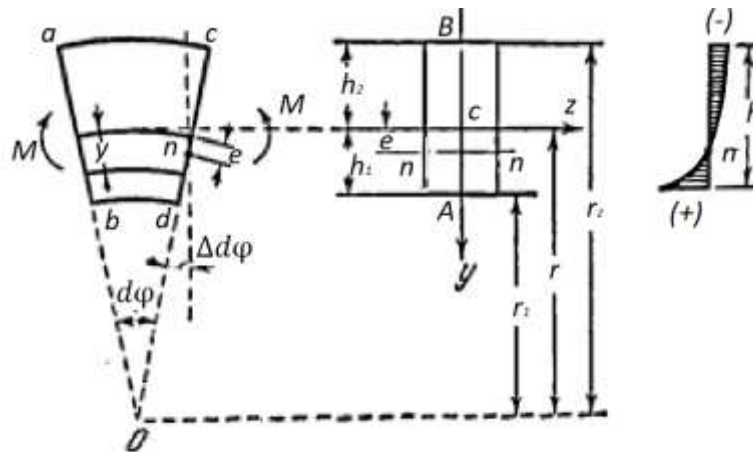


Рисунок 2.8 – Смещение нейтрального слоя при первоначальной неплоскостности

Предполагая, что между продольными волокнами отсутствует боковое давление, можно из (2.1) и (2.23) выразить нормальное к поперечному сечению напряжение σ на расстоянии y от центральной оси

$$\sigma = \frac{E(y - e)\Delta d\varphi}{(r - y)d\varphi}, \quad (2.24)$$

где E – модуль упругости, Н/м².

Таким образом, распределение напряжений в балке с первоначальной неплоскостностью происходит не по линейному закону, а по гиперболическому, а т.к. сумма нормальных усилий, распределенных по поперечному сечению, равняется нулю, в случае чистого изгиба можно заключить, что нейтральная ось перемещается от центра тяжести по направлению к центру

кривизны оси балки, что является нарушением условий чистого изгиба и причиной возникновения дополнительной погрешности (неопределённости измерений деформации). Для оценки дополнительной погрешности (неопределённости измерений деформации) необходимо определить зависимость расстояния нейтральной оси от линии, соединяющей центры тяжести, e , от радиуса первоначальной кривизны балки, для балки прямоугольного сечения смещение нейтральной оси можно определить из уравнений статики [26]:

$$\int_F \sigma dF = \frac{E \Delta d\varphi}{d\varphi} \int_F \frac{(y - e)}{(r - y)} dF = 0; \quad (2.25)$$

$$\text{где} \quad \int_F \frac{(y - e)}{(r - y)} dF = \int_F \frac{y dF}{r - y} - e \int_F \frac{1}{(r - y)} dF = 0; \quad (2.26)$$

Коэффициент приведенной площади, mF

$$mF = \int_F \frac{y dF}{r - y} = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{by \cdot y}{r - y} dy = -bh - rb \left(\ln \left(r - \frac{h}{2} \right) - \ln \left(r + \frac{h}{2} \right) \right); \quad (2.27)$$

Второй член уравнения (2.21) преобразуем и выразим через mF (2.22):

$$\int_F \frac{1}{(r - y)} dF = \int_F \frac{(y + r - y)}{r(r - y)} dF = \int_F \frac{y}{r(r - y)} dF + \int_F \frac{1}{r} dF = (m + 1) \frac{F}{r}; \quad (2.28)$$

$$e = r \frac{m}{m + 1}, \quad (2.29)$$

где m – безразмерный коэффициент, определяемый формой поперечного сечения.

Таким образом, дополнительная погрешность измерений деформации, обусловленная исходной неплоскостью определяют из выражений (2.21) и (2.30)

$$\Delta_{кр} = \frac{(y - e)}{(r - y)} \varepsilon - \varepsilon = \varepsilon \cdot \left(\frac{\left(\frac{h}{2} - r \frac{m}{m + 1} \right)}{r - \frac{h}{2}} - 1 \right) = \frac{-2\varepsilon}{m + 1} \left(m + \frac{h - r}{h - 2r} \right). \quad (2.30)$$

Очевидно, что смещение нейтрального слоя зависит от геометрических размеров поперечного сечения (2.30) и имеет линейную зависимость от измеряемой деформации. Результаты расчета влияния первоначальной кривизны балки на результат измерений деформации для стальных балок различной толщины при максимальной деформации 3000 млн^{-1} по формуле (2.30) приведены в таблице А.1 и на графике 2.9.

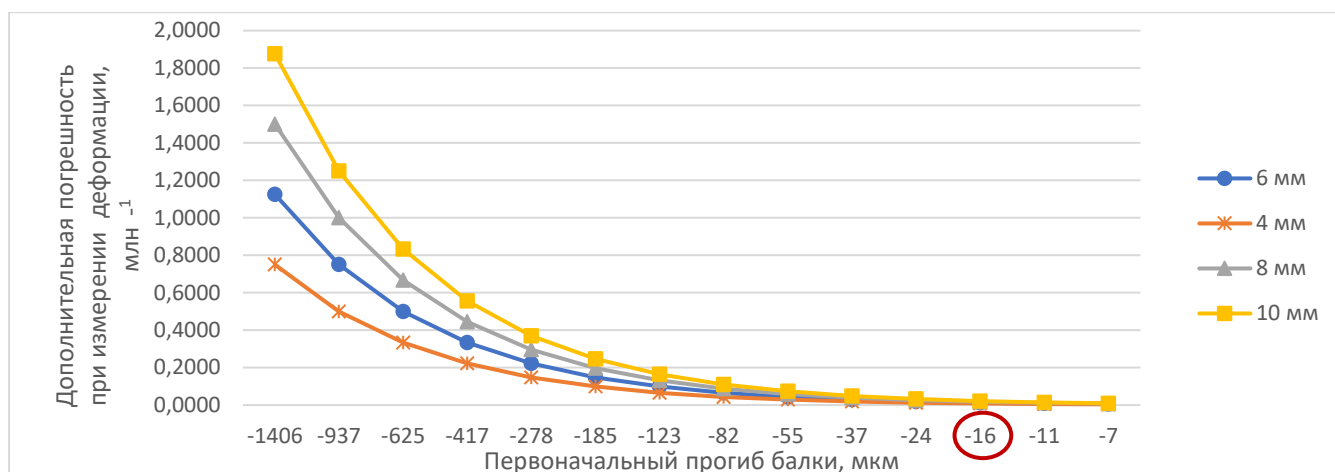


Рисунок 2.9 - Дополнительная погрешность при измерении деформации для балок различной толщины в зависимости от исходной неплоскостности балки для деформации 3000 млн^{-1}

Таким образом, первоначальная неплоскостность балки исходя из результатов измерений не должна превышать 16 мкм (дополнительная погрешность при измерении деформации в таком случае не превысит $0,036 \text{ млн}^{-1}$), дополнительно этот параметр ограничен измерительными возможностями датчика прогибомера до 6 мкм, что составляет 1/3 диапазона датчика прогибомера – и является технически реализуемым параметром при изготовлении балки.

Установление допустимого диапазона температуры окружающего воздуха при измерении

Одним из значимых источников погрешности (неопределённости) при измерении деформаций является изменение температуры окружающей среды, приводящее к нагреву или охлаждению балки в процессе испытаний. Это вызывает дополнительные температурные деформации, которые накладываются на искомые механические, что затрудняет их разделение и вносит неопределённость в результаты измерений. Основные проблемы, возникающие из-за температурных изменений:

- невозможность разделения механической и температурной деформаций;
- изменение модуля упругости (для многих материалов он зависит от температуры, что дополнительно искажает связь между напряжением и деформацией);
- термоупругий эффект (эффект Томсона) [67] – проявляется в возникновении дополнительных напряжений и деформаций в материале при наличии температурных градиентов. Этот эффект обусловлен зависимостью модуля упругости и температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) от температуры, а также локальным температурным расширением/сжатием при неравномерном нагреве.

Поскольку температурная деформация может быть сопоставима по величине с механической, её влияние необходимо учесть и исключать насколько возможно. Относительное изменение объёма или линейных размеров балки с изменением температуры характеризуется ТКЛР, которым определяется размер соответствующих вкладов в неопределённость измерений деформации.

Стандартная неопределённость измерений геометрических параметров балки, обусловленная изменением температуры, рассчитывалась по формуле [10]

$$u_{th} = \frac{\alpha \cdot \Delta t \cdot h}{2\sqrt{3}}, \quad (2.31)$$

где u_{th} – стандартная неопределённость измерений геометрических размеров балки при изменении температуры, мм;

α – температурный коэффициент линейного расширения материала балки, °C⁻¹;

Δt – изменение температуры за время измерений, °C;

h – толщина балки, мм.

Коэффициент влияния неопределённости измерений геометрических параметров определяется как частная производная уравнения (2.3)

$$C_2 = \frac{d\varepsilon}{dh} = \frac{2R}{(2R \pm \bar{h})^2}, \quad (2.32)$$

где C_2 – коэффициент влияния неопределённости измерений толщины балки, 1/мм;

\bar{h} – толщина балки на рабочем участке балки, мм;

R – радиус кривизны рабочей поверхности балки, мм.

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

Таким образом, стандартная неопределённость результата измерений деформации типа В, обусловленная изменением геометрических размеров балки при изменении температуры u_{Bth} , рассчитывается исходя из (2.31) и (2.32) в соответствии с [10] может быть рассчитана по формуле

$$u_{Bth} = |C_2| \cdot u_{th} = \left| \frac{\bar{h} + (2R \pm h)}{(2R_i \pm \bar{h})^2} \right| \cdot \frac{\alpha \cdot \Delta t \cdot h}{2\sqrt{3}}, \quad (2.33)$$

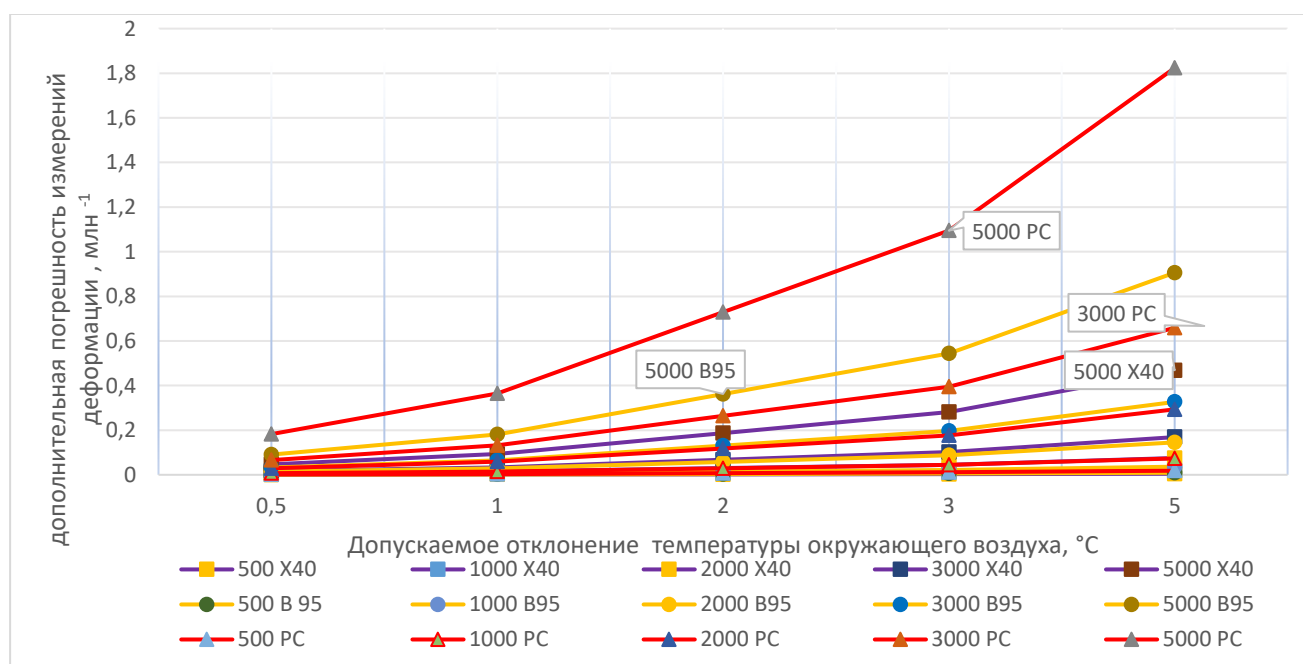
Дополнительная погрешность измерений деформации, обусловленная изменением температуры окружающего воздуха при измерении, принимается равной соответствующей неопределённости результата измерений деформации типа В, u_{Bth}

$$\Delta_{th} = 1,96 \cdot u_{Bth}. \quad (2.34)$$

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

Выполненные расчеты в соответствии с (2.31) – (2.34) позволили провести оценку дополнительной погрешности, 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 40X – $12\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, сплава алюминия $22\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ и поликарбоната $70\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (результаты приведены на рисунке 2.10 и таблице А.2).

Выполненные расчеты показывают, что ограничение диапазона изменения температуры окружающего воздуха в диапазоне $\pm 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и непосредственно во время измерений деформации не более $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ можно считать приемлемым для металлических балок и балок из материалов со значением ТКЛР не более $70\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. При этом значения дополнительной погрешности (стандартной неопределённости), обусловленные изменением температуры окружающего воздуха при измерении деформации не превысят $0,0072\%$ от измеряемой деформации.



500X40 (1000X40, 2000X40, 3000X40, 5000X40) – значение деформации 500 (1000, 2000, 3000, 5000) млн⁻¹ для балки из стали марки 40X; 500B95 (1000B95, 2000B95, 3000B95, 5000B95) – значение деформации 500 (1000, 2000, 3000, 5000) млн⁻¹ для балки из сплава алюминия марки B95; 500PC (1000PC, 2000PC, 3000PC, 5000PC) – значение деформации 500 (1000, 2000, 3000, 5000) млн⁻¹ для балки из поликарбоната

Рисунок 2.10 – Дополнительная погрешность результата измерений деформации в зависимости от материала балки и диапазона изменения температуры для балки толщиной 9 мм.

Установление допускаемых параметров стабильности поддержания нагрузки стендом чистого изгиба и времени, затрачиваемого на измерение

При изгибе внутри тела балки возникают напряжения, которые обуславливают наличие реакций опор в узлах приложения изгибающих моментов и чем большая деформация воспроизводится, тем большую нагрузку испытывают конструктивные элементы стенда, в том числе элементы привода. Недостаточная жесткость стенда может быть причиной ошибочного вывода о ползучести балки, который свидетельствует о состоянии материала в состоянии текучести (пластическом деформировании). 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 [68]), стенд должен обеспечить стабильность поддержания нагрузки не менее 5 часов. Стабильность поддержания нагрузки, оценивалась по изменению показаний прогибомера составила не более 0,1 мкм, что соответствует деформации $0,2 \text{ млн}^{-1}$. Полученные результаты проверки стабильности поддержания нагрузки стендом чистого изгиба приведены в [52] и таблице А.3. Сделан вывод об отсутствии необходимости включения в конструкцию стенда стабилизирующих механизмов, использования математического аппарата, для компенсации тренда деформации, и расчета составляющей погрешности (неопределённости), обусловленной жесткостью конструкции. Для металлических балок проведенные исследования подтверждают стабильность поддержания нагрузки стендом чистого изгиба не менее 5 часов [52].

Установление допускаемых параметров неоднородности деформационного поля

На этапе разработки установки воспроизведения деформации необходимо обеспечить равномерность значений деформации в пределах рабочей зоны (деформационного поля). Равномерность деформационного поля – важная характеристика эталонной установки.

Результат измерений деформации для конкретного сечения распространяется на участок чистого изгиба протяженностью не менее 12,5 мм по обе стороны от выбранного сечения вдоль продольной оси балки (рабочий участок балки), что обусловлено, в том числе, длиной базы тензорезисторов (по ГОСТ 21616-91 [68] ряд баз тензорезисторов следующий: 0,3; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0; 10,0; 15,0; 20,0; 50,0; 100,0; 200,0 мм). Протяженность участка установлена исходя из наиболее востребованных для натуральных испытаний и пригодных для создания компараторов тензорезисторов (база до 20 мм).

Основными причинами неравномерности деформационного поля являются:

а) *силы контактного трения при изготовлении балки.* Данная причина неравномерности деформационного поля связана с процессом изготовления градуировочной балки и неизбежными деформациями при различных методах обработки (давлением, листовой и объемной штамповки и др.) Влияние пластической деформации на циклическую прочность осуществляется как на микроуровне, при котором она изменяет плотность и структуру дефектов кристаллической решетки, так и на макроуровне, когда в силу неравномерности деформации в объеме штампуемой заготовки возникают и остаются остаточные макронапряжения. Кроме того, контакт инструмента с заготовкой изменяет характер поверхностных микронеровностей и состояние [69];

б) *неоднородность структуры материала.* При деформировании поликристаллических материалов вследствие структурной неоднородности, обусловленной различной ориентацией отдельных зерен и технологической обработкой, возникает неоднородность деформации поликристалла, независимо от вида нагружения характер неоднородности при статическом и длительном статическом нагружениях сохраняется, а внутриверенная неоднородность порождает неравномерность макродеформации на отдельных малых участках деформируемого образца [70];

в) *наличие остаточных напряжений в балке.* Остаточные напряжения являются следствием механической обработки или пластической деформации в одной какой-либо части тела, холодной обработки материала прокаткой или протяжкой, нагрева при неравномерном охлаждении, закаливании [63];

г) *геометрические параметры балки.* Непараллельность и неплоскостность граней градуировочной балки являются источником различных значений моментов инерции в сечениях балки по длине балки и как следствие воспроизведение неравномерного деформационного поля. Составляющая погрешности, обусловленная непараллельностью и неплоскостностью граней градуировочной балки рассмотрена в 2.3;

д) *схема приложения нагрузки (изгиб, кручение).* Наличие непараллельностей и неплоскостности опорных поверхностей, траекторий движения рычагов, несогласованность их движения является причиной возникновения сложного вида деформации вместо ожидаемого и, как следствие, несоответствие теоретического уравнения деформации практическому результату.

При практическом исследовании деформации рабочего участка балки [52] при условии обеспечения требований к геометрическим параметрам балки наиболее существенное влияние оказывает разность изгибающих моментов на концах балки, возникающая при асимметричной

установке подошв в кулаках установки воспроизведения деформации. Отсутствие жесткой фиксации подошв в кулаках установки воспроизведения деформации минимизирует возникновение продольных сил в балке и тем самым практически исключает составляющую деформации, обусловленную растяжением–сжатием. В то же время их произвольное смещение относительно оси станда приводит к разности изгибающих моментов на концах балки и следовательно, вызывает монотонное изменение прогиба и деформации по длине (2.1), тогда как многие остальные факторы носят либо локальный характер, либо создают независимый от координаты вклад, который частично взаимно компенсируется при усреднении по участку. Изгибающий момент можно представить в виде

$$M_{\Delta l} \approx M_l + k_M \Delta l, \quad (2.35)$$

и тогда для локального участка длиной Δl приращение деформации задаётся также линейным законом:

$$\Delta \varepsilon_{\Delta l} = \frac{6}{b \cdot h^2 \cdot E} \cdot 10^6 \cdot k_M \Delta l, \quad (2.36)$$

$$\Delta \varepsilon_{\Delta l} = k_\varepsilon \Delta l, \quad (2.37)$$

где E – модуль упругости, Н/м²;

$M_{\Delta l}$ – изгибающий момент силы в сечении на расстоянии Δl от принятого за нулевое, Н·м;

b – ширина балки, м;

h – толщина балки, м;

10^6 – множитель для перевода в млн⁻¹;

M_l – изгибающий момент силы в сечении, принятом за нулевое (левая опора балки), Н·м;

k_M – коэффициент, характеризующий изменение изгибающего момента силы по длине балки, Н·м/м;

Δl – протяженность локального участка, на который распространяется результат измерений деформации в сечении, м;

$\Delta \varepsilon_{\Delta l}$ – погрешность измерений деформации, обусловленной разностью изгибающих моментов для локального участка, млн⁻¹;

k_ε – коэффициент, характеризующий изменение значений деформации по длине балки, 1/м.

Так как изменение деформации пропорционально изменению величины прогиба балки, то в соответствии с (2.15), составляющую погрешности (неопределённости), обусловленной разностью изгибающих моментов возможно оценить через установление зависимости значений прогиба балки от координаты сечения. Из (2.37) следует что зависимость погрешности

измерений деформации, обусловленной разностью изгибающих моментов линейна и стандартное отклонение результатов измерений прогиба, обусловленного разностью изгибающих моментов, можно представить зависимостью

$$s_{\Delta f} = \frac{(f_n - f_k)}{m \cdot 2 \cdot \sqrt{3}} \quad (2.38)$$

где $s_{\Delta f}$ – стандартное отклонение результатов измерений прогиба, мкм;

f_n, f_k – прогиб балки в первом и последнем сечении рабочего участка балки, мкм;

m – количество локальных рабочих участков, на которые разделена балки и на которые распространяется результат измерений деформации.

В [52] описаны результаты экспериментальных исследований, которые показали зависимость значений прогиба балки в рабочей зоне от положения подошв относительно кулаков. Без ручной настройки разность прогиба балки на краях рабочего участка может достигать 10 мкм, следовательно, составляющая погрешности деформации, обусловленная разностью значений изгибающих моментов может достигать, в зависимости от толщины балки, до $2,2 \cdot 10^{-4}$, что составляет от 0,04 % до 2,2 %, в зависимости от диапазона измерений деформации. Наибольший вклад наблюдается для балок толщиной 10 мм. Регулировка опор перед началом измерений позволяет установить разность прогиба при нагружении до 1 мкм. Экспериментальные исследования влияния смещения подошв на изменения значения прогиба в рабочей зоне приведены на рисунке 2.11.

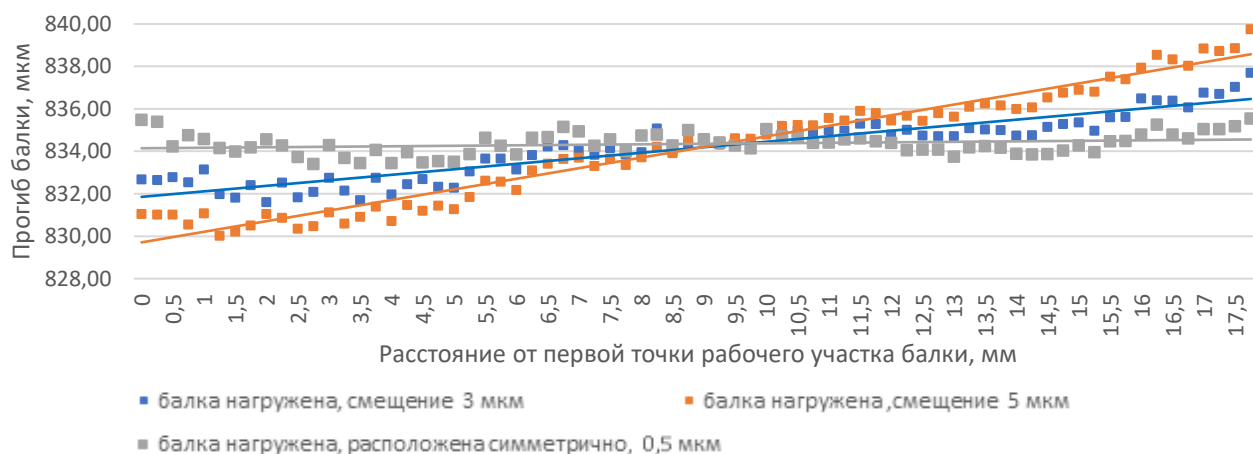


Рисунок 2.11 – Изменение прогиба балки по ее длине в зависимости от смещения подошв относительно кулаков

На рисунке 2.12 показана графическая зависимость погрешности, вызванной несимметричностью нагружения из-за смещения опорных подошв и, как следствие, разностью изгибающих моментов.

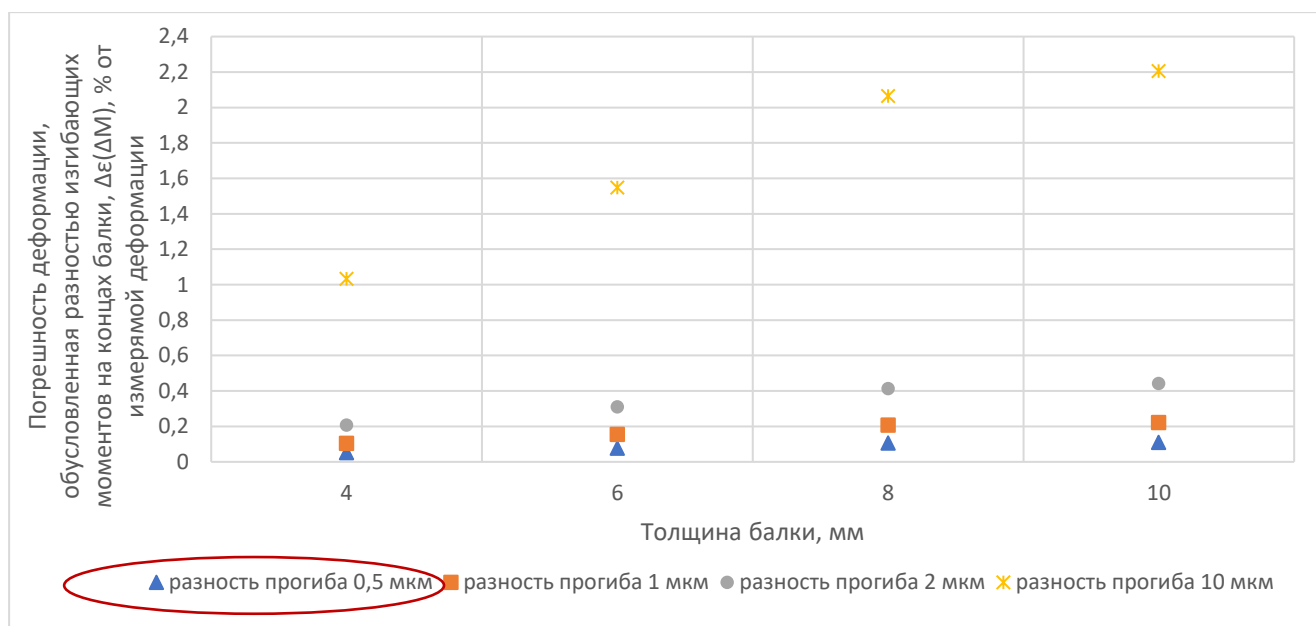


Рисунок 2.12 – Зависимость абсолютной составляющей погрешности деформации от точности первоначальной настройки положения подошв стэнда относительно кулаков для балок толщиной от 4 до 10 мм

Выполненные расчеты стандартного отклонения $S_{\Delta f}$ результатов измерений прогиба и экспериментальные исследования показывают необходимость выравнивания значений изгибающих моментов посредством регулировки опор перед началом измерений с контролем разности значений прогиба по краям рабочего участка балки (не более 0,5 мкм). При этом значения дополнительной погрешности (стандартной неопределённости), обусловленные значением неоднородности деформационного поля при измерении деформации, не превысят 0,11 % от величины измеряемой деформации.

Установление геометрических параметров прогибомера

Измерение прогиба балки осуществляется с помощью прогибомера, состоящего из корпуса с устройством для установки преобразователя прибора «Микрон–04» и трех опор для установки на балку. Точность измерений геометрических параметров прогибомера также являются источниками дополнительной погрешности при определении действительного прогиба балки:

- расстояние между опорами вдоль основной оси;
- расстояние между двоянными опорами в поперечном направлении относительно основной оси и оценка поправки, связанная с поперечным изгибом балки;
- вид и размер опор прогибомера и оценка поправки, обусловленной смещением точек касания балки при изгибе балки, с учетом предположения, что форма упругой линии балки – дуга окружности;

– положение щупа датчика относительно опор прогибомера.

Расстояние между опорами прогибомера вдоль основной оси определяется его конструкцией. Оно выбирается исходя из минимально возможной массы прибора, необходимой для снижения влияния собственного веса на прогиб изогнутой балки, и обеспечением надежного контакта опор с балкой, устойчивого положения прогибомера на изогнутой поверхности и исключения установки парных опор в непосредственной близости к торцам балки. Номинальное расстояние между опорами вдоль основной оси ($80,0 \pm 0,5$) мм (рисунок 2.13).

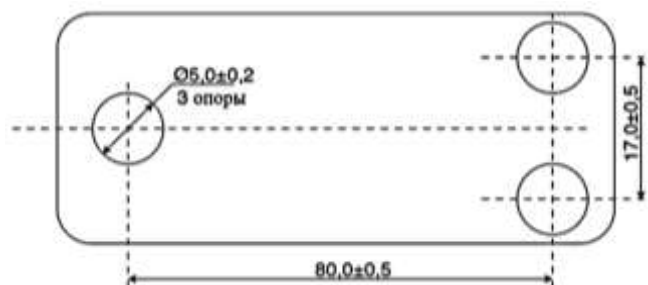


Рисунок 2.13 – Расположение опор прогибомера

Поправка, обусловленная смещением парных опор прогибомера по причине поперечного изгиба балки определяется по формулам (2.16), (2.17).

Расстояние между сдвоенными опорами в поперечном направлении относительно основной оси определяется с использованием микроскопа инструментального ИМЦ 150×50Б, при этом погрешность (неопределённость) поправки, обусловленная использованием микроскопа инструментального, не превышает 0,02 %. Рассчитанные значения поправок, в зависимости от толщины балки и воспроизводимой деформации приведены в таблице А.4.

Из формул (2.18) – (2.20) следует, что основными источниками дополнительной погрешности измерений деформации при определении поправки являются погрешности при оценке радиуса опор прогибомера, обусловленная использованием микроскопа инструментального, положение преобразователя по центру относительно опор прогибомера и оценка радиуса кривизны рабочей поверхности балки. Значения поправок, обусловленных смещением точки касания балки и опоры прогибомера при изгибе балки, в зависимости от толщины балки и воспроизводимой деформации приведены в таблице А.5. Значения поправок, в зависимости от геометрических параметров балки и деформации достигают 10 мкм, что значительно превышает показатели точности датчика прогибомера и при пренебрежении могут являться значимыми источниками систематических погрешностей, способных исказить результаты измерений.

По результатам исследования влияющих факторов установлены их допустимые значения (граничные значений), приведенные в таблице 2.2, определяющие условия измерений и область

применения методики измерений деформации. Это позволяет при разработке методики измерений выбрать оптимальные режимы и параметры измерений, минимизировать систематические составляющие погрешности и обеспечить ее устойчивость.

Таблица 2.2 – Граничные значения для влияющих факторов, обеспечивающие требуемую погрешность измерений деформации

Влияющий фактор	Граничные значения
Температура окружающего воздуха, °С	20±1,0
Допускаемое изменение температуры окружающего воздуха непосредственно во время цикла измерений деформации, °С	0,5
Допуск неплоскостности балки, мкм	16
Допуск непараллельности рабочих и боковых граней балки, мкм	6
Обеспечение установкой воспроизведения деформации нагружения балки длительностью, ч, не менее	5
Нестабильность поддержания нагрузки стендом чистого изгиба за 5 ч, млн ⁻¹ , не менее	2
Допускаемое значение разности прогибов по краям участка балки, мкм	0,5
Геометрические параметры прогибомера, мм: диаметр опор (при применимости) длина базы прогибомера	5,0±0,2 80,0±0,5

Использование комплексного подхода при нормировании граничных значений влияющих факторов, учитывающего ключевые критерии: минимизацию вклада дополнительной погрешности (неопределённости) и наличие средств для практической реализации установленных граничных значений (точность ручной доводки поверхностей балок, характеристики имеющегося климатического оборудования для поддержания выбранных условий испытаний и др.), показывает техническую возможность изготовления установки воспроизведения деформации в соответствии с выбранной концепцией реализации чистого изгиба и разработки способа измерений деформации, обеспечивающих единство и требуемую точность измерений.

2.5 Установление показателей точности методики измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба при воспроизведении единицы деформации

2.5.1 Разработка статистической модели измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба

Выбор и обоснование статистической модели измерений при определении метрологических характеристик методики измерений проведен с учетом всех деталей

выполняемых процедур при измерении деформации. С целью оценки параметров точности метода измерений целесообразно предположить, что каждый результат измерений, ε , включает: математическое ожидание, стандартные неопределённости типа А и В (неисключенную систематическую и случайную составляющие погрешности) [65].

При определении суммарной стандартной неопределённости (суммарной среднеквадратической погрешности) результата измерений необходимо оценить: стандартное отклонение повторяемости, стандартное отклонение неисключенной систематической погрешности.

Статистическая модель измерений деформации поверхности балки ε_{tpr} описывается следующим выражением (2.39), выведенным на основании (2.21) и [1]:

$$\varepsilon_{tpr} = \frac{4 \cdot \bar{h} \cdot (\bar{f} + \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_2')}{L^2 + 4(\bar{f} + \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_2')^2 \pm 4\bar{h}(\bar{f} + \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_2')} \cdot 10^6 + B_{BH} + e_{tn}, \quad (2.39)$$

$$B_{BH} = B + H_t, \quad (2.40)$$

$$\bar{f} = \bar{f}_d - \bar{f}_0, \quad (2.41)$$

где ε_{tpr} – значение деформации, млн^{-1} ;

\bar{h} – среднее арифметическое значение толщины балки, мм;

\bar{f} – среднее арифметическое значение изменения прогиба деформированной балки по показаниям прогибомера, 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;

\bar{h} – среднее арифметическое значение толщины балки, мм;

Π_1 – поправка к показаниям прогибомера, обусловленная 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} ;

B_{BH} – составляющая неисключенной систематической погрешности, млн^{-1} ;

B – составляющая неисключенной систематической погрешности в условиях повторяемости, обусловленная источниками погрешности (неопределённости), входящих в уравнение измерений, а также влияющими факторами, млн^{-1} ;

- H_t – составляющая погрешности, обусловленная неоднородностью деформационного поля, млн⁻¹;
 e_{tn} – случайная погрешность измерений, млн⁻¹;
 t – число групп результатов измерений;
 n – число измерений в группе.

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

Составляющая погрешности H_t , обусловленная неоднородностью деформационного поля:

$$H_t = h_t + \gamma_t, \quad (2.42)$$

$$M(h_t) = 0, D(h_t) = \sigma_{h_t}^2, \quad (2.43)$$

$$M(\gamma_t) = 0, D(\gamma_t) = \sigma_{\gamma_t}^2, \quad (2.44)$$

- где h_t – неоднородность деформационного поля, млн⁻¹;
 γ_{tp} – влияние оператора, млн⁻¹;
 σ – стандартное отклонение, млн⁻¹;
 M – общее среднее значение (математическое ожидание), млн⁻¹;
 D – дисперсия, млн⁻¹.

Из (2.42) - (2.44) следует

$$M(H_t) = 0, D(H_t) = \sigma_{h_t}^2 + \sigma_{\gamma_t}^2 \equiv \sigma_{H_t}^2. \quad (2.45)$$

Считаем, что случайная погрешность измерений состоит из трех составляющих, входящих в (2.39) средних результатов измерений толщины балки, прогиба и базы прогибомера, математические ожидания которых равны нулю и характеризуются только дисперсией. Также полагаем отсутствие взаимной корреляции между этими параметрами:

$$e_n = e_{hn} + e_{Ln} + e_{fn}; \quad (2.46)$$

$$M(e_{hn}) = 0, D(e_{hn}) = \sigma_{e_{hn}}^2; \quad (2.47)$$

$$M(e_{Ln}) = 0, D(e_{Ln}) = \sigma_{e_{Ln}}^2; \quad (2.48)$$

$$M(e_{fn}) = 0, D(e_{fn}) = \sigma_{e_{fn}}^2; \quad (2.49)$$

$$M(e_n) = 0, D(e_n) = \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial F}\right)^2 \sigma_{e_{fn}}^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial h}\right)^2 \sigma_{e_{hn}}^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial L}\right)^2 \sigma_{e_{Ln}}^2; \quad (2.50)$$

$$\text{cov}(h_t, \gamma_{t'}) = 0, \text{cov}(H_t, H_{t'}) = 0 \text{ при } t \neq t', \quad (2.51)$$

$$\text{cov}(H_t, e_{tn}) = 0, \text{cov}(e_{tn}, e_{t'n'}) = 0 \text{ при } n \neq n', t \neq t'. \quad (2.52)$$

Исходя из установленных выше допущений, методы для определения показателей точности результата измерений представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Показатели точности результата измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба

Составляющая погрешности	Обозначение составляющей погрешности	Метод оценки	Раздел
Лабораторная составляющая неисключенной систематической погрешности в условиях повторяемости	B	Суммирование всех источников погрешности (неопределённости), входящих в уравнение измерений, а также учет влияющих факторов.	2.5.2
Составляющая погрешности, обусловленная неоднородностью деформационного поля и влиянием оператора	H_t $H_t = h_t + \gamma_t$	Дисперсионный анализ (ANOVA) $H_{tp} = H_f \cdot c_1$ $H_f = \sqrt{\frac{(MS_{among} - MS_{within})}{N}}$	2.5.2 д)
Случайная погрешность измерений	e_{tn}	Однофакторный анализ $e_{tn} \approx \sum_z \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right)^2 S_x^2$ $S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_{xi}^2}{N}$	2.5.3 а)

2.5.2 Лабораторная составляющая систематической погрешности в условиях повторяемости

Оценку лабораторной составляющей систематической погрешности в условиях повторяемости (неопределённости) провели путем построения полного бюджета составляющих погрешности (неопределённости) соответствии с (2.39). Источниками погрешности (неопределённости) являются, исходя из анализа уравнений измерений, погрешности (неопределённости) измерений толщины балки (h), прогиба (F) и базы прогибомера (L).

Результат измерений деформации определяется на основании результатов измерений независимых друг от друга величин, оценки которых приняты некоррелированными. Коэффициенты влияния погрешности (неопределённости) измерений толщины балки, h , прогиба, F , и базы прогибомера, L , определяются как частные производные (2.16) и рассчитываются по формулам:

$$C_1 = \frac{\partial \varepsilon}{\partial f} = \frac{4hF(-4h - 8F)}{(L^2 + 4F^2 \pm 4Fh)^2} + \frac{4h}{(L^2 + 4F^2 \pm 4Fh)}; \quad (2.53)$$

$$C_2 = \frac{\partial \varepsilon}{\partial h} = -\frac{16hF^2}{(L^2 + 4F^2 \pm 4Fh)^2} + \frac{4F}{(L^2 + 4F^2 \pm 4Fh)}; \quad (2.54)$$

$$C_3 = \frac{\partial \varepsilon}{\partial L} = -\frac{8hFL}{(L^2 + 4F^2 \pm 4Fh)^2}; \quad (2.55)$$

$$h = \frac{\sum_{j=1}^M h_j}{M}, \quad (2.56)$$

$$F = \frac{\sum_{j=1}^M F_j}{M}, \quad (2.57)$$

- где C_1 – коэффициент влияния погрешности (неопределённости) измерений прогиба, $\text{млн}^{-1}/\text{мкм}$;
- C_2 – коэффициент влияния погрешности (неопределённости) измерений толщины балки, $\text{млн}^{-1}/\text{мкм}$;
- C_3 – коэффициент влияния погрешности (неопределённости) измерений длины базы прогибомера, $\text{млн}^{-1}/\text{мкм}$;
- h – общая средняя толщина балки, мкм;
- F – общий среднее изменение прогиба балки на базе прогибомера, мкм;
- L – длина базы прогибомера, мкм;
- h_j – среднее арифметическое значение толщины балки для сечения j , мкм;
- F_j – действительное значение изменения прогиба для сечения j , мкм;
- j – индекс, соответствующий порядковому номеру сечения в рабочей зоне балки;
- M – количество сечений в рабочей зоне балки.

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

Рассчитанные коэффициенты влияния в зависимости от толщины балки и деформации приведены в таблице Б.1.

Стандартные неопределённости результатов измерений деформации балки, обусловленные применением средств измерений, определяют в соответствии ГОСТ 34100.1–2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009 [10].

Другими источниками погрешности (неопределённости), которые не входят в уравнение измерения, но оказывают влияние на результат измерений деформации, являются:

- непараллельность граней балки;
- изменение геометрических размеров балки при изменении температуры;
- изменение модуля упругости балки из-за изменения температуры в процессе цикла измерений.

а) Неопределённость (погрешность) измерений деформации, обусловленная непараллельностью граней балки.

В разделе 2.4 установлено ограничение отклонений от параллельности боковых и рабочих граней балки, $\Delta_{bh} = 6$ мкм. Отклонения от параллельности боковых и рабочих граней балки определяются по формулам [72]:

$$\Delta h = \max_{1 \leq j \leq M} |h_{j-1} - h_{j+1}|, \quad (2.58)$$

$$\Delta b = \max_{1 \leq j \leq M} |b_{j-1} - b_{j+1}|, \quad (2.59)$$

где Δb – отклонение от параллельности боковых граней балки на участке трех последовательных сечений, мкм;

Δh – отклонение от параллельности рабочих граней балки на участке трех последовательных сечений, мкм;

h_j – значение толщины балки по осям А-А и В-В на рабочем участке балки в сечении j , мкм;

b_j – значение ширины балки по оси С-С на рабочем участке балки в сечении j , мкм;

M – количество сечений в рабочей зоне балки.

Коэффициенты влияния непараллельности граней балки определили расчетным способом из уравнения (2.1), полагая постоянство изгибающих моментов для заданного значения деформации и равенство отклонений от параллельности боковых и рабочих граней балки:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial h} = -\frac{2 \cdot 6 \cdot M}{b \cdot h^3 \cdot E} \cdot 10^6; \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial b} = -\frac{6 \cdot M}{b^2 \cdot h^2 \cdot E} \cdot 10^6, \quad (2.60)$$

$$c_{1h} = \frac{2 \cdot \varepsilon}{h} \text{ и } c_{1b} = \frac{\varepsilon}{b}, \quad (2.61)$$

где b – общая средняя ширина балки, мкм;

h – общая средняя толщина балки, мкм;

c_{1h} – коэффициент влияния непараллельности рабочих граней балки на результат измерений деформации, млн⁻¹/мкм;

c_{1b} – коэффициент влияния непараллельности боковых граней балки на результат измерений деформации, млн⁻¹/мкм;

ε – результат измерений деформации балки, млн⁻¹.

Стандартную неопределённость результатов измерений деформации балки, обусловленную непараллельностью граней балки, принятую равной стандартному отклонению составляющей погрешности результатов измерений деформации балки, обусловленному непараллельностью граней балки, и погрешность результатов измерений деформации балки, обусловленную непараллельностью граней балки, рассчитывают по формулам [10] с учетом рассчитанных выше коэффициентов влияния:

$$s_{\Delta h} = \sqrt{\frac{c_{1b}^2 \Delta b^2}{12} + \frac{c_{1h}^2 \Delta h^2}{12}}, \quad (2.62)$$

$$\Delta_{\Delta h} = 1,96 \cdot s_{\Delta h}, \quad (2.63)$$

где $u_{B\Delta h}$ – стандартная неопределённость результатов измерений деформации балки, обусловленная непараллельностью граней балки, млн⁻¹;

$s_{\Delta h}$ – стандартное отклонение составляющей погрешности результатов измерений деформации балки, обусловленные непараллельностью граней балки, млн⁻¹;

$\Delta_{\Delta h}$ – погрешность результатов измерений деформации балки, обусловленная непараллельностью граней балки, млн⁻¹.

Для условий применения методики измерений значения стандартных отклонений составляющей погрешности результатов измерений деформации балки, обусловленные непараллельностью её граней, рассчитанные по (2.62) и (2.63), приведены в таблицах Б.2 - Б.3.

б) Погрешность (неопределённость) измерений деформации, обусловленная изменением геометрических размеров балки при изменении температуры

Изменение геометрических размеров балки при изменении температуры определяется материалом балки, который характеризуется температурным коэффициентом линейного расширения материала балки, α , °С⁻¹.

Пунктом 2.2.3 установлены ограничения диапазона изменения температуры окружающего воздуха (20±1,0) °С и непосредственно во время измерений деформации $\Delta t = \pm 0,5$ °С. Составляющую погрешности результатов измерений деформации балки, обусловленную изменением геометрических размеров балки при изменении температуры, Δ_{th} , мм/мм, и стандартную неопределённость, обусловленную изменением геометрических размеров балки при изменении температуры, u_{Bth} , мм/мм, определяют по формулам в соответствии [10]:

$$\Delta_{th} = C_2 \cdot \alpha \cdot h \cdot \Delta t, \quad (2.64)$$

$$u_{Bth} = \frac{C_2 \cdot \alpha \cdot h \cdot \Delta t}{\sqrt{3}}, \quad (2.65)$$

где Δt – изменение температуры за время измерений, °С;

h – толщина балки, мкм;

C_2 – коэффициент влияния неопределённости измерений толщины балки (2.50), млн⁻¹/мкм.

Для условий применения методики значения стандартных отклонений составляющей погрешности результатов измерений деформации балки, обусловленные изменением

геометрических размеров балки при изменении температуры для различных материалов балок, рассчитанные по (2.64), приведены в таблицах Б.4 – Б.6.

в) Погрешность (неопределённость) измерений деформации, обусловленная изменением модуля упругости в зависимости от температуры. Изменение модуля упругости обусловлено ослаблением межатомных связей (Согласно исследованиям [73] это приводит к уменьшению модуля упругости по закону, близкому к экспоненциальному). Составляющая погрешности результатов измерений деформации балки, обусловленная изменением модуля упругости балки из-за изменения температуры в процессе цикла измерений составляет $\Delta_{tE} = 0,0003 \text{ млн}^{-1}$ по результатам расчета по методике, приведенной [74] для диапазона температур $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Так как размер составляющей погрешности пренебрежимо мал в бюджет неопределённости измерений деформации не входит и не учитывается при расчете показателя точности.

г) Составляющая погрешности результата измерений деформации балки, обусловленная смещением нейтрального слоя балки относительно её центральной оси вызванное изменением температуры. По результатам расчетов в соответствии с [75] составляет $\theta_{\text{Внс}} = 0,0003 \text{ млн}^{-1}$. Так как размер составляющей погрешности пренебрежимо мал в бюджет неопределённости измерений деформации не входит и не учитывается при расчете показателя точности.

д) Составляющая погрешности, обусловленная неоднородностью деформационного поля.

Так как неоднородность деформационного поля обусловлена не только разностью значений изгибающих моментов, но и локальными напряжениями, неоднородностью модуля упругости, чистотой поверхности балки, то для оценки используется методика, изложенная в ГОСТ ISO Guide 35–2015 «Стандартные образцы. Общие и статистические принципы сертификации (аттестации)». Так как различие результатов измерений для разных сечений рабочей зоны балки является величиной случайной, то составляющая погрешности H_t имеет нулевое математическое ожидание:

$$D(H_t) = \sigma_t^2; \quad (2.66)$$

$$M(H_t) = 0, \quad (2.67)$$

где σ_t – значение стандартного отклонения, млн^{-1} ;

$M(H_i)$ – математическое ожидание составляющей погрешности, млн^{-1} .

Методикой измерений предусмотрено измерение локальной деформации в сечении с распространением результата на участок балки длиной не менее 25 мм.

Для определения составляющей погрешности измерений прогиба балки, обусловленной неоднородностью механических свойств, был проведен эксперимент [52], во время которого измерялся прогиб балки в условиях повторяемости для каждого участка, содержащего 10 последовательных сечений с шагом 2,5 мм пять раз, обработали результаты измерений по следующему алгоритму:

$$\bar{f}_t = \frac{\sum_{i=1}^N f_{it}}{N}, \quad (2.68)$$

$$MS_{within} = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (f_{ti} - \bar{f}_t)^2}{T(N-1)}, \quad (2.69)$$

$$MS_{among} = \frac{N \sum_{t=1}^T (f_t - \bar{f})^2}{(T-1)}, \quad (2.70)$$

$$S_{H_t} = \max \left(\left(\sqrt{\frac{(MS_{among} - MS_{within})}{N}} \right); \left(\sqrt{\frac{(MS_{within}) + \frac{2}{\sqrt{v_{MS_{among}}}}}{N}} \right) \right), \quad (2.71)$$

где f_{it} – результат измерений прогиба по показаниям прогибомера для сечения t , мкм;

\bar{f}_t – среднее арифметическое значение прогиба по показаниям прогибомера для сечения t , мкм;

N – количество измерений прогиба в условиях повторяемости, $N=5$;

i – порядковый номер измерения прогиба в условиях повторяемости;

t – порядковый номер сечения на рабочем участке длиной 25 мм;

MS_{within} – дисперсия внутри группы (результатов измерений на участке длиной 25 мм), мкм²;

MS_{among} – дисперсия между группами (результатов измерений в рабочей зоне балки), мкм²;

T – число сечений участке балки, характеризуемым одним значением;

$v_{MS_{among}}$ – число степеней свободы для общего количества измерений прогиба в условиях повторяемости для всех сечений участке балки, характеризуемым одним значением ($v_{MS_{among}} = T(N-1)$);

S_{H_t} – стандартное отклонение результатов измерений прогиба деформированной балки, обусловленное неоднородностью свойств балки, мкм.

Стандартная неопределённость измерений прогиба балки u_{Hf} , обусловленная неоднородностью свойств балки, определяется по формуле:

$$u_{Hf} = S_{H_t}, \quad (2.72)$$

где u_{Hf} – стандартная неопределённость измерений прогиба, обусловленная неоднородностью свойств балки, мкм.

Стандартная неопределённость измерений деформации, обусловленная неоднородностью свойств балки, u_H , определяется по формуле (2.73). Стандартное отклонение погрешности, обусловленное неоднородностью свойств балки, принимается равным стандартной неопределённости

$$u_H = u_{Hf} \cdot |C_1|, \quad (2.73)$$

$$s_H = u_H, \quad (2.74)$$

где C_1 – коэффициент влияния погрешности (неопределённости) измерений прогиба при измерении деформации, $\text{млн}^{-1}/\text{мкм}$;

u_H – стандартная неопределённость измерений деформации, обусловленная неоднородностью свойств балки, млн^{-1} ;

s_H – стандартное отклонение погрешности измерений деформации, обусловленная неоднородностью свойств балки, мкм.

На основании экспериментальных данных, которые представлены в таблице Б.7, среднее значение составляющей погрешности измерений прогиба, обусловленной неоднородностью свойств балки, H_f , для любых десяти последовательных сечений равно 0,24 мкм. На основании изложенного выше определены и приведены в таблице Б.8 значения стандартного отклонения погрешности измерений деформации, обусловленные неоднородностью свойств балки в зависимости от толщины балки и воспроизводимой деформации.

2.5.3 Оценка случайной погрешности измерений и неопределённости по типу А

Так как методика измерений деформации предусматривает последовательное, независимое многократное измерение величин, входящих в уравнение измерений, соответственно, основными источниками случайной погрешности измерений являются стандартные отклонения повторяемости результатов измерений прогиба, толщины балки и базы прогибомера.

а) Оценка случайной погрешности измерений в условиях повторяемости

По результатам измерений толщины балки, базы прогибомера и прогиба рассчитывают среднее арифметические значения L , f_j , h_{j0} , и выборочные дисперсии S_h^2 , S_f^2 , S_L^2 полученных в условиях повторяемости (параллельных измерений):

$$x_p = \frac{\sum_{j=1}^M x_{ip}}{M}, j = 1 \dots, M, \quad (2.75)$$

$$S_{x p}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{ip} - x_p)^2}{N(N-1)}, \quad (2.76)$$

где x – определяемый параметр (толщина балки (h) или прогиб (F) или база прогибомера (L)), мкм;

p – индекс, соответствующий порядковому измерению параметра;

i – индекс, соответствующий порядковому номеру измерения параметра в условиях повторяемости;

N – количество измерений параметра.

Проверка гипотезы о равенстве генеральных дисперсий, используя критерий Кохрена.

Значение критерия Кохрена $G_{m(\max)}$ рассчитывают по формуле

$$G_{x(\max)} = \frac{(S_{x pi}^2)_{\max}}{\sum_{i=1}^N S_{x pi}^2} \quad (2.77)$$

и сравнивают его с табличным значением этого критерия $G_{\text{табл}}$, равные для трех измерений 0,967 и 0,841 – для пяти. Если $G_{m(\max)} > G_{\text{табл}}$, то соответствующее $(S_{x jop}^2)_{\max}$ из дальнейших расчетов исключают.

Неисключенные из расчетов $S_{x pi}^2$ считают однородными и по ним оценивают средние квадратические отклонения (далее СКО), характеризующие повторяемость результатов единичного определения (параллельных измерений), полученных для дальнейшего расчёта деформации. Это СКО S_x^2 рассчитывают по формуле

$$S_x^2 = \frac{\sum_{p=1}^M S_{x p}^2}{M}. \quad (2.78)$$

Показатель повторяемости в виде СКО σ_x для сечения устанавливают, принимая равным S_x

$$\sigma_{ex} \approx S_x. \quad (2.79)$$

Показатель повторяемости результата измерений деформации σ_r для сечения устанавливают по формуле

$$\sigma_r^2 \approx C_1^2 \sigma_{ef}^2 + C_2^2 \sigma_{eh}^2 + C_3^2 \sigma_{eL}^2, \quad (2.80)$$

где σ_r – показатель повторяемости результата измерений деформации, млн⁻¹;

C_1 – коэффициент влияния неопределённости измерений прогиба, млн⁻¹/мкм;

C_2 – коэффициент влияния неопределённости измерений толщины балки, млн⁻¹/мкм;

C_3 – коэффициент влияния неопределённости измерений длины базы прогибомера, млн⁻¹/мкм;

σ_{ef} – показатель повторяемости результата измерений прогиба, мкм;

σ_{eh} – показатель повторяемости результата измерений толщины балки, мкм;

σ_{eL} – показатель повторяемости результата измерений базы прогибомера, мкм.

- б) Оценка случайной погрешности измерений в диапазоне установленных граничных значений влияющих факторов.

Проводят проверку средних значений, $\bar{x} - L, f_j, h_{jo}$ на наличие выбросов по критерию Граббса. Для результатов анализа находят максимальные и минимальные значения параметров. Рассчитывают общее среднее значение результатов измерений и его среднее квадратическое отклонение по формулам:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{p=1}^P x_p}{P}, \quad p = 1 \dots, P, \quad (2.81)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^P (x_p - \bar{x})^2}{P - 1}}. \quad (2.82)$$

Рассчитывают статистики Граббса:

$$GR_{x(\max)} = \frac{\max_{1 \leq p \leq P} x_p - \bar{x}}{S_x}, \quad GR_{x(\min)} = \frac{\bar{x} - \min_{1 \leq p \leq P} x_p}{S_x} \quad (2.83)$$

и сравнивают его с критическим значением этого критерия $GR_{\text{табл}}$, равные для пяти серий измерений 1,715, шести – 1,887 и десяти – 2,290.

Если $GR_{x(\max)} > GR_{\text{табл}}$ или (и) $GR_{x(\min)} > GR_{\text{табл}}$ то соответствующее $\min_{1 \leq p \leq P} x_{jop}$ и (или) $\max_{1 \leq p \leq P} x_{jop}$ из дальнейших расчётов исключают.

Для каждого параметра x (толщина балки (h) или прогиб (F) или база прогибомера (L)) рассчитывают СКО результатов измерений в условиях воспроизводимости, S_R , по формуле

$$S_{Rx}^2 = S_{xp}^2 + S_{Lx}^2, \quad (2.84)$$

где S_{Rx}^2 – дисперсия определяемого параметра, мкм²;

S_{Lx}^2 – дисперсия определяемого параметра в условиях воспроизводимости, мкм²;

S_{xp}^2 – дисперсия определяемого параметра в условиях повторяемости, мкм².

Дисперсию в условиях воспроизводимости, обусловленную изменением условий измерений, для каждого определяемого параметра определить по формулам:

$$S_{Lx}^2 = \frac{S_x^2 - S_{xp}^2}{\bar{n}_p}, \quad (2.85)$$

$$\bar{n} = \frac{1}{p-1} \left[\sum_{p=1}^P n_i - \frac{\sum_{p=1}^P n_i^2}{\sum_{p=1}^P n_i} \right], \quad (2.86)$$

где P – количество групп параметра.

Если из данных расчетов для S_{Lx}^2 получается отрицательное значение, его следует принять нулю.

Неопределённость результата измерений деформации σ_R по типу А устанавливают, принимая равным S_R

$$\sigma_R^2 \approx S_R^2. \quad (2.87)$$

Неопределённость результата измерений деформации σ_R по типу А для сечения устанавливают по формуле

$$\sigma_R^2 \approx c_1^2 \sigma_{Rf}^2 + c_2^2 \sigma_{Rh}^2 + c_3^2 \sigma_{RL}^2, \quad (2.88)$$

где σ_R – неопределённость результата измерений деформации по типу А, млн⁻¹;

C_1 – коэффициент влияния неопределённости измерений прогиба, млн⁻¹/мкм;

C_2 – коэффициент влияния неопределённости измерений толщины балки, млн⁻¹/мкм;

C_3 – коэффициент влияния неопределённости измерений длины базы прогибомера, млн⁻¹/мкм;

σ_{Rf} – неопределённость результата измерений прогиба по типу А, мкм;

σ_{Rh} – неопределённость результата измерений толщины балки по типу А, мкм;

σ_{RL} – неопределённость результата измерений базы прогибомера по типу А, мкм.

Результаты экспериментальных исследований оценки неопределённости результата измерений по типу А приведены в таблицах Б.9 – Б.20.

2.5.4 Оценка показателей точности результата измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба

Неисключенная систематическая погрешность результатов измерений (без учета знака):

$$\Delta_c = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial F}\right)^2 \cdot \frac{(2 \cdot \Delta_{\text{пл}}^2 + \Delta_{\text{км}}^2 + 2 \cdot \Delta_{\text{пл}}^2)}{3} + \Delta_{\Delta h}^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial h}\right)^2 \cdot \frac{(\Delta_{\text{опт}}^2 + \Delta_{th}^2)}{3} + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial L}\right)^2 \cdot \frac{\Delta_M^2}{3} + 2 \cdot S_H^2}, \quad (2.89)$$

$$\Delta_{\Delta h} = \frac{(h \cdot \Delta b + 2 \cdot b \cdot \Delta h) \cdot \varepsilon}{2 \cdot b \cdot h}, \quad (2.90)$$

$$\Delta_{th} = \alpha \cdot \Delta t \cdot h, \quad (2.91)$$

$$\Delta_{\text{пл}} = \frac{H_{\text{пл}}}{2 \cdot \sqrt{3}}, \quad (2.92)$$

где Δ_c – значение неисключенной систематической погрешности результатов измерений деформации балки, млн⁻¹;

$\Delta_{\Delta h}$ – значение неисключенной систематической погрешности результатов измерений деформации балки, обусловленное непараллельностью граней балки, мкм;

Δ_{th} – значение неисключенной систематической погрешности результатов измерений деформации балки, обусловленное изменением геометрических размеров балки при изменении температуры, мкм;

- $\Delta_{\text{дп}}$ – пределы допускаемой погрешности прибора «Микрон–04», датчик которого установлен в прогибомере ($\Delta_{\text{дп}} = 0,0006$ мм), мкм;
- $\Delta_{\text{опт}}$ – пределы допускаемой погрешности оптиметра, используемого для измерений геометрических параметров балки ($\Delta_{\text{опт}} = 0,0003$ мм), мкм;
- $\Delta_{\text{м}}$ – пределы допускаемой погрешности измерения действительного значения длины меры, используемой для измерений геометрических параметров балки ($\Delta_{\text{м}} = \pm(0,1+1 \cdot L)$ мкм, где L в м), мкм;
- Δb – отклонение от параллельности боковых граней балки (для настоящей методики $\Delta b = 0,006$ мм), мкм;
- Δh – отклонение от параллельности рабочих граней балки (для настоящей методики $\Delta h = 0,006$ мм), мкм;
- α – температурный коэффициент линейного расширения материала балки, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;
- Δt – изменение температуры за время измерений ($\Delta t = 0,5$ $^{\circ}\text{C}$), $^{\circ}\text{C}$;
- h – толщина балки, мкм;
- F – прогиб балки на базе прогибомера, мкм;
- L – длина базы прогибомера, мкм;
- $\Delta_{\text{м}}$ – пределы допускаемой погрешностью микроскопа, используемого для измерений базы прогибомера ($\Delta_{\text{м}} = \pm 0,006$ мкм), мкм;
- $H_{\text{пл}}$ – отклонение от плоскостности пластины стеклянной ($H_{\text{пл}} = 0,09$ мкм), мкм.

Суммарное среднее квадратическое отклонение результата измерений деформации:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_R^2 + S_{\Delta}^2}, \quad (2.93)$$

$$S_{\Delta} = \frac{\Delta_c}{1,1 \cdot \sqrt{3}}, \quad (2.94)$$

- где S_{Σ} – суммарное среднее квадратическое отклонение результата измерений деформации, млн^{-1} ;
- S_{Δ} – среднее квадратическое отклонение неисключенной систематической погрешности результатов измерений деформации балки, млн^{-1} ;
- S_R – среднее квадратическое отклонение результатов измерений деформации балки, млн^{-1} ;
- Δ_c – значение неисключенной систематической погрешности результатов измерений деформации балки, млн^{-1} .

Погрешность измерений деформации

$$\Delta = 1,96 \cdot S_{\Sigma}, \quad (2.95)$$

где Δ – погрешность измерений деформации, млн⁻¹.

Результаты расчета погрешности измерений деформации приведены в таблицах Б.21-Б.23.

Расчет неопределённости измерений деформации

Стандартная неопределённость типа А измерений деформации, u_A :

$$u_A = \sqrt{C_1^2 \cdot (2 \cdot u_{AF}^2 + u_{Hf}^2) + C_2^2 \cdot u_{Ah}^2 + C_3^2 \cdot u_{AL}^2 + c_{1h}^2 \cdot \frac{\Delta h^2}{2\sqrt{3}} + c_{1b}^2 \cdot \frac{\Delta b^2}{2\sqrt{3}}}, \quad (2.96)$$

$$c_{1h} = \frac{1 \cdot \varepsilon}{2h} \text{ и } c_{1b} = \frac{\varepsilon}{b}, \quad (2.97)$$

$$\Delta h = \max_{j-1 \leq j \leq j+1} |h_{j-1} - h_{j+1}|, \quad (2.98)$$

$$\Delta b = \max_{j-1 \leq j \leq j+1} |b_{j-1} - b_{j+1}|, \quad (2.99)$$

где u_A – стандартная неопределённость измерений деформации балки, оцениваемая по типу А, млн⁻¹;

C_1 – коэффициент влияния неопределённости измерений прогиба, млн⁻¹/мкм;

u_{AF} – стандартная неопределённость измерений прогиба, оцениваемая по типу А, мкм;

u_{Hf} – стандартная неопределённость измерений прогиба, обусловленная неоднородностью деформационного поля (2.3), мкм;

C_2 – коэффициент влияния неопределённости измерений толщины балки, млн⁻¹/мкм;

u_{Ah} – стандартная неопределённость измерений толщины балки, оцениваемая по типу А, мкм;

C_3 – коэффициент влияния неопределённости измерений длины базы прогибомера, млн⁻¹/мкм;

u_{AL} – стандартная неопределённость измерений длины базы прогибомера, оцениваемая по типу А, мкм;

c_{1h} – коэффициент влияния непараллельности рабочих граней балки на результат измерений деформации, млн⁻¹/мкм;

c_{1b} – коэффициент влияния непараллельности боковых граней балки на результат измерений деформации, млн⁻¹/мкм;

Δb – отклонение от параллельности боковых граней балки на участке трех сечений, мкм;

Δh – отклонение от параллельности рабочих граней балки на участке трех сечений, мкм;

ε – результат измерений деформация балки, млн⁻¹;

b – общая средняя ширина балки, мкм;

h – общая средняя толщина балки, мкм;

b_j – значение ширины балки по осям С-С на рабочем участке балки в сечении j , мкм;

h_j – значение толщины балки по осям А-А и В-В на рабочем участке балки в сечении j , мкм;

α – температурный коэффициент линейного расширения материала балки, °С⁻¹;

b – общая средняя ширина балки, мкм;

h – общая средняя толщина балки, мкм;

b_j – значение ширины балки по осям С-С и Д-Д на рабочем участке балки в сечении j , мм.

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

Справочные значения коэффициентов влияния в зависимости от диапазона измерений и толщины балки приведены в таблице Б.1.

Стандартная неопределённость измерений прогиба, толщины балки, прогиба балки на базе прогибомера, оцениваемые по типу А

$$u_A = \frac{s_{\text{повт}}}{\sqrt{N}}, \quad (2.100)$$

где u_A – стандартная неопределённость измерений, оцениваемая по типу А, мкм;

$s_{\text{повт}}$ – стандартное отклонение повторяемости измерений параметра, мкм;

N – число определений параметра.

Стандартное отклонение повторяемости

$$s_{\text{повт}}(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)^2}{(N - 1)}}, \quad (2.101)$$

где $s_{\text{повт}}(x)$ – стандартное отклонение повторяемости измерений параметра x , мкм;

x_i – значение параметра при i -ом измерении, мкм;

\bar{x}_i – среднее арифметическое значение параметра, мкм;

N – число измерений параметра.

Кроме рассмотренных выше, источниками неопределённости, которые не входят в уравнение измерения, но оказывают влияние на результат измерений деформации, являются непараллельность граней балки, изменение геометрических размеров балки при изменении температуры, изменение модуля упругости балки из-за изменения температуры в процессе цикла измерений.

Поскольку в ходе эксперимента одновременно измеряемыми величинами являются независимые друг от друга величины, то их оценки приняты некоррелированными.

Стандартная неопределённость типа В измерений деформации

$$u_B = \sqrt{u_{BF}^2 + u_{Bh}^2 + u_{BL}^2 + u_{BtE}^2 + u_{Bhc}^2 + u_{Bth}^2} = \quad (2.102)$$

$$= \sqrt{C_1^2(2 \cdot u_{дп}^2 + u_{км}^2 + 2 \cdot u_{пл}^2) + C_2^2 u_{опт}^2 + C_3^2 u_m^2 + u_{BtE}^2 + u_{Bhc}^2 + C_2^2 u_{th}^2} \quad (2.103)$$

$$u_{пл} = \frac{H_{пл}}{2 \cdot \sqrt{3}}$$

- где u_B – стандартная неопределённость измерений деформации балки, оцениваемая по типу В, млн^{-1} ;
- u_{BF} – стандартная неопределённость, оцениваемая по типу В, обусловленная неопределённостью измерений прогиба, млн^{-1} ;
- u_{Bh} – стандартная неопределённость, оцениваемая по типу В, обусловленная неопределённостью измерений толщины и ширины балки, млн^{-1} ;
- u_{BL} – стандартная неопределённость, оцениваемая по типу В, обусловленная неопределённостью измерений длины базы прогибомера, млн^{-1} ;
- C_1 – коэффициент влияния неопределённости измерений прогиба, $\text{млн}^{-1}/\text{мкм}$;
- $u_{дп}$ – стандартная неопределённость измерений прогиба с помощью прибора «Микрон-04», мм;
- $u_{пл}$ – стандартная неопределённость измерений прогиба с помощью пластины стеклянной ($u_{пл} = \frac{H_{пл}}{2 \cdot \sqrt{3}}$, где $H_{пл}$ - отклонение от плоскостности пластины стеклянной, мм), мкм;
- $u_{км}$ – стандартная неопределённость измерений прогиба с помощью мер, мкм;
- C_2 – коэффициент влияния неопределённости измерений толщины балки, $\text{млн}^{-1}/\text{мкм}$;
- $u_{опт}$ – стандартная неопределённость измерений толщины балки с помощью оптиметра, мкм;
- C_3 – коэффициент влияния неопределённости измерений длины базы прогибомера, $\text{млн}^{-1}/\text{мкм}$;
- u_{BtE} – стандартная неопределённость, оцениваемая по типу В, обусловленная изменением модуля упругости балки при изменении температуры, принимают $u_{BtE} = 0,0003 \text{ млн}^{-1}$;

u_{BHC} – стандартная неопределённость, оцениваемая по типу В, обусловленная смещением нейтрального слоя балки относительно её центральной оси [74, 7], принята равной $u_{BHC} = 0,0003$ млн⁻¹;

u_{Bth} – стандартная неопределённость результата измерений деформации типа В, обусловленная изменением геометрических размеров балки при изменении температуры, млн⁻¹;

u_{th} – стандартная неопределённость измерений геометрических размеров балки при изменении температуры, мкм.

Суммарная неопределённость результата измерений деформации

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \quad (2.104)$$

где u_c – суммарная стандартная неопределённость измерений деформации, млн⁻¹;

u_A – стандартная неопределённость измерений деформации балки, оцениваемая по типу А, млн⁻¹;

u_B – стандартная неопределённость измерений деформации балки, оцениваемая по типу В, млн⁻¹.

Эффективное число степеней свободы v_{eff}

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\frac{(C_1 \cdot u_{AF})^4}{5-1} + \frac{(C_2 \cdot u_{Ah})^4}{6-1} + \frac{(C_3 \cdot u_{AL})^4}{5-1}}, \quad (2.105)$$

где v_{eff} – эффективное число степеней свободы;

u_A – стандартная неопределённость измерений деформации, определяемая по типу А, млн⁻¹;

u_c – суммарная стандартная неопределённость измерений деформации, млн⁻¹;

6 – число измерений толщины балки для каждого сечения;

5 – число измерений прогиба и базы прогибомера в каждом сечении.

Расширенная неопределённость результата измерений деформации

$$U_p = k_p \cdot u_c. \quad (2.106)$$

Коэффициент охвата k_p выбирают по распределению Стьюдента, исходя из предположения о нормальности закона распределения возможных значений измеряемой величины для уровня доверия $p=0,95$ и рассчитанного значения эффективного числа степеней свободы.

Результаты расчета неопределённости измерений деформации и структура бюджета приведены в таблицах Б.24-Б.30. Для неопределённостей и неисключенной систематической погрешностей определены уравнения предельных значений характеристики в зависимости от измеряемой деформации. Уравнения получены методом наименьших квадратов, с условием, что

коэффициенты состоят не более, чем из двух значащих цифр, а полученные значения характеристик справедливы для всех, предусмотренных методикой исследуемых балок, независимо от их толщины и материала, без учета знака:

$$u_{\Sigma} = 1,6 + 3 \cdot 10^{-5} \varepsilon, \quad (2.107)$$

$$\sigma_{Rл} = 0,2 + 6 \cdot 10^{-4} \varepsilon, \quad (2.108)$$

$$\Delta_c = |2,8 + 9 \cdot 10^{-4} \varepsilon|. \quad (2.109)$$

На рисунках 2.14 – 2.16 приведены графики значений показателей точности для балок во всем диапазоне измерений и установленные параметры методики измерений

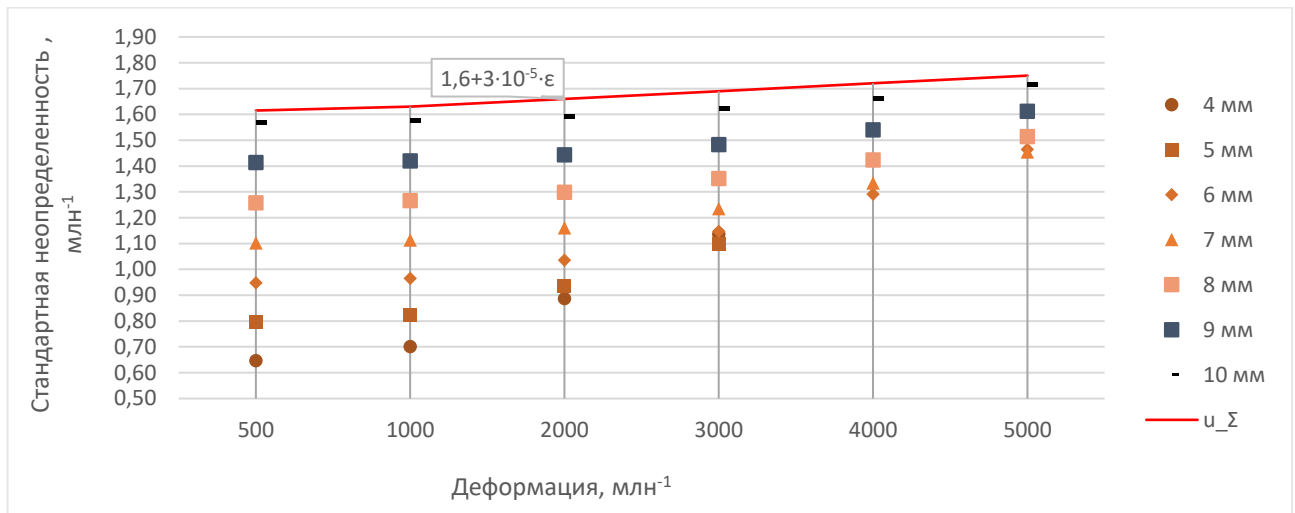


Рисунок 2.14 – Установленная стандартная неопределённость результатов измерений, обусловленная влиянием влияющих параметров при деформациях от 500 до 5000 млн⁻¹ для балок толщиной от 4 до 10 мм

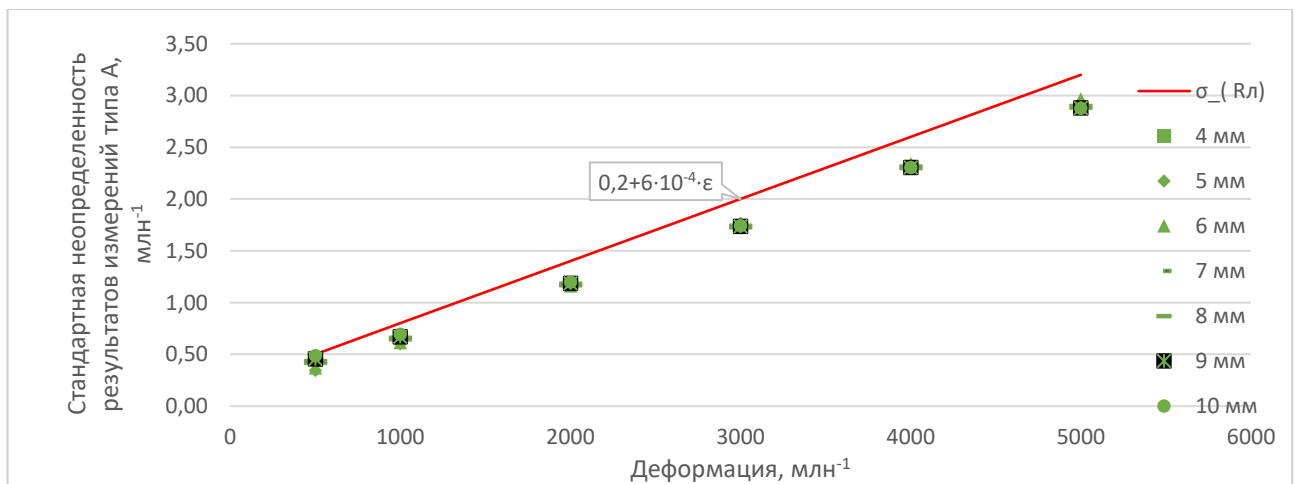


Рисунок 2.15 – Установленная стандартная неопределённость результатов измерений по типу А для деформаций от 500 до 5000 млн⁻¹ для балок толщиной от 4 до 10 мм

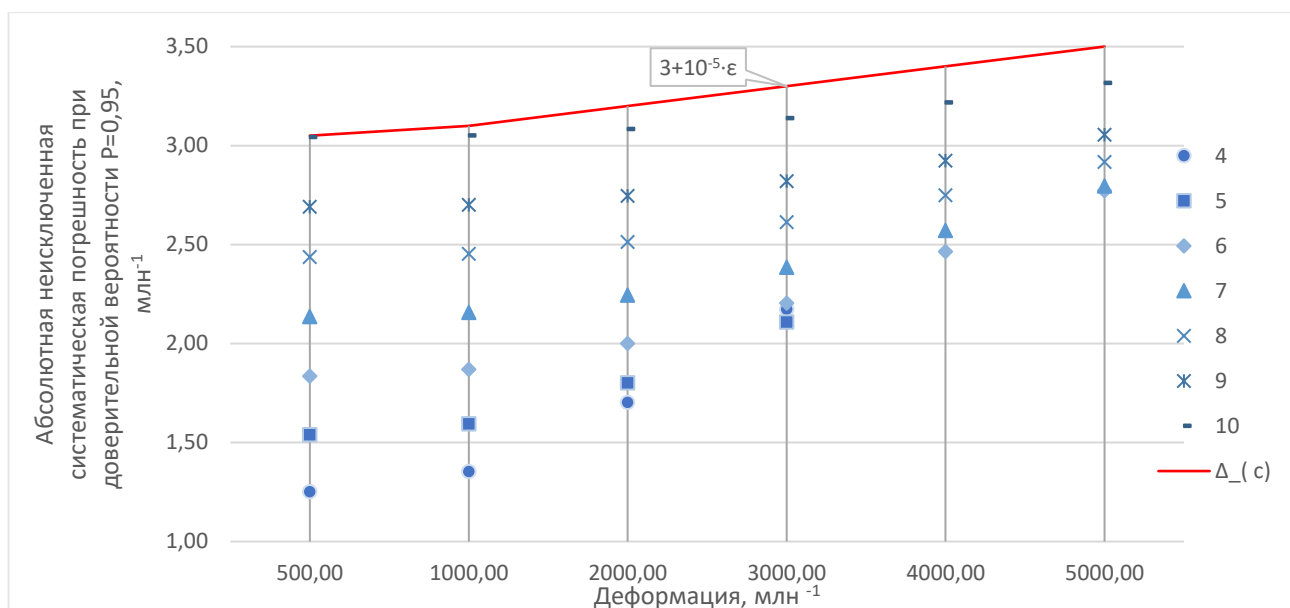


Рисунок 2.16 – Установленная абсолютная неисключенная систематическая погрешность при доверительной вероятности $P=0,95$, млн^{-1} при деформациях от 500 до 5000 млн^{-1} для балок толщиной от 4 до 10 мм

Разработанная статистическая модель измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба, позволяет учесть влияние:

- погрешности измерений толщины балки, прогиба и базы прогибомера;
- непараллельности граней балки, изменение геометрических размеров балки при изменении температуры, изменение модуля упругости балки из-за изменения температуры в процессе цикла измерений;
- неисключенные систематические погрешности;
- случайные погрешности.

Установленные на основании статистической модели показатели точности измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба при воспроизведении ее единицы, учитывающие влияющие факторы для сформулированных принципов построения и конструкции установки, обеспечат получение результата измерений деформации с требуемыми для показателями точности, установленными в главе 1, и прослеживаемость результатов измерений при воспроизведении единицы деформации.

Выводы по главе 2

В результате проведенных, в главе 2, теоретических и экспериментальных исследований достигнуты следующие результаты.

Сформулированы принципы построения кинематической схемы установки воспроизведения деформации, обеспечивающие симметричное чистое изгибное нагружение и воспроизводимое деформационное поле.

Разработана физико–математическая модель процесса измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба, которая устанавливает количественные зависимости между деформацией поверхности балки, ее геометрическими параметрами и чувствительностью средств измерений прогиба с учетом значимых влияющих геометрических и физико–механических факторов, что позволяет оценить показатели точности результатов измерений воспроизводимой деформации с использованием установки предлагаемой конструкции.

С использованием улучшенной физико–математической модели проведены исследования и установлены допустимые (граничные) значения влияющих факторов, определяющие условия и область применения методики измерений деформации.

Произведена оценка показателей точности результата измерений деформации и составлен бюджет неопределённости воспроизведения единицы деформации, подтверждена расширенная неопределённость ($k=2$) воспроизведения единицы деформации от $3,6 \text{ млн}^{-1}$ (в диапазоне измерений деформации от минус 500 до 500 млн^{-1} включ.) до $(2,8+9 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon) \text{ млн}^{-1}$ (в диапазоне от - 5000 до -500 и св. 500 до 5000 млн^{-1}).

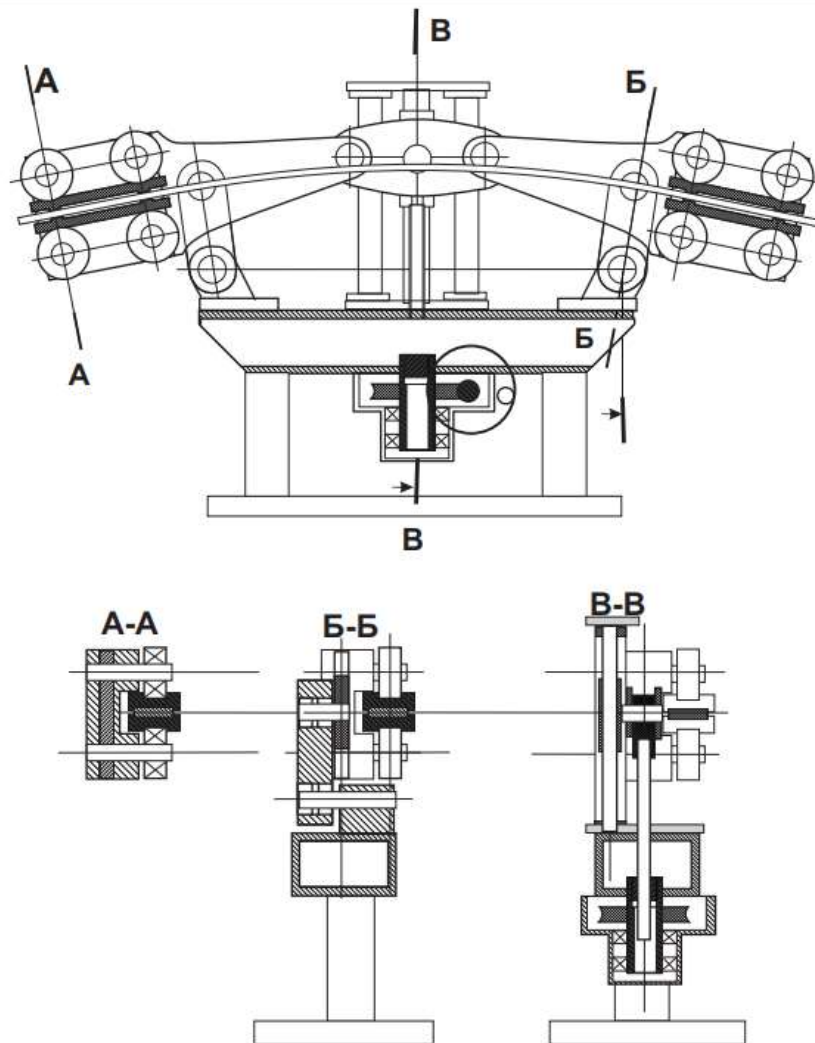
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ

3.1 Создание установки воспроизведения деформации

3.1.1 Создание экспериментального образца стэнда, реализующего метод чистого изгиба балки постоянного сечения

Выше определены принципы построения кинематической схемы установки, реализующей метод чистого изгиба балки постоянного сечения. При выборе схемы и компоновки установки, реализующей метод чистого изгиба балки постоянного сечения, использован патент на изобретение «Устройство для получения чистого изгиба эталонной балки» [76], согласно которому рычаги установлены горизонтально и шарнирно связаны с основанием посредством двух симметрично расположенных шатунов, а также шарнирно соединены между собой и с двигателем посредством коромысла, своим центром симметрии шарнирно связанным с ползуном, кинематически связанным с вертикальной направляющей и с двигателем (см. рисунок 3.1). В ненагруженном состоянии рычаги и балка располагаются по одной горизонтальной линии. В этом случае силы, действующие на элементы кинематической схемы минимальны. Так же использовано изобретение № 2526787 «Способ получения чистого изгиба балки постоянного сечения и устройство для его осуществления» [77]. В соответствии с ним станина выполнена в виде стойки с закрепленной на ней горизонтальной распорной балкой, по концам которой установлены цилиндрические шарниры, служащие осями подвеса двух вертикально расположенных симметричных рычагов (Б–Б рисунок 3.1), нижние концы рычагов шарнирно соединены посредством противоположно направленных соосных тяг с общим для них дифференциальным «плавающим двигателем» (С–С рисунок 3.1). В верхней части каждого рычага попарно сверху и снизу от балки установлены четыре опорных ролика. Между роликами и балкой, так же сверху и снизу, размещены «подушки» в виде плоских пластин с полукруглыми выступами (А–А рисунок 3.1) на противоположных краях, контактирующих с балкой непосредственно по образующим цилиндрических поверхностей этих выступов, а точки контакта опорных роликов с плоскими сторонами пластин - «подушек» попарно находятся на соответствующих нормалях к плоской поверхности пластин - «подушек».

Общий вид экспериментального образца приведен на рисунке 3.1.



А-А – положение балки в подушках опорных роликов
 Б-Б - цилиндрические шарниры вертикальных рычагов
 С-С – привод и «плавающий движитель»

Рисунок 3.1 – Общий вид экспериментального образца стенда «чистого изгиба»

При перемещении с помощью червячной передачи коромысла в направлении «вверх» рычаги, связанные шарнирами с коромыслом, изменяют угол своего наклона относительно горизонтальной линии, вращаясь относительно осей подвеса, шарнирно соединенных с соответствующими шатунами. При этом шатуны в свою очередь также начинают менять угол своего наклона относительно шарнирных осей рейтеров, установленных на неподвижном основании. Опорно–напорные ролики рычагов прилагают изгибающие усилия к балке, при этом балка начинает изгибаться. С дальнейшим увеличением перемещения коромысла усилие на изгиб балки возрастает, упругие свойства балки вызывают увеличение сил, действующих на узлы кинематической схемы. Аналогичные процессы проходят при перемещении коромысла в направлении «вниз».

3.1.2 Исследование экспериментального образца стэнда с целью установления пригодности для получения чистого изгиба

Отprobование

При отprobовании проверяется положение балки на опорах, убеждаются в том, что торцы балки находятся за пределами нагружающих башмаков, стэнд обеспечивает нагружение без рывков и заеданий. Скорость деформирования балки от 5 до 55 мм/мин; ускорение штока при разгоне и торможении от 0,001 до 0,090 мм/с².

Установление соответствия геометрических параметров балки

Определяются действительные размеры поперечного сечения балки в следующей последовательности:

- балку вынимают из установки и размещают на поверхности контрольно-разметочной плиты;
- разметку балки выполняют карандашом «Т» с помощью металлической линейки с пределами измерений 0 – 500 мм (рисунок 3.2).
- толщину балки измеряют три раза вдоль осей АА и ВВ, ширину балки измеряют вдоль оси СС в тех же сечениях с помощью оптиметра электронного горизонтального ИКГ–3э. Сечения 1' – 3', 4' – 6' находятся в зонах контакта нагружающих башмаков с балкой. Центральный участок балки (сечения 1 – М) представляет собой рабочую зону (размер рабочей зоны балки подлежит уточнению по результатам экспериментальных исследований).

Балка была изготовлена из инструментальной стали 40Х, толщиной 3,96 мм, шириной 29,97 мм, непараллельность её рабочих граней в рабочей зоне 6 мкм, подробные результаты измерений геометрических размеров балки, приведённые в таблице Б.31, соответствуют установленным в разделе 2.4 требованиям и значения стандартных отклонений составляющей погрешности результатов измерений деформации балки, обусловленные непараллельностью её граней, рассчитанные по (2.62) и (2.63), приведены в таблицах Б.2 – Б.3.

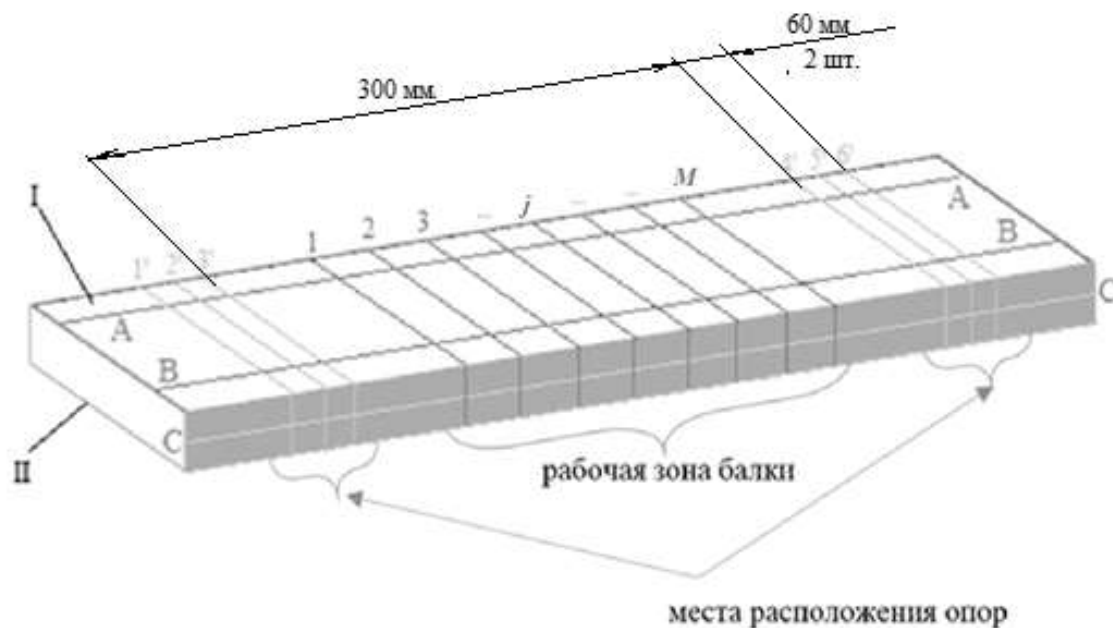


Рисунок 3.2 – Разметка балки

Для определения первоначального изгиба и неплоскостности балки, последняя устанавливается на мост эталона ГЭТ 130–2019 в таком положении, в котором она находится в установке, и с помощью компарирующего устройства измеряют по два раза в не менее, чем в десяти сечениях расстояния от плиты до нижней грани балки с двух её сторон (по толщине балки). В соответствии с методикой измерений на эталоне определяется отклонения от прямой, соединяющей крайние точки и отклонение от прямолинейности в продольном направлении балки. Первоначальный изгиб балки составил 3 мкм.

Проверка жёсткости конструкции

Проверяется сходимость показаний датчика прогибомера на всех ступенях деформации, для чего выводится стержень датчика из контакта с балкой и вновь опускается, предварительно датчик прогибомера выставляют таким образом, чтобы показания находились в диапазоне от 0 до 20 мкм. Операцию повторяется не менее пяти раз. По результатам измерений делается вывод об отсутствии нежелательных самопроизвольных перемещений прогибомера относительно балки и балки относительно нагружающих рычагов. Размах показаний датчика прогибомера не превысил 0,12 мкм, что свидетельствует о соответствии жёсткости конструкции и соответствующего ей массы прогибомера.

Исследование радиуса изгиба балки.

Проверка профиля деформированной балки проводится в следующей последовательности:

- производят разметку рабочей зоны балки карандашом «Т» на 9 равных частей по (20 ± 1) мм;
- на разгруженную балку устанавливают прогибомер (база 85,50 мм), так чтобы упоры прикасались к поверхности балки. измерительный наконечник совмещают с первой риской (18) на балке ± 1 мм;
- производят перемещение прогибомера по всем рискам (с 18 по 34) с фиксацией показаний на каждой риске. Перемещение прогибомера по рискам повторяют еще два раза с фиксацией результатов;
- нагружают балку и на каждой ступени деформации производят трехкратное перемещение прогибомера по всем рискам (с 18 по 34) с фиксацией результатов;
- разгружают балку до деформации $\varepsilon = 0$.

Обработку данных, полученных при определении отклонений упругой линии градуировочной балки, проводят в следующем порядке:

по данным определяют средние арифметические значения прогиба на каждой риске отдельно для каждой деформации, $Cp(z)_i$ и отклонения показаний на каждой риске относительно показаний для риска 26;

на каждой риске определяют (f_{iz}) - разности между найденными средними значениями $Cp(z)_i$ при всех значениях деформации и значениями $Cp(0)_i$ при деформации $\varepsilon=0$, а также изменение прогиба балки по длине балки по формулам:

$$f_{iz} = Cp(z)_i - Cp(0)_i, \quad (3.1)$$

$$R_{iz} = \frac{l^2 - 4f_{iz}^2}{8f_{iz}}, \quad (3.2)$$

$$\Delta R_{iz} = R_{iz} - \bar{R}_i, \quad (3.3)$$

- где R_i – радиус кривизны нейтрального слоя балки на i -ой риске, мм;
 l – база прогибомера, мм;
 i – индекс, соответствующий порядковому номеру ступени нагружения;
 z – индекс, соответствующий порядковому номеру риска.

Для полученных значений отклонений радиуса от среднего значения проведены проверки:

- коэффициента детерминации результатов аппроксимации пяти функциям (линейная, квадратичная, степенная, экспоненциальная и логарифмическая). Проверка показала, что

коэффициент детерминации (R^2): близок к нулю (от 0,0001 до 0,01), т.е. выбранные модели не объясняют вариации данных;

- коэффициента корреляции Пирсона, составившего от 0,1 до 0,2, что указывает также на статистически незначимую связь;
- наличия наклона прямой (тренда), указывающего на зависимость значений деформации по длине балки. Коэффициенты наклона для разных ступеней прогиба составили от 0,03 до -0,001, статистическая значимость результатов $p < 0,05$, т.е. наклон статистически незначим, линейного тренда нет;
- результатов статистического анализа ANOVA, который указывает на низкие значения F-статистики по различию средних значений по зонам балки.

Таким образом, значения радиуса кривизны балки по координате не имеет направленной зависимости; линейная корреляция отсутствует, прогиб в разных точках балки статистически независим от координаты, радиус в зонах балки одинаков по длине в рамках СКО, наблюдаемые отклонения носят случайный характер и объясняются погрешностями измерений, что полностью согласуется с гипотезой о чистом изгибе. По результатам экспериментальных исследований установлена рабочая зона балки длиной 130 мм.

Экспериментальная оценка стабильности воспроизведения единицы деформации

Экспериментальные исследования проводились в условиях варьирования влияющих факторов в пределах установленных граничных значений. В каждом случае выполнялись многократные измерения толщины, прогиба и длины базы прогибомера. Варьирование факторов в пределах указанных границ позволило оценить устойчивость процесса воспроизведения единицы деформации к изменению условий измерений и подтвердить, что установленные допуски являются достаточными для обеспечения установленной точности.

Статистическая обработка результатов измерений проводилась в соответствии с алгоритмами, изложенными в разделе 2. Оценка однородности дисперсий по критерию Кохрена подтвердила отсутствие значимых различий в повторяемости измерений между сериями, по критерию Граббса не выявила выбросов в средних значениях, что свидетельствует о стабильности условий измерений во всем диапазоне варьирования факторов. На основе полученных данных были рассчитаны показатели повторяемости и воспроизводимости для результатов измерений деформации в диапазоне от 500 до 5000 млн⁻¹. Установлено, что: показатель повторяемости для балок толщиной 4 – 10 мм составляет от 0,2 до 2,9 млн⁻¹ в зависимости от толщины балки и измеряемой деформации; неопределённость результатов измерений, оцениваемая по типу А для условий установленных граничных значений влияющих факторов составляет от 0,3 до 3,5 млн⁻¹, результаты измерений приведены в таблицах Б.9 – Б.20.

В качестве критерия стабильности воспроизведения единицы деформации использовано отношение показателей неопределённости результатов измерений, оцениваемая по типу А для условий установленных граничных значений влияющих факторов и повторяемости [78, 79]. Для всех исследованных балок толщиной 4 – 10 мм в диапазоне деформаций от 500 до 5000 млн⁻¹ это соотношение находится в пределах от 1,0 до 1,6, составляя в среднем 1,2.

Для механических измерений полученные значения отношений неопределённости результатов измерений, оцениваемой по типу А для условий установленных граничных значений влияющих факторов и повторяемости свидетельствуют о малом вкладе влияющих факторов (изменение температуры, перенастройка оборудования, смена оператора) в общую неопределённость измерений и подтверждают высокую стабильность процесса воспроизведения единицы деформации во всем диапазоне измерений.

3.1.3 Создание установки воспроизведения единицы деформации

В рамках данной работы область применения установки воспроизведения единицы деформации – определение характеристик тензорезистивных преобразователей и (тензорезисторов) с возможным дальнейшим расширением функционала установки на преобразователи оптоволоконные, поэтому требования к системе регистрации сигналов первичных преобразователей обусловлены номенклатурой потенциально исследуемых преобразователей и набором определяемых параметров. Таким образом определен состав и принцип действия установки воспроизведения единицы деформации, функциональная схема которой приведена на рисунке 3.3.

Стенд воспроизводит заданные значения деформации путем изгиба балки, посредством изменения угла наклона установленных на шатунах рычагов, в которых закреплены концы балки. Угол наклона рычагов, в свою очередь задается путем перемещения в вертикальной плоскости ползуна, к которому прикреплены свободные концы рычагов. Ползун перемещается посредством червячной передачи стенда. Шаговый двигатель стенда управляется контроллером, получающим команды на поворот на определенное число шагов, задаваемое от процессорного блока персонального компьютера (ПК) оператора установки. Измерение воспроизведенных на рабочих поверхностях балки значений деформации производится с применением прогибомера с длиной измерительной базы 80 мм дифференциальным методом посредством пластины плоской стеклянной ПИ 120 и мер длины концевых плоскопараллельных. В качестве чувствительного элемента, позволяющего определить прогиб балки, применяется измерительный преобразователь прибора для поверки концевых мер длины «Микрон–04». Для измерений изменения сопротивления тензорезисторов, наклеиваемых на рабочие поверхности балки, применяется система сбора данных UCAM-65C M14 представляет собой измерительно-

вычислительный комплекс, предназначенный для измерений, записи и обработки данных аналоговых выходных сигналов различных типов датчиков – с выходными сигналами напряжения и силы тока, тензорезисторов и тензодатчиков по различным схемам подключения. Система сбора данных UCAM-65C M14 предназначена для работы под управлением ПК как для организации процесса измерений, так и для хранения результатов. Основные метрологические и технические характеристики системы сбора данных UCAM-65C M14 для стандартного режима, заявляемые производителем, приведены в таблице 3.1.

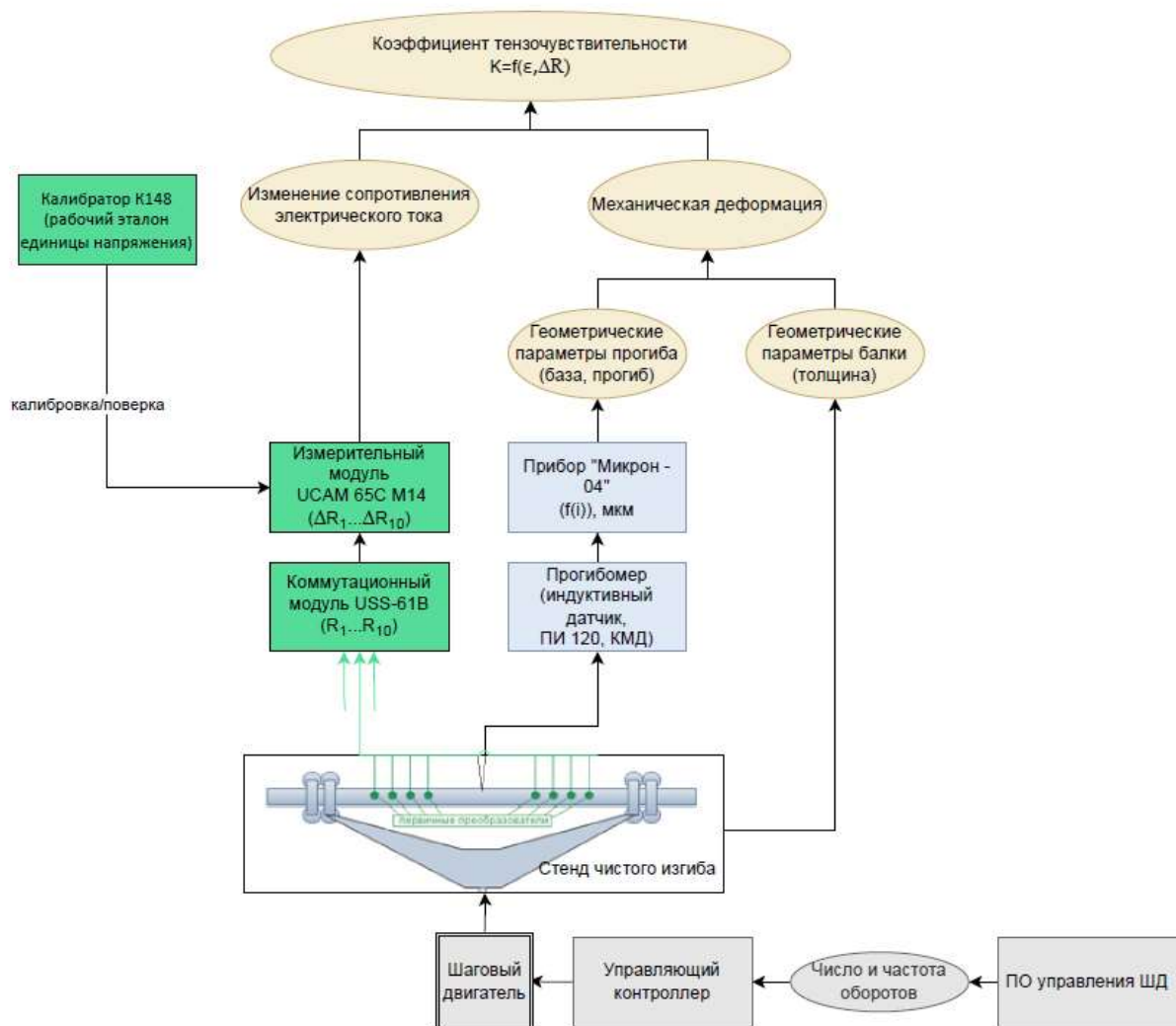


Рисунок 3.3 – Функциональная схема установки

Таблица 3.1 - Основные метрологические и технические характеристики системы сбора данных UCAM-65C M14

Наименование характеристики	Значение	
	Диапазон измерений, мкм/м	от минус 50000 до 50000
Цена единицы младшего разряда, мкм/м	1	10
Пределы допускаемой погрешности, мкм/м	$\pm(0,0005 \cdot X + 1 \text{ е.м.р.})$	$\pm(0,0005 \cdot X + 10 \text{ е.м.р.})$
Схемы подключения (при номинальном значении сопротивления тензорезистора, Ом)	$\frac{1}{4}$ мост (120, 240, 350); $\frac{1}{4}$ мост с термокомпенсацией (120, 240); $\frac{1}{2}$ мост (60-1000); полный мост (60-1000)	
Напряжение питания моста постоянного тока, В	2, 5	
Сила постоянного электрического тока питания моста, мА (при номинальном значении сопротивления тензорезистора, Ом)	5,7 (350); 16,7 (120)	

В конфигурации измерительной системы, сформированной на базе системы сбора данных UCAM 65C M14, модуля сбора данных USS-61B и программного обеспечения UCS-60B возможна реализация двух методов температурной компенсации при измерениях изменения сопротивления единичных тензорезисторов:

- метод программной компенсации;
- метод общей компенсации,

что в свою очередь определяет возможность применения схемы измерений «полумост с одним компенсационным на группу активных тензорезисторов».

Программная компенсация заключается в том, что один компенсационный тензорезистор расположен в группе в тех же условиях, что и активные датчики, имеет такой же температурный режим и режим измерений соответствует режиму для активных датчиков. Результаты измерений сигналов компенсационного тензорезистора записываются в память и с помощью математического аппарата вносятся корректировки в результаты измерений сигналов активных датчиков. Таким образом осуществляется компенсация влияния температуры нескольких активных тензорезисторов одним компенсационным тензорезистором. Схема подключения тензорезисторов в случае применения программной компенсации приведена на рисунке 3.4.

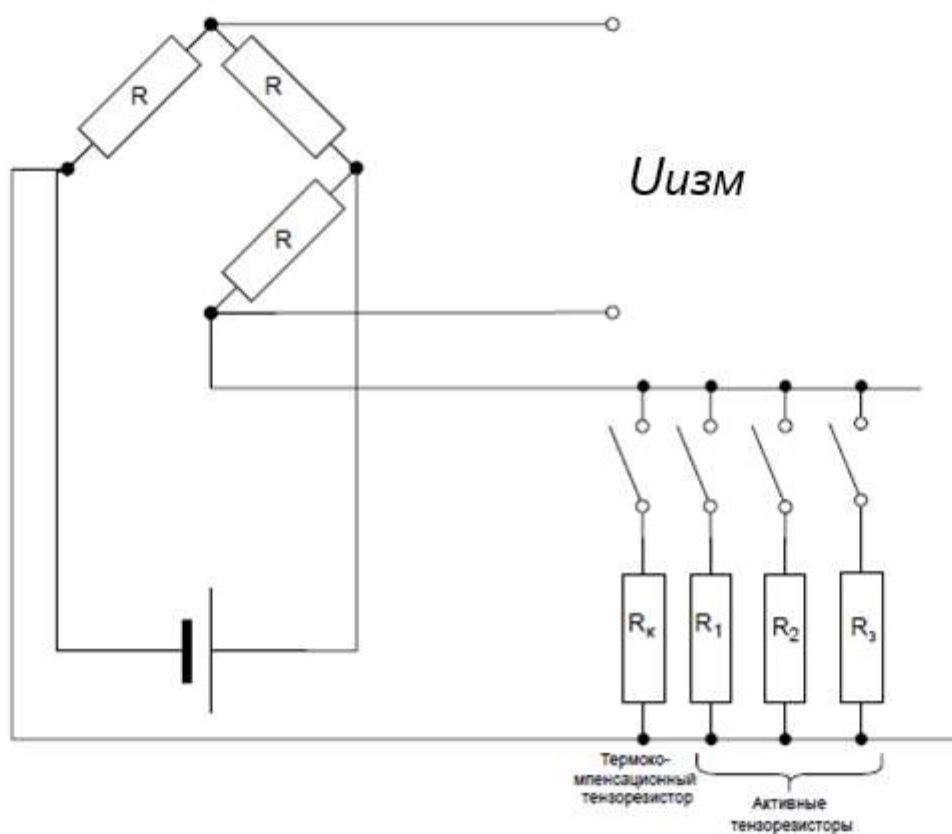


Рисунок 3.4 – Метод программной компенсации

При общей компенсации активные тензорезисторы подключены последовательно и напряжение тока возбуждения моста приложено только во время измерений, в то время как напряжение тока питания моста приложено к компенсационным тензорезисторам при каждом измерении. Недостатком данной схемы является различный уровень нагрева активного и компенсационных тензорезисторов. Схема подключения тензорезисторов в случае применения общей компенсации приведена на рисунке 3.5.

Система сбора данных UCAM-65C M14 предусматривает также возможность температурной компенсации, связанной с линиями связи - трехпроводная схема соединений.

Для обеспечения работы с группой первичных преобразователей предусмотрен 10-канальный внутренний модуль сбора данных USS-61B, с периодом выборки 50 мс на канал (стандартный режим), а также с уменьшенным периодом выборки 20 мс на канал в высокоскоростном режиме и 280 мс на канал в режиме высокого разрешения для каждого отдельно выбранного канала внутреннего модуля сбора данных. Режимы измерений, предусматривающие использование различного периода выборки или скорости измерений, позволят рассмотреть возможность использования системы сбора данных UCAM 65C M14 для исследований времени и качества реакции тензорезисторных преобразователей на ступенчатый входной сигнал деформации.

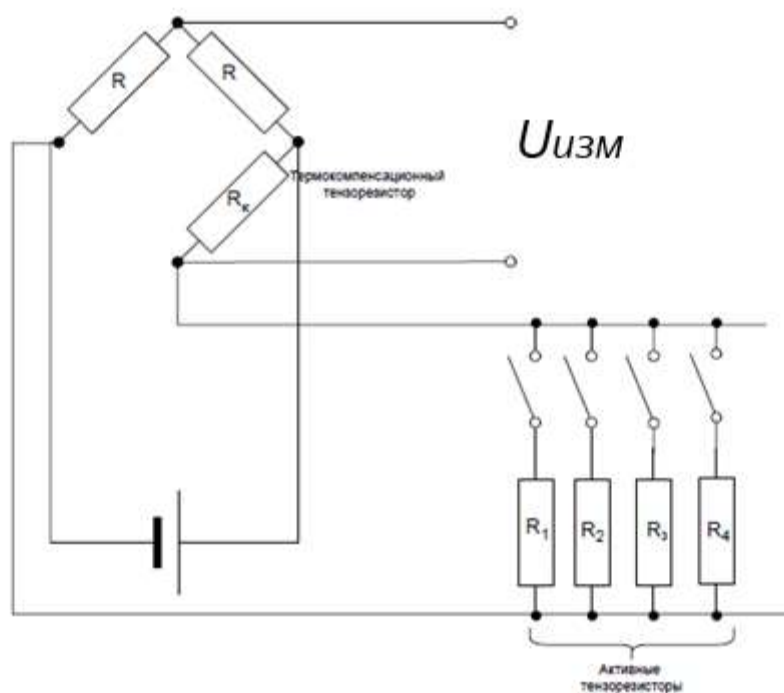


Рисунок 3.5 – Метод общей компенсации

Для периодического контроля метрологических характеристик системы сбора данных применяется калибратор К148, позволяющий задавать калиброванные значения сигналов, имитирующие выходные сигналы тензорезисторов.

Общий вид установки воспроизведения единицы деформации представлен на рисунке 3.6, характеристики используемого при измерении деформации оборудования в таблице 3.2.

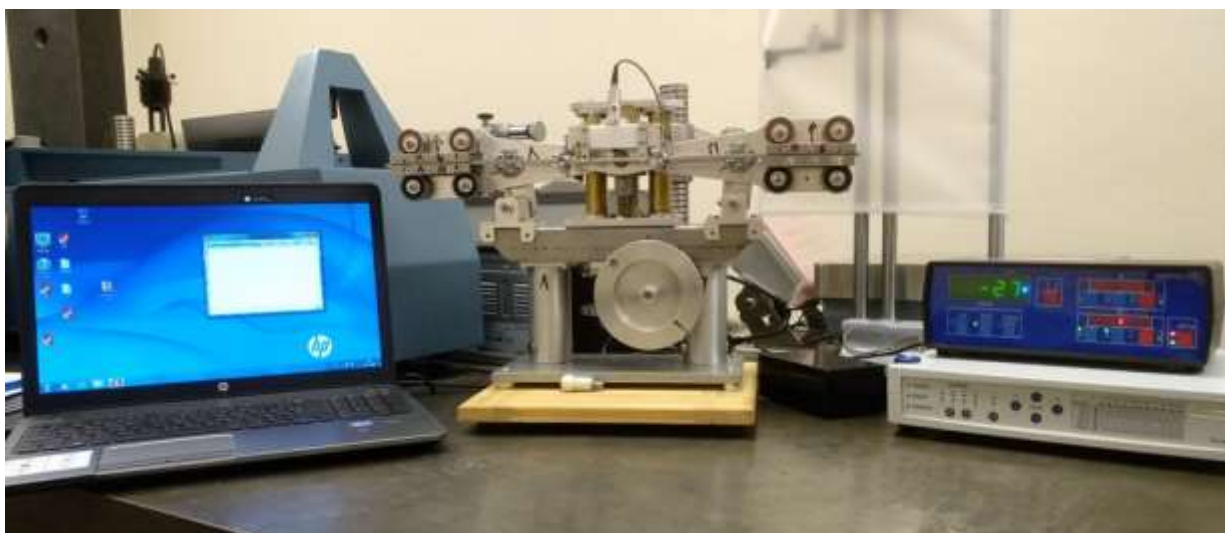


Рисунок 3.6 – Установка воспроизведения единицы деформации – общий вид

Таблица 3.2 – Описание оборудования

Наименование оборудования	Технические и метрологические характеристики
Стенд чистого изгиба	Скорость деформирования балки от 5 до 55 мм/мин; ускорение штока при разгоне и торможении от 0,001 до 0,090 мм/с ² . Прогибомер с номинальной базой 80 мм.
Государственный эталон единицы длины 3 разряда в диапазоне значений от 0 до 150 мм – Микроскоп инструментальный ИМЦ 150×50Б.	Диапазон измерений длины 150 мм. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений длины от ±3 до ±7 мкм.
Государственный эталон единицы длины 3 разряда в диапазоне значений от 0,5 до 100 мм рег. № 3.1.ZZC.0073.2012 – меры длины концевые плоскопараллельные образцовые 3-го разряда	Диапазон измерений длины от 0,5 до 100 мм; Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений длины $\delta=(0,1+1 \cdot L)$ мкм.
Пластина плоская стеклянная ПИ 120	Отклонение рабочих поверхностей от плоскостности не более 0,09 мкм
Оптиметр электронный горизонтальный ИКГ–3э	Диапазон измерений от 0 до 500 мм, $\Delta=\pm 0,3$ мкм.
Государственный первичный специальный эталон длины в области измерений отклонений от прямолинейности ГЭТ 130–2019	Диапазон измерений от 0 до 50 мкм, $U(k=2)=0,2 \cdot L$ мкм/м.
Термогигрометр CENTER-313	Диапазон измерений температуры от минус 20 до 60 °С, $\varepsilon=\pm 0,7^{\circ}\text{C}$; Диапазон измерений влажности от 10 до 100 %, $\Delta=\pm 2,5$ %.
Прибор для поверки концевых мер длины «Микрон–04»	Диапазон измерений от 0 до 1000 мкм, Δ от ±0,06 до ±6 мкм
Линейка измерительная металлическая	Длина 500 мм, $\Delta=\pm 0,1$ мм.

Разработанный стенд чистого изгиба и реализованная на его базе установка воспроизведения единицы деформации позволят обеспечить 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, которые подтверждены теоретическими и экспериментальными исследованиями. Результаты экспериментальных исследований представлены в приложении Б. Предусмотренная в составе установки аппаратная часть, реализующая измерение связанных электрических величин, позволит обеспечить передачу единицы деформации первичным преобразователям деформации (тензорезисторам) с установленной прослеживаемостью.

3.2 Проблемы экспериментального подтверждения эквивалентности установки воспроизведения деформации аналогичным установкам иностранных государств

Экспериментальное подтверждение эквивалентности *установки воспроизведения деформации* аналогичным эталонам иностранных государств провести не представляется возможным за отсутствием данных об существовании аналогичных установок в ранге эталонов за рубежом.

В настоящее время данный вид измерений в базе данных МБМВ не представлен, за исключением температурного расширения материалов.

Тем не менее, в проведенных сличительных исследованиях принимал участие производитель тензорезисторов «Zhonghang Electronic Measuring Instruments Co., LTD», Китай (ZEMIC), чья установка признана первичной военным ведомством страны.

Так как непосредственное сличение результатов измерений деформации, воспроизводимой и измеряемой на разных установках воспроизведения деформации нереализуемо, то в качестве образцов сличений были использованы средства измерений деформации (тензорезисторы), коэффициент чувствительности которых был определен с использованием методик измерений деформации, входящих в состав установок воспроизведения деформации.

Образцы сличений были представлены двумя группами одиночных тензорезисторов по 12 штук производства Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), Германия и Zhonghang Electronic Measuring Instruments Co., Китай с присвоенными обозначениями: TP-01/2019-1 (HBM) и TP-01/2019-2 (ZEMIC).

Однородность образцов сличений 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) [80], т.е. тензорезисторы из одной партии, с одинаковым номинальным сопротивлением и коэффициентом чувствительности, согласно паспорту производителя.

До отправки образца были измерены геометрические и электрические характеристики тензорезисторов, которые оказывают влияние на коэффициент чувствительности. По результатам исследований [81] значимых (более 0,05 %) отклонений сопротивления тензорезисторов и размеров решетки от средних значений не было выявлено.

Графическое представление результатов определения коэффициента чувствительности образца сличений каждым участником представлено на рисунке 3.6.

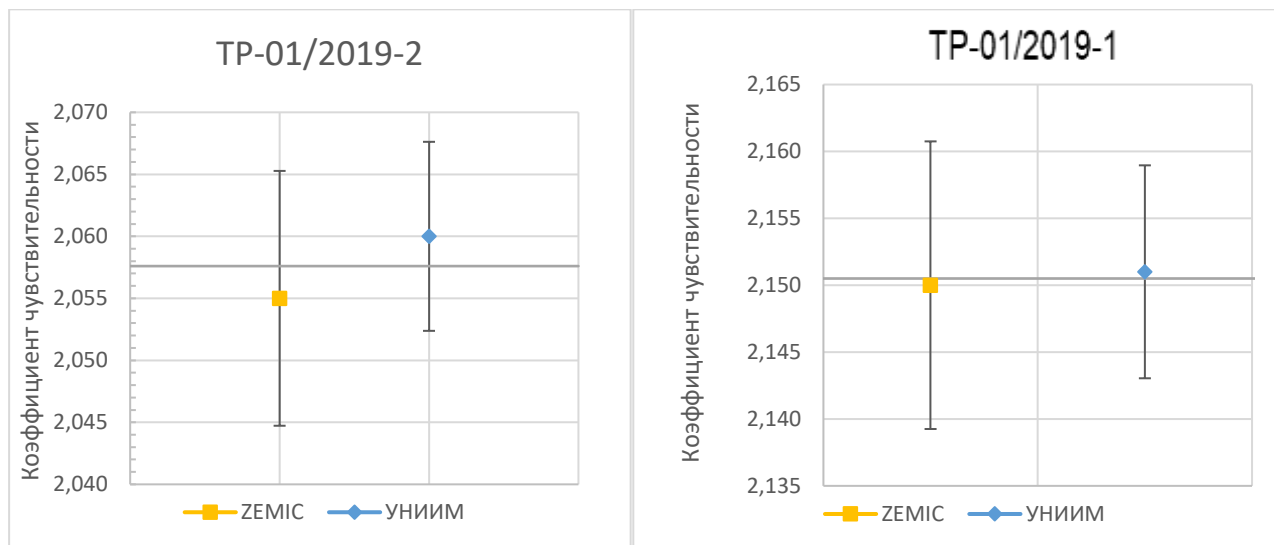


Рисунок 3.7 – Графическое представление результатов определения коэффициентов чувствительности образцов сличений (тензорезисторов) участниками сличительных испытаний

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

3.3 Подтверждение наивысшей точности результатов измерений

При разработке методики измерений учитывались требования к характеристикам установки высшей точности, приведенные в поверочной схеме, изложенной в ГОСТ 8.543–86 [82]:

- диапазон значений деформации, воспроизводимых установкой высшей точности, составляет от минус 3000 до 3000 млн^{-1} ;
- воспроизведение единицы деформации со средним квадратическим отклонением результата измерений, не превышающим $7 \cdot 10^{-4}$ при 10 независимых наблюдениях;
- неисключенная систематическая погрешность не превышает $9 \cdot 10^{-4}$.

Результаты сравнения характеристик установки высшей точности и установки воспроизведения деформации представлены в таблице Б.32 и на рисунке 3.7.

Анализ представленных данных позволяет сделать вывод о возможности применения предлагаемой методики измерений для измерения деформации на уровне, соответствующем наивысшей точности. При этом диапазон измеряемых значений деформации на установке

воспроизведения деформации превышает границы, установленные в поверочной схеме ГОСТ 8.543–86.

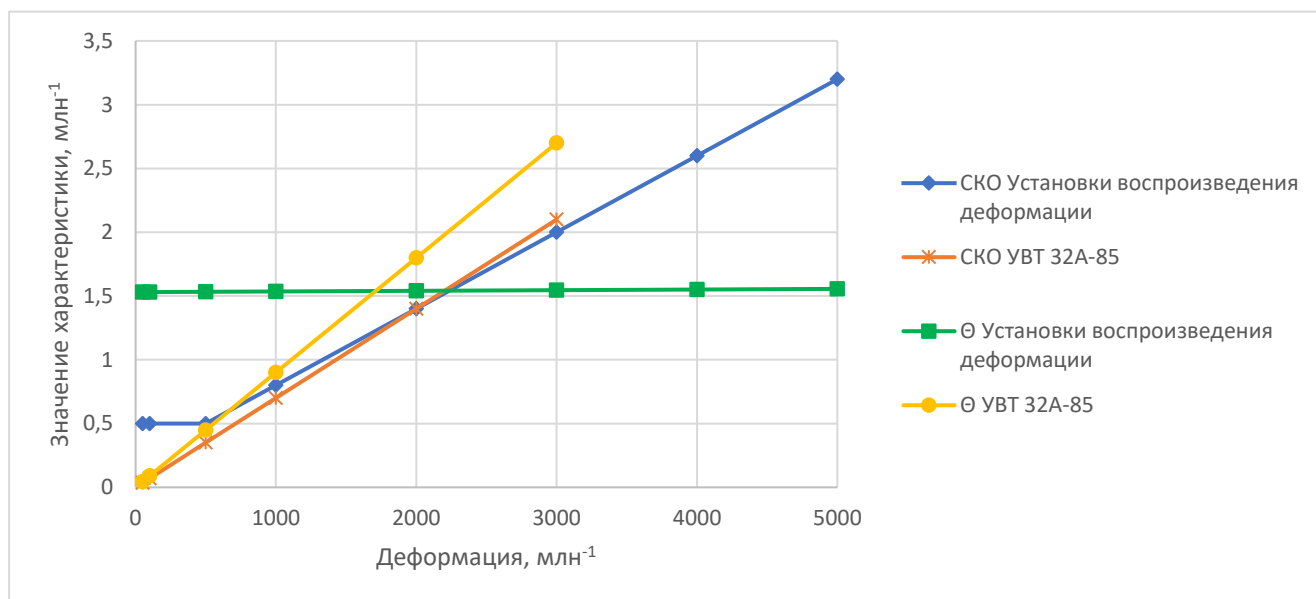


Рисунок 3.8 - Сравнение характеристик погрешности установки воспроизведения единицы деформации и УВТ 32А–85

Имеющиеся средства измерений деформации, при калибровке которых может быть использована установки воспроизведения единицы деформации, имеют пределы допускаемой относительной погрешности от 0,2 % до 2 % [83]. Так как существующая ГПС, изложенная в ГОСТ 8.543-86 [82], не соответствует требованиям Федерального закона № 102-ФЗ [84], установки воспроизведения единицы деформации должна обеспечить метрологическое обеспечение уже предусмотренных в ГОСТ 8.543-86 [82] образцовых средств измерений (ОСИ). Пределы допускаемых относительных погрешностей ОСИ I разряда составляют $\pm 0,5\%$ в диапазоне от минус 3000 до 1000 и свыше 1000 до 3000 млн⁻¹ и $\pm 0,8\%$, в диапазоне свыше минус 500 до 500 млн⁻¹. В диапазоне измерений свыше 1500 до 3000 млн⁻¹ обеспечен более чем двукратный запас по точности, в диапазоне измерений от 10 до 1500 млн⁻¹ для ОСИ I разряда по ГОСТ 8.543-86 нормирована относительная погрешность для диапазона измерений около нулевых значений деформации, что дает основание предполагать некорректность установленных требований и необходимость их пересмотра.

Выводы по главе 3

Разработана и создана установка для воспроизведения единицы механической деформации, которая позволяет обеспечить 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, которые подтверждены теоретическими и экспериментальными исследованиями. Предусмотренная в составе установки аппаратная часть, реализующая измерение связанных электрических величин, обеспечит передачу единицы величины первичным преобразователям деформации (тензорезисторам) с установленной прослеживаемостью.

Подтверждена наивысшая точность в Российской Федерации результатов измерений, деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба. Абсолютная погрешность измерений деформации при доверительной вероятности $P=0,95 \pm 3,6 \text{ млн}^{-1}$ в диапазоне от минус 500 до 500 включ. млн^{-1} и $\pm(2,8+9 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon)$ в диапазоне от минус 5000 до минус 500 и св. 500 до 5000 млн^{-1} .

ГЛАВА 4. СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ ДЕФОРМАЦИИ СРЕДСТВАМ ИЗМЕРЕНИЙ И РАБОЧИМ ЭТАЛОНАМ

В соответствии со статьей 2 Федерального закона от 26.06.2008 № 102-ФЗ создание исходного эталона единицы деформации и разработка локальной поверочной схемы являются необходимым этапом для решения поставленной задачи — обеспечения прослеживаемости результатов измерений деформации.

4.1 Определение организационно-технических и структурных параметров поверочной схемы

Для расчета организационно-технических, структурных и экономических параметров поверочной схемы согласно принципу многокритериальности [85], использованы следующие методики расчета:

- достаточность количества эталонов на каждой ступени поверочной схемы, определяется номенклатурой средств измерений и соответствующих ей методов передачи единицы согласно МИ 2230–92 [86];

- расчет структурных параметров путем определения области максимально допустимых и минимально возможных ступеней передачи размера единиц согласно стандартной методике МИ 83–76 Государственная система обеспечения единства измерений. Методика определения параметров поверочных схем [87].

Расчет показателей эффективности функционирования поверочной схемы (количество необходимого эталонного оборудования для поверки средств измерений данной поверочной схемы, рабочих мест поверителей, интенсивность поступления заявок в рабочую поверочную схему, необходимость создания резервного фонда) не производится по причине децентрализованной организации поверочных работ в условиях рыночной экономики.

В качестве информационной основы для разработки локальной поверочной схемы для средств измерений деформации приняты [78, 57 – 59, 68], ASTM E83-2016 – Standard Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems, ISO 9513-2013 – Metallic materials - Calibration of extensometer systems used in uniaxial testing.

Исходя из численности парка средств измерений и запаса по точности 1/2 схема может содержать до 4 ступеней передачи. Число ступеней обусловлено широким диапазоном точностных требований к средствам измерений с одной стороны и сложностью и дороговизной высокоточных установок с другой, а также потребностью предприятий,

использующих средства измерений деформации в наличии собственных эталонов, удовлетворяющих потребности исключительно в части исследований применяемых средств измерений на предприятии.

4.2 Разработка документации, устанавливающей статус и состав исходного эталона единицы деформации и правила его применения

В соответствии со статьей 2 Федерального закона от 26.06.2008 № 102-ФЗ, передача единицы величины – то есть приведение единицы величины, хранимой средством измерений, к единице, воспроизводимой или хранимой эталоном данной единицы величины, имеющим более высокие показатели точности установка воспроизведения единицы деформации, средства измерений и вспомогательное оборудование должны быть аттестованы в качестве исходного эталона деформации, состав и метрологические характеристики (подтвержденные в разделе 3) приведены в таблицах 4.1 - 4.2.

Таблица 4.1 – Состав эталона

№	Наименование	Тип	Регистрационный номер в ФГИС «АРШИН»	Зав. номер
1	Установка эталонная для воспроизведения единицы деформации	-	-	01
2	Меры длины концевые плоскопараллельные образцовые	(0,5 -100) мм	9771–84	9603
3	Пластина плоская стеклянная	ПИ 120	197–49	5883

Таблица 4.2 – Метрологические характеристики эталона

Диапазон измерений деформации, млн ⁻¹	Границы абсолютной погрешности при доверительной вероятности P=0,95, ±δ, млн ⁻¹	Расширенная неопределённость при коэффициенте охвата k=2, U _p , млн ⁻¹
от -500 до 500 вкл.	3,6	3,6
от - 5000 до -500 и св. 500 до 5000	2,8+9·10 ⁻⁴ ·ε	2,8+9·10 ⁻⁴ ·ε
* ε – результат измерений деформации без учета знака, млн ⁻¹		

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

В процессе аттестации исходного эталона единицы деформации были разработаны следующие нормативные документы:

- методика первичной аттестации;

- паспорт исходного эталона единицы деформации;
- правила содержания и применения исходного эталона единицы деформации;
- протокол программы и методики испытаний в целях аттестации исходного эталона единицы деформации;
- свидетельство об аттестации исходного эталона единицы деформации.

4.3 Обоснование принципов воспроизведения единицы деформации рабочими эталонами

Для эффективного функционирования поверочной схемы средств измерений деформации, охватывающей парк около 3000 СИ при точностном запасе до 1:2, требуется иерархическая структура, содержащая от 2-х до 5-ти ступеней. Ключевым элементом, обеспечивающим практическую реализацию данной схемы и передачу размера единицы на всех её ступенях, являются рабочие эталоны, которые должны обеспечивать передачу единицы деформации средствам измерений в диапазоне измерений от 3000 млн⁻¹ до 10000 млн⁻¹ с погрешностью от 0,5 % до 6 %.

Выбор и обоснование конкретных принципов действия и конструкций рабочих эталонов должен обеспечить выполнение требований поверочной схемы, разработанной на основе анализа зарубежных и отечественных стандартов [57 – 59, 88]. Можно выделить три основных принципа воспроизведения и передачи размера единицы деформации, каждый из которых определяет конструкцию и метрологические возможности эталона:

- на основе изгиба балки постоянного сечения по схеме чистого изгиба;
- на основе изгиба балки равного сопротивления изгибу;
- на основе сличения с показаниями экстензометра, установленного на балке, подвергающейся растяжению.

Целью данного раздела является сравнительный анализ этих принципов, оценка их соответствия расчетным параметрам поверочной схемы (в части точности, производительности и диапазона измерений) и формирование обоснованных предложений по структуре парка рабочих эталонов для средств измерений полного поля.

4.3.1 Установки с балками постоянного сечения

Установки с балками постоянного сечения, используемые в качестве эталонных, имеют широкое распространение в мировой практике и позволяют обеспечить прослеживаемость результатов измерений деформации к исходным эталонам длины [88], требования к таким установкам можно найти в стандартах ASTM E251 92(2009),

AIA/NAS 942 1964, BS 6888:1988 [57 - 59]. Возможные варианты конструктивных решений и требований к их реализации в соответствии с вышеуказанными стандартами приведены в пункте 1.3.2. По состоянию на 2019 г. в Государственном реестре СИ было зарегистрировано три установки: установка эталонная для градуировки приклеиваемых тензорезисторов СибНИА (рег. № ФИФ 34927–07), установка воспроизведения и измерения деформации УВИД–3000 (рег. № ФИФ 58104–14) и установка для измерений деформации автоматизированная УВД-А (рег. № ФИФ 46424–11). Для всех установок при внесении в Государственный реестр СИ был предусмотрен метод косвенных измерений при передаче единицы от эталонов длины, так как построение градуировочной характеристики невозможно, а применение на практике основывается на расчетном значении деформации верхних (нижних) волокон, с использованием уравнения (2) [89]. Характеристики установок приведены в таблице 4.3. В 2019 году на испытания в целях утверждения типа была представлена установки чистого изгиба УТ-66, для нее была разработана и аттестована методика измерений, в соответствии с требованиями Федерального закона № 102-ФЗ [84] утвержден тип средства измерений, реализующего косвенные измерения деформации. Опыт испытаний показал необоснованно трудоемкие испытания и порядок эксплуатации установки чистого изгиба УТ–66 наряду с посредственными характеристиками. Таким образом, для установок с балками постоянного сечения была подтверждена необходимость создания исходного эталона и разработки методики сличений с ним.

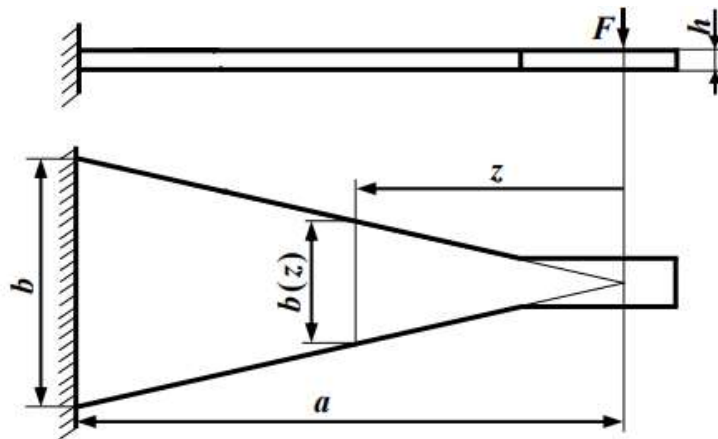
Таблица 4.3 Анализ характеристик установок с балками чистого изгиба

Наименование (рег. № ФГИС «АРШИН» или стандарт)	Верхний предел измерений	Пределы допускаемой погрешности
Установка эталонная для градуировки приклеиваемых тензорезисторов СибНИА (рег. № 34927-07)	до 5000 млн ⁻¹	±2 %
Установки воспроизведения и измерения деформации УВИД-3000 (рег. № 58104-14)	до 3000 млн ⁻¹	От 1 % до 1,5 %
Установка для измерений деформации автоматизированная УВД-А (рег. № 46424-11)	до 3000 млн ⁻¹	±0,2 %
Установка чистого изгиба УТ-66 (рег. № 81751-21)	до 1000 млн ⁻¹	От ±[8+0,004ε+0,05·Т] до ±[8+0,004ε+0,007·Т]
Установка чистого изгиба ASTM E251-20	Нет данных	Контроль точности с помощью экстензометра класса А
Установка чистого изгиба AIA/NAS 942 1964	Нет данных	±5 млн ⁻¹
Установка чистого изгиба BS 6888:1988	Нет данных	±1 млн ⁻¹

4.3.2 Установки с балками равного сопротивления изгибу

ГОСТ 8.543–86 [82] использование установок с балками равного сопротивления в качестве рабочих эталонов не предусматривалось. Балки равного сопротивления изгибу (далее по тексту БРС) благодаря простоте кинематической схемы и отсутствию сложных опор трения-качения, небольшим размерам могут быть размещены в камерах, воспроизводящих специальные условия эксплуатации для исследований средств измерений в условиях, отличных от нормальных. К преимуществам БРС можно также отнести высокие показатели надежности и, соответственно возможность применения БРС в стендах на испытания на цикловую усталость, а относительная дешевизна их изготовления делает их доступными в качестве средств входного контроля на предприятиях [90].

Основным элементом установок с БРС является балка прямоугольного сечения с консольным нагружением, момент инерции сечения которой пропорционален изгибающему моменту (удалению от точки приложения силы) при постоянной по длине толщине. Тогда рабочая область балки представляет собой треугольник с вершиной в точке приложения силы (рисунок 4.1).



z – расстояние от точки приложения нагрузки до искомого сечения, мм; a – расстояние от заделки до точки приложения нагрузки, мм; b – ширина широкого края балки, мм;
 h – толщина балки, мм; F – нагрузка, Н

Рисунок 4.1 Принципиальная схема БРС

Возможность применения балок равного сопротивления изгибу в качестве рабочих эталонов деформации описана в [90]. По результатам анализа модели изгиба и конструкции балки равного сопротивления. Определены основные факторы, оказывающие влияние на результат измерений деформации: наличие сил контактного трения, неоднородность свойств материала, особый характер приложения нагрузки (изгиб, кручение, наличие остаточных напряжений в теле, геометрические параметры градуировочной балки, ориентация первичных преобразователей на балке, приложение изгибающей нагрузки,

измерение прогиба и смещения нейтрального слоя). Простота кинематики БРС, обеспечивающая её эксплуатационные преимущества, не распространяется на математическую модель, характеризующуюся высоким уровнем сложности. В 2022 – 2023 гг. экспериментально исследованы способы формирования однородного поля деформации по длине рабочего участка балки, а также возможность применения балок равного сопротивления изгибу в качестве рабочих эталонов деформации. Проанализированы модель изгиба и конструкция балки равного сопротивления изгибу, параметры, входящие в уравнение измерения и связанные с методическими факторами, а также основные причины неравномерности деформационного поля БРС при определении характеристик первичных преобразователей деформации. По результатам эксперимента оценены отклонения показаний первичных преобразователей, расположенных вне осевого сечения балки при ориентации вдоль ее оси и вдоль силовых линий, сходящихся в точке приложения нагрузки. Таким образом, установление метрологических характеристик БРС с помощью компаратора с установленными характеристиками на балках чистого изгиба позволит:

- выявить разницу деформации верхних и нижних волокон,
- определить отклонения при ориентации первичных преобразователей для реальной разметки балки,
- определить поправки для каждой ступени нагружения.

4.3.3 Экстензометры

На сегодняшний день широкого распространения метод сличения с показаниями экстензометра, установленного на балке, подвергающейся растяжению, не нашел в силу недостаточной изученности.

Проведенный анализ показывает, что предпочтительной для состава парка рабочих эталонов является комбинация установок на базе балок постоянного сечения и БРС. Такое решение позволяет создать многоуровневую систему, где каждый тип эталонов применяется в соответствии со своими метрологическими и эксплуатационными преимуществами. Установленные принципы воспроизведения единицы и структура парка эталонов служат основой для выбора методов передачи единицы, которые в свою очередь определяют технические характеристики и допустимые погрешности для рабочих эталонов и средств измерений, указываемые в поверочной схеме, и параметры их методик поверки.

4.4 Методы передачи единицы рабочим эталонам деформации

От исходного эталона возможны следующие методы передачи единицы физической величины – деформации рабочим эталонам, предусмотренным пунктом 3.3 настоящей работы, учитывая их конструкцию и принципы действия:

- 1) метод косвенных измерений с аттестацией предусмотренной методики с применением ФР.ПР1.27.2019.00010 «Государственная первичная референтная методика измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба»;
- 2) метод прямых измерений;
- 3) метод сличения при помощи компаратора.

Метод косвенных измерений применим к установкам чистого изгиба и предполагает поэлементную поверку установок чистого изгиба, в данном случае установки прослеживаются к эталонам длины. Поэлементная поверка базируется на анализе функциональной зависимости деформации от параметров изгиба балки и условиях их применения. Составляющие погрешности суммируются со своими весовыми коэффициентами, и получаемая оценка погрешности воспроизведения единицы деформации интегральна и учитывает проявление всей совокупности влияющих факторов, что маловероятно при реальных измерениях, то есть поэлементная поверка дает верхнюю границу значения относительной погрешности измерений деформации. Однако, при поэлементной поверке практически невозможно оценить: распределение поля деформации в рабочей зоне балки; влияние механизма нагружения; несимметричность нагружающих роликов относительно нагружающих опор; неравенство расстояния между нагружающими роликами; непараллельность нагружающих роликов; неодновременное прилегание нагружающих роликов к балке; непараллельность образующих прилегающих роликов поверхности балки; приложение усилия к балке не в точке, а на площади или линии; неоднородность материала; несимметричность прогибомера.

В 2020 году была разработана методика измерений для установки чистого изгиба УТ–66 «Установка для измерений деформации УТ–66М. Методика измерений деформации поверхности балки. М.233.02/2020» и аттестована с применением ГПРМИ деформации (свидетельство об аттестации № 22200130/RA.RU.311866/2019) в рамках испытаний с целью утверждения типа (рег. № ФИФ 81751-21). В отсутствие исходного эталона была обеспечена прослеживаемость единицы физической величины, однако у данного подхода выявлены следующие ограничения, препятствующие его дальнейшему распространению:

- трудоемкость;

– подтверждаемые метрологические характеристики имеют ограничения по точности;

– установленные законодательными актами и нормативными документами процедуры испытаний и аттестации методики измерений, применяемых для средства измерений утверждаемого типа имеют нормативно установленную последовательность, усложняющую практическую реализацию данного подхода.

При разработке локальной поверочной схемы использование данного метода не предусматривается и, соответственно, не предусмотрена передача единицы деформации от заимствованных эталонов.

Метод сличения при помощи компаратора применим к установкам с балками, деформируемыми по схеме чистого изгиба, и установкам с БРС. В качестве компаратора используются первичные преобразователи – тензорезисторы и системы сбора данных. К тензорезисторам, используемым в качестве компаратора предъявляются следующие требования: тензорезисторы должны быть изготовлены из материалов, принадлежащих к партиям, изготовленным одним технологическим запуском. Неприемлемо применять для тензорезисторов из состава компаратора фольгу, клей и другие материалы из разных плавок, упаковок и так далее. Не допускаются вмятины и инородные тела в подложке, искривление шин и выводных проводников, цветовая неравномерность подложки и поверхности шин, изломы и искривление подложки с радиусом менее 10 мм. Уменьшение или увеличение ширины шины на величину более 20 % от средней ширины шины. Пайка выводных проводников должна иметь гладкую блестящую поверхность, не допускаются видимые под микроскопом при десятикратном увеличении инородные включения в паянном соединении. Расстояние от кромки рамки тензорезистора до кромки подложки должно быть не менее 1 мм. Различие по толщине подложки в партии тензорезисторов не должно превышать 10 %. Разброс сопротивления тензорезисторов в партии не должен превышать 0,1 Ом. Основными составляющими погрешности, обусловленными методом передачи с помощью компаратора, являются:

– дополнительная погрешность, обусловленная неравномерностью

воспроизведения деформационного поля исходного поля: $\delta_{\xi j 1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\xi_{ij} - \bar{\xi}_{ij})^2}{N \cdot (N-1)}}$,

где ξ_{ij} – выходной сигнал тензорезистора для ступени j и канала i , млн⁻¹ (мкОм/Ом); $\bar{\xi}_{ij}$ – среднее арифметическое значение выходного сигнала тензорезистора для ступени j по всем каналам, млн⁻¹ (мкОм/Ом); N – число каналов;

- дополнительная погрешность, обусловленная повторяемостью измерений при воспроизведении единицы деформации $\delta_{\xi j 2} = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^L (\xi_j - \bar{\xi}_j)^2}{L \cdot (L-1)}}$, где ξ_j – выходной сигнал тензорезистора для ступени j , млн^{-1} , для нагружения l , $\bar{\xi}_j$ – среднее арифметическое значение выходного сигнала тензорезистора для ступени j , млн^{-1} , L – число нагружений;
- дополнительная погрешность, обусловленная погрешностью применяемой системы измерений сигналов тензорезисторов из состава исходного эталона (система сбора данных, пределы допускаемой погрешности измерений сигналов тензорезисторов составляют $\pm(0,0005 \cdot X + 1 \text{ е.м.р.})$, где X – результат измерений.

Расчетное значение погрешности метода передачи с помощью компаратора с учетом установленных ограничений $0,0005 \cdot \varepsilon \text{ млн}^{-1}$, где ε – измеряемая деформация, млн^{-1} .

Метод прямых измерений применим для оптических измерителей деформации, в том числе преобразователей деформации, монтаж которых возможен на рабочую грань балки приклеиванием или точечной сваркой. Рассмотренный метод в отчете RTD Standardization Project for Optical Techniques of Strain measurement (SPOTS) standard (Основные положения калибровки оптических систем для измерений деформации) [7] в рамках настоящей работы не применялся ввиду отсутствия доступа к спекловым интерферометрам, применяемым в качестве оптических измерителей деформации.

Построение локальной поверочной схемы с использованием метода сличения при помощи компаратора сочетает в себе прогнозируемую погрешность, практическую реализуемость и позволяет обеспечивать передачу единицы деформации от исходного эталона рабочим эталонам. Для передачи единицы деформации приклеиваемым (привариваемым) средствам измерений предусматривается метод прямых измерений.

4.5 Разработка локальной поверочной схемы

Для установок с балками постоянного сечения, нагружаемых по схеме чистого изгиба, предусмотрен способ поверки в соответствии с пунктом 1.4.2 МИ 2230–92. В качестве характеристик погрешности эталона определены пределы допускаемых доверительных границ погрешности $\delta_{\Sigma i}$ (с учетом нестабильности) при доверительной вероятности P_i .

Для рабочих эталонов P_i принята равной 0,95. Минимально допустимое значение предела допускаемой нестабильности v_{imin} определялось по методике [85]. Для вероятности в среднем ошибочного признания непригодным к дальнейшему применению действительности годных экземпляров $P_{qri} = (0,5 - 1) \%$, $v_{imin} = \frac{\delta_{\Sigma(i-1)}}{3}$. Пределы

допускаемых доверительных границ погрешности эталонов, рассчитанные согласно [86] в зависимости от ступени поверочной схемы, приведены в таблицах В.1 и В.2.

Для тензорезисторов и волоконно-оптических первичных преобразователей предусматривается поверка, при которой СИ признается непригодным к дальнейшему применению, если коэффициент чувствительности, приписанный производителем партии с учетом нормированного значения его среднего квадратического отклонения, не соответствует полученному при поверке (способ применяют при поверке СИ и рабочих эталонов, имеющих заводскую градуировочную характеристику (пункт 1.4.3 МИ 2230–92)). Регламентированные в поверочной схеме средства, методы и точность передачи размера единицы физической величины являются основой при разработке методик поверки. Соблюдение требований методик поверки должно обеспечивать достоверность поверки, которая определяется вероятностью ошибочного признания годным любого в действительности непригодного к дальнейшему применению экземпляра СИ и вероятностью ошибочного признания непригодным к дальнейшему применению в действительности пригодного экземпляра СИ.

В качестве методической основы для оценки критериев достоверности методов поверки средств измерений деформации использованы документы МИ 187–86 и МИ 188–86 [91, 92]. Результаты расчета возможных характеристик эталонов приведены в таблице В.1, пределов допускаемых погрешностей средств измерений в таблице В.2.

Отношение границ контрольного допуска при поверке к пределу допускаемой погрешности средств измерений установлено $\beta = 0,8$, что обеспечивает снижение вероятности ошибочного признания годным непригодного средства измерений $P_{\text{зам}}$ с 0,5 ($\beta = 1,0$) до 0,12.

На рисунке 4.2 представлена возможная структура поверочной схемы.

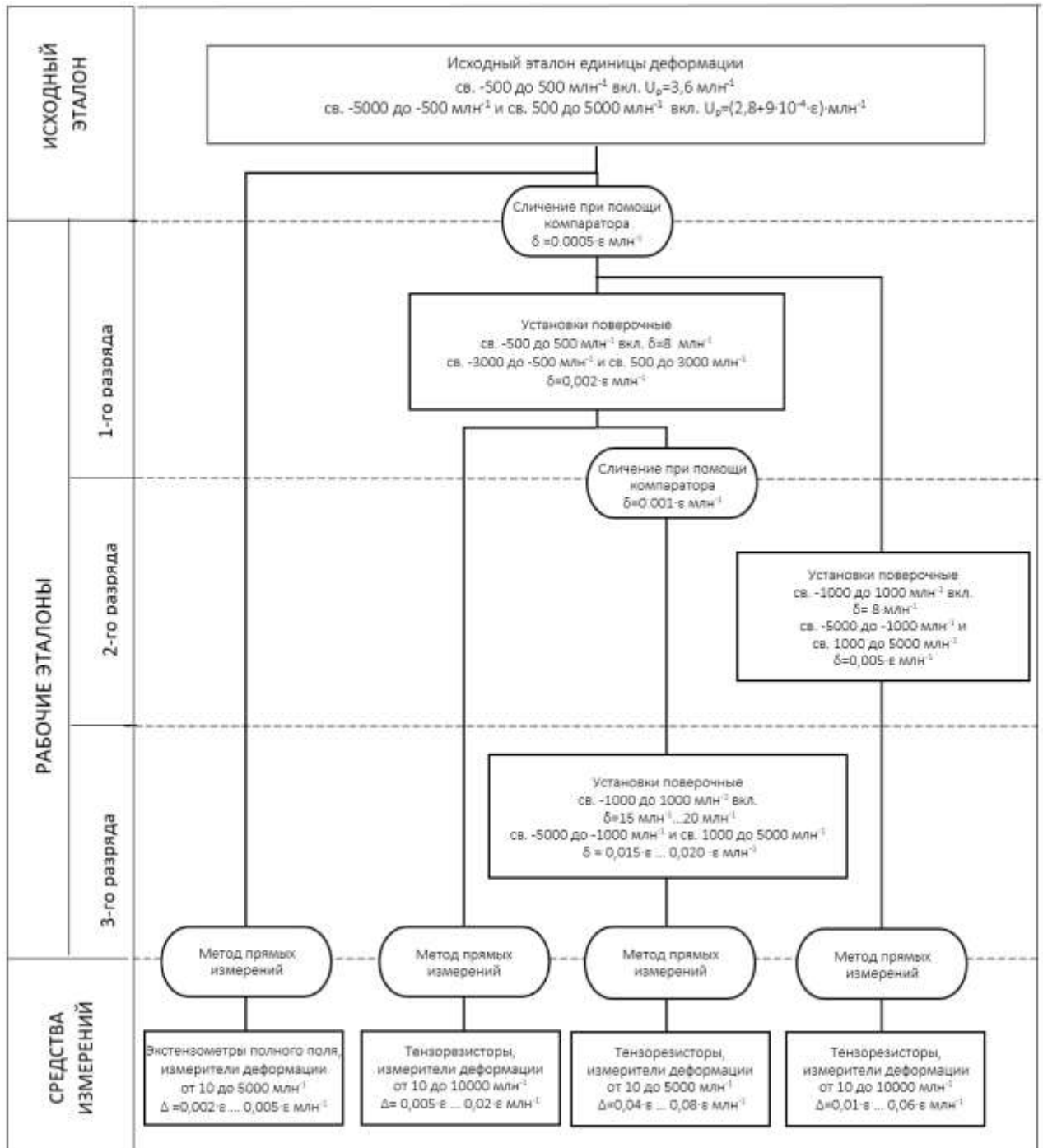


Рисунок 4.2 – Структура локальной поверочной схемы

4.6 Эталоны, предусмотренные локальной поверочной схемой для средств измерений деформации, принцип работы которых основан на измерении перемещений

В части «Краткий обзор СИ деформации» выделен класс, включающий анализ СИ деформации, принцип действия которых основан на измерении относительного перемещения двух точек исследуемого объекта, составляющих базовую длину, которые не отражены в существующих государственных поверочных схемах. Средства измерений

представлены экстензометрами, используемыми преимущественно при одноосных испытаниях. Распространяемость метода одноосных испытаний на широкий спектр конструкционных материалов (металлы, композиты, пластмассы, полимеры и др.) обуславливает необходимость формулирования дополнительных требований к условиям применения средств измерений. Экстензометры можно классифицировать по ряду признаков: функциональному назначению, степени автоматизации, области применения, точности, конструктивным особенностям [2, 97]. Обобщенно классификацию экстензометров можно представить в виде блок-схемы, представленной на рисунке 4.5. В блок-схеме не отражены экстензометры, разрабатываемые для применения в специальных условиях [94 – 96].

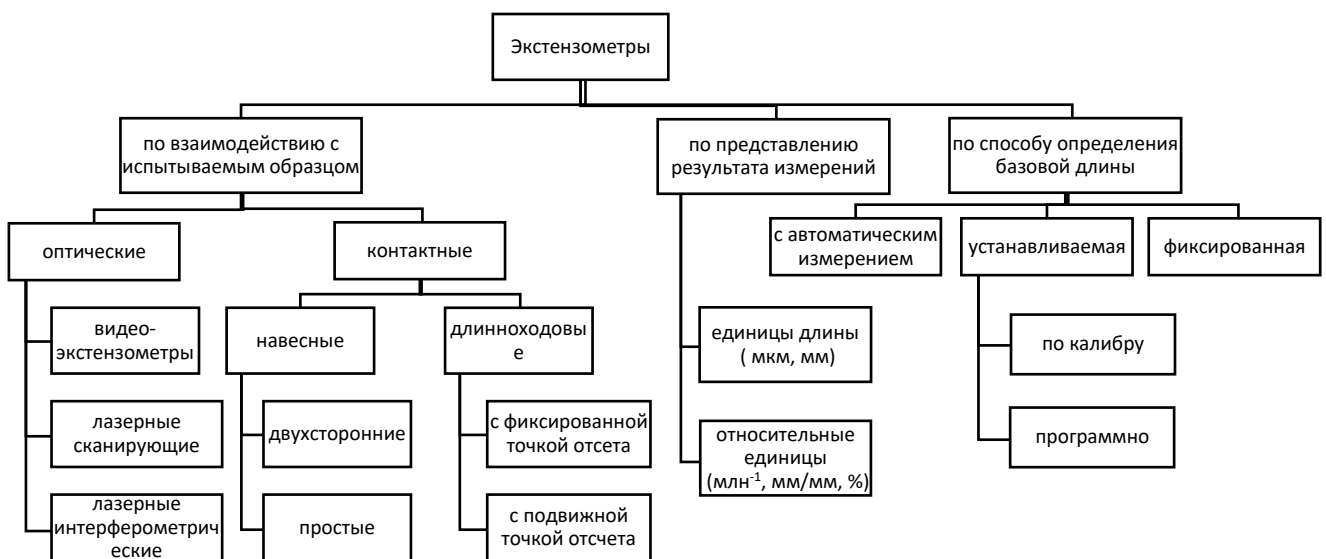


Рисунок 4.3 – Типология экстензометров

В качестве рабочих эталонов для тензокалибраторов применяются заимствованные эталоны из других поверочных схем (рабочие эталоны в соответствии с государственной поверочной схемой для средств измерений длины):

- измерители линейных перемещений лазерные в диапазоне от 0 до 1000 мм 2-го разряда по поверочной схеме для средств измерений длины, применяемые для передачи единицы абсолютной деформации тензокалибраторам методом прямых измерений, а также для поверки средств измерений – экстензометров – методом сличений при помощи компаратора. В качестве компаратора при проведении сличений применяется нагрузочное устройство, обеспечивающее соосное перемещение губок экстензометра при поверке экстензометров, или головка измерительная, $\Delta \leq \pm 0,4$ мкм;

- меры длины концевые плоскопараллельные в диапазоне от 0,1 до 1000 мм 3 разряда по поверочной схеме для средств измерений длины для передачи единицы тензокалибраторам 2 разряда методом сличения при помощи компаратора и балкам

постоянного сечения, нагружаемым по схеме чистого изгиба методом косвенных измерений в соответствии с методиками измерений деформации.

Тензокалибраторы применяют для передачи единицы деформации рабочим эталонам – установкам с балками постоянного сечения, нагружаемыми растяжением, а также средствам измерений – экстензомерам методом прямых измерений. При передаче единицы экстензомерам помимо обеспечения необходимого запаса по точности, предъявляются следующие требования:

- возможность применения микрометрических головок в качестве средства задания перемещения определяется в том числе обеспечением соосности и строго возвратно-поступательного движения подвижного штока относительно неподвижных элементов, а также достаточной жесткостью конструкции. В результате микрометрические головки не могут рассматриваться в качестве эталона без предварительной проверки их работы в составе соответствующего приспособления.;

- выражение допускаемых значений погрешности в единицах, принятых для измерений механической деформации. В случае представления результата измерений в единицах длины не требуется пересчет показаний для установления соответствия показаниям эталона, однако, если результат измерений деформации в относительных единицах требуется установление соответствия;

- начальная расчетная (базовая) длина. а) при каждом испытании определяется фактическое значение расстояния между парами ножей, необходимо нормировать и проверять погрешность данного измерения; б) предусмотрена установка начальной расчетной длины по калибру – приспособлению, необходимо проверить погрешность установки данной характеристики. Средства измерений для проверки начальной расчетной длины в проекте поверочной схемы остаются вне графической части. Требования к измерениям начальной расчетной длины предусмотрены в текстовой части проекта поверочной схемы и должны будут определяться методиками поверки экстензомеров и (или если функционал экстензомера не позволяет определять данную характеристику автоматически) в методиках испытаний на одноосное растяжение;

- затраты при передаче единицы. Чем выше точность эталонов, тем больше их стоимость. Для надежной поверки рабочих средств измерений с помощью эталонов достаточно иметь соотношение их погрешностей 3:1;

- согласованность с международными и национальными стандартами. В реестре средств измерений зарегистрированы экстензомеры и тензокалибраторы зарубежного производства, которые изготавливаются в соответствии с ISO 9513 или ASTM E 83. Ни один из подходов к нормированию метрологических характеристик экстензомеров ISO 9513 или

ASTM E 83 не позволяет охватить все экстензометры для одноосных испытаний без использования пересчета деформации в абсолютное удлинение. В таблице 4.4 приведены требования для экстензометров различных классов точности по ISO 9513 и ASTM E 83.

В качестве средств измерений применяют тензометры (экстензометры), измерители и датчики деформации в диапазоне измерений деформации от $0,001 \cdot L_0^{-1}$ до $1000 \cdot L_0^{-1}$ млн⁻¹, где L_0 – начальная расчетная (базовая) длина, (абсолютной деформации от 0,001 до 1000 мм).

Графическая часть разработанного проекта поверочной схемы, которая охватывает средства измерений деформации, принцип работы, которых основан на измерении перемещений, приведена на рисунке 4.6.

Характеристики предусмотренных проектом поверочной схемы экстензометров и их соотношение с нормируемыми в стандартах ISO 9513 и ASTM E 83 приведены в таблице 4.4.

Для представленного варианта установлено значение отношения границ контрольного допуска при поверке к пределу допускаемой погрешности средств измерений $\beta = 0,8$. Анализ результатов расчета показывает, что представленный вариант поверочной схемы обеспечивает качество поверки средств измерений с метрологическим показателем эффективности $F_1 = 0,083$, что означает усредненную по всему парку СИ вероятность ошибочного признания пригодным любого в действительности непригодного к дальнейшему применению экземпляра СИ 8 %.

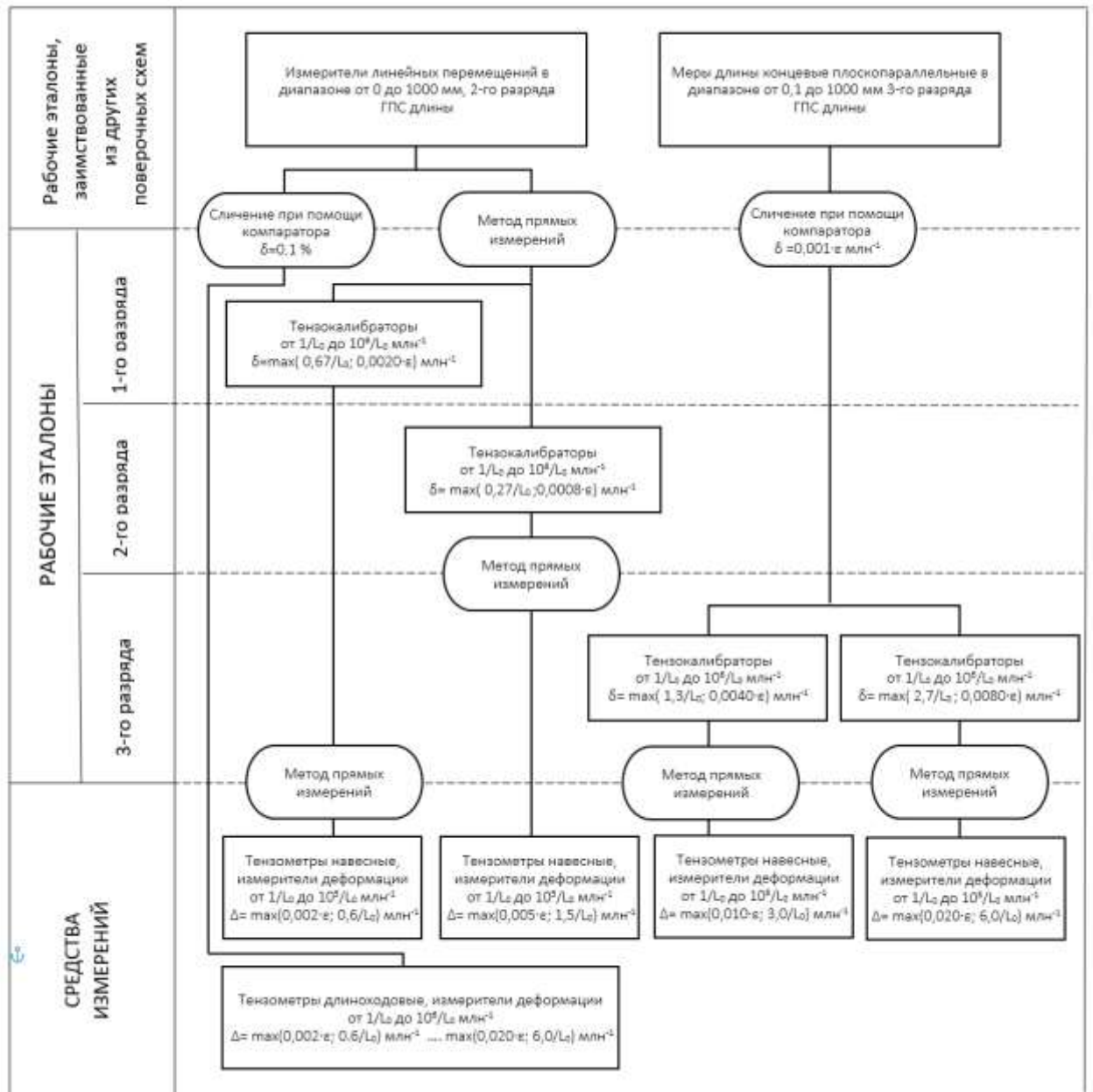


Рисунок 4.4– Обеспечение прослеживаемости тензометров в соответствии с вновь разрабатываемой схемой

Таблица 4.4 - Экстензометры, предусмотренные проектом поверочной схемы

Пределы допускаемых абсолютных погрешностей (согласно поверочной схеме), млн ⁻¹	Пределы допускаемых абсолютных погрешностей рабочего эталона, от которого предусмотрена передача единицы (согласно поверочной схеме), млн ⁻¹	Относительная погрешность определения начальной расчетной длины, %	Разрешающая способность *			Допускаемая погрешность *			Соответствие зарубежным стандартам	α_p
			$(r/l_i) \cdot 100$, %	r , мкм	(l_i/L) мм/мм	q_{rb} , %	$(l_i - l_{эм})$, мкм	(l_i/L) мм/мм		
max (0,002·ε; 0,27/L ₀)	max (0,0008·ε; 0,6/L ₀)	± 0,2	0,05	0,2	0,02/L ₀	± 0,2	± 0,6	± 0,6/L ₀	Кл.0,2 ISO 9513	0,4
max (0,005·ε; 1,5/L ₀)	max (0,002·ε; 0,67/L ₀)	± 0,5	0,25	0,5	0,05/L ₀	± 0,5	± 1,5	± 1,5/L ₀	Кл.0,5 ISO 9513 Класс В-1 ASTM E 83 (L ₀ ≤ 0,015) Класс В-2 ASTM E 83 (L ₀ ≤ 0,007 5)	0,4
max (0,010·ε; 3,0/L ₀)	max (0,004·ε; 1,3/L ₀)	± 1,0	0,5	1,0	0,1/L ₀	± 1,0	± 3,0	± 3,0/L ₀	Кл.1 ISO 9513 Класс С ASTM E 83 (L ₀ ≤ 0,003) Классы С, D, E ASTM E 83 в части диапазона свыше 0,1 L ₀ , L ₀ , 10 L ₀ , мм, соответственно	0,4
max (0,020·ε; 6,0/L ₀)	max (0,008·ε; 2,7/L ₀)	± 2,0	1,0	2,0	0,2/L ₀	± 2,0	± 6,0	± 6,0/L ₀	Кл.2 ISO 9513	0,4

* что больше, где L₀ — начальная расчетная (базовая) длина, м.

Выводы по главе 4

Разработана локальная поверочная схема для средств измерений деформации, состоящая из двух частей: средства измерений полного поля и средств измерений деформации, принцип работы, которых основан на измерении перемещений. Рабочие эталоны и средства измерений прослеживаются к исходному эталону, эталоны и средства измерений второй части к заимствованным эталонам длины.

Проведенные расчеты позволили количественно оценить метрологические показатели эффективности, сформулировать дополнительные требования к установлению границ контрольного допуска при поверке и выбрать вариант структуры поверочной схемы, основанной на применении в качестве рабочих эталонов установок на базе балок постоянного сечения и установок с балками равного сопротивления изгибу, предусматривающий методы сличений с помощью компаратора для передачи единицы деформации рабочим эталонам и метод прямых измерений для передачи единицы деформации средств измерений.

Разработанная локальная поверочная схема для средств измерений деформации, обеспечивает прослеживаемость результатов с метрологическим показателем эффективности 0,04, число ступеней передачи, которой учитывает численность парка СИ.

Разработанная локальная поверочная схема, устанавливающая порядок передачи единицы деформации от исходного эталона единицы величины эталонам и средствам измерений, соответствует требованиям Приказа Минпромторга РФ от 11.02.2020 № 456 и может быть представлена к рассмотрению в качестве проекта государственной поверочной схемы или ведомственной поверочной схемы.

ГЛАВА 5. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

5.1 Применение результатов исследований на практике

При испытаниях с целью утверждения типа установки чистого изгиба УТ–66 (рисунок 5.1), реализующей косвенный метод измерений деформации, была разработана методика измерений для установки чистого изгиба УТ-66 и аттестована с применением ГПРМИ деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба деформации (ФР.ПР1.27.2019.00010) в рамках испытаний с целью утверждения типа.

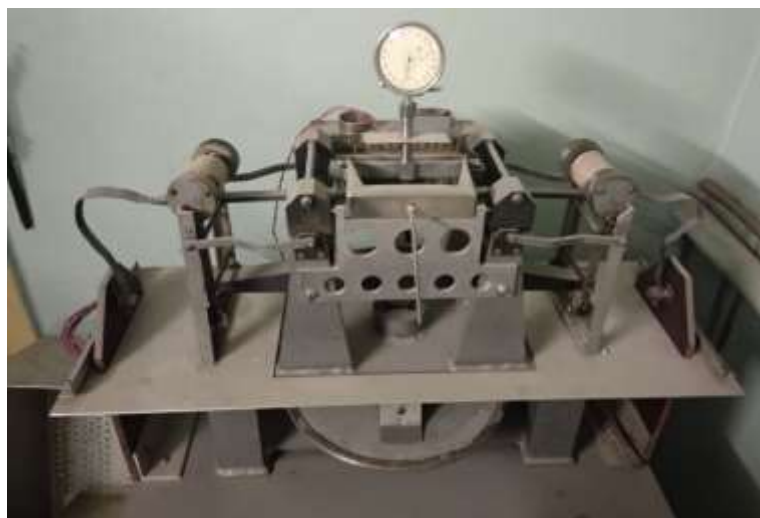


Рисунок 5.1 - Общий вид установки УТ-66

Установка чистого изгиба УТ–66 состоит из устройства нагружающего, градуировочной балки, системы нагрева балки, тензометрического прибора и прогибомера с многооборотной измерительной головкой МИГ–1. Устройство нагружающее состоит из станины, неподвижной траверсы, скрепленной со станиной, и подвижной траверсы. Каждая траверса снабжена роликами, между которыми установлена градуировочная балка. Предусмотрена возможность задания деформации балки по шкале лимба, прикрепленного к маховику. Тип средства измерений – Установка чистого изгиба УТ–66 утвержден (рег. № 81751–21).

Как было отмечено в 4.3.1 параллельно с испытаниями с целью утверждения типа установки УТ–66, реализующей косвенный метод измерений деформации, проходила аттестация методики измерений «Установка для измерений деформации УТ–66М. Методика измерений деформации поверхности М.233.02/2020» № 22200130/RA.RU.311866/2019. Такой подход ограничивает точностные характеристики испытываемого средства измерений, при большом объеме и сложности работы,

сопряженной с необходимостью одновременного утверждения типа и аттестации методики измерений. В качестве решения этой проблемы было инициировано создание исходного эталона. По результатам работы, описанной в пункте 4.2 проведена аттестация и Приказом Росстандарта № 2231 от 08 октября 2021 года эталонная установка, реализующая Государственную первичную референтную методику измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба утверждена эталоном единицы величины присвоением регистрационного номера эталона единицы величины 3.1.ZZB.0402.2021.

Испытана в целях утверждения типа и утверждена установка для воспроизведения деформации УВИД–М (рег.№ 87200–22), принадлежащая АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», общий вид установки приведен на рисунке 5.2.

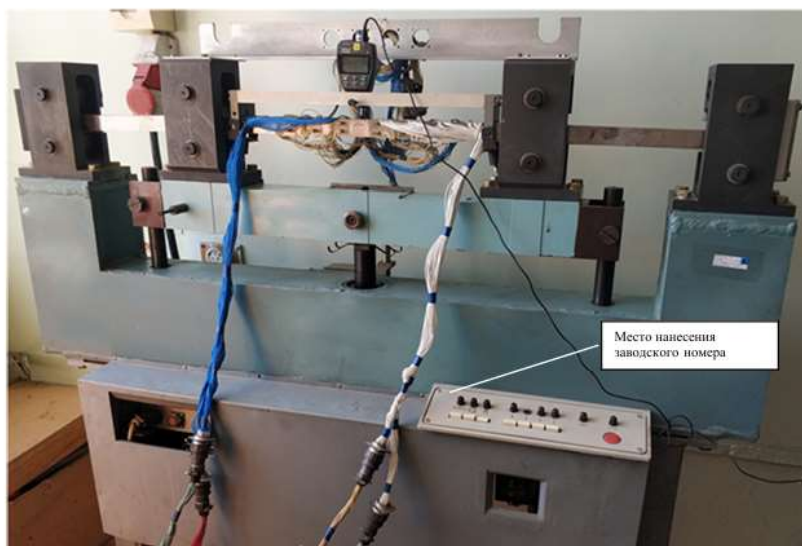


Рисунок 5.2– Общий вид установки для воспроизведения деформации УВИД–М

Принцип действия установки для воспроизведения деформации УВИД–М основан на реализации четырехточечного изгиба. Установка сконструирована по принципам «точного станкостроения», т.е. чистый изгиб обеспечивается высокой точностью изготовления направляющих и нажимных роликов, а также их взаимного расположения. Пределы измерений деформации при нормальных условиях $\pm 3000 \text{ млн}^{-1}$, пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений деформации в поддиапазоне измерений от минус 1000 до 1000 млн^{-1} включ. $\pm 10 \text{ млн}^{-1}$, относительной погрешности измерений деформации в поддиапазонах измерений от минус 3000 до минус 1000 млн^{-1} включ. и св. 1000 до 3000 млн^{-1} включ. $\pm 1 \%$.

Испытаны в целях утверждения типа и утверждены тензометры волоконно-оптические ТХYZ/D (рег. № 88619-23) (далее тензометры) изготавливаемые

ООО «Инверсия-Сенсор» и ПАО ПНППК, г. Пермь, общий вид тензометров приведен на рисунке 5.3.

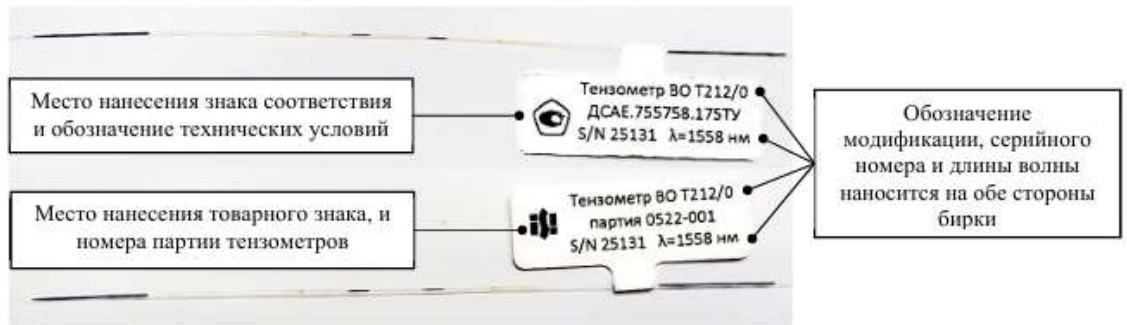


Рисунок 5.3 – Общий вид тензометров волоконно-оптических TXYZ/D

Диапазон измерений деформации с помощью тензометров от минус 5000 до 5000 млн⁻¹ и от 0 до 8000 млн⁻¹. В рамках вышеуказанных испытаний опробованы методы передачи единицы: метод прямых измерений с помощью исходного эталона (в диапазоне измерений от минус 5000 до 5000 млн⁻¹) и косвенных измерений с помощью эталонов длины 2-го разряда – интерферометров лазерных (в диапазоне измерений от 0 до 8000 млн⁻¹), предусмотренные для волоконно-оптических датчиков IEC 61757-2-1 Fibre optic sensors - Strain sensors based on fibre Bragg gratings. Метод прямых измерений с помощью исходного эталона подтвердил более высокую точность измерений (воспроизводимость, повторяемость) для датчиков «полного поля» (пределы допускаемой приведенной к ширине поддиапазона измерений погрешности измерений деформации в диапазоне измерений от минус 3000 до 3000 млн⁻¹ от ±1 % и относительной погрешности ±2 % в диапазоне измерений от минус 5000 до минус 3000 и св. 3000 до 5000 млн⁻¹), что не исключает применение косвенных методов измерений при передаче единицы (пределы допускаемой приведенной к ширине диапазона измерений погрешности измерений деформации ±2 % в диапазоне измерений от 0 до 5000 млн⁻¹).

Испытаны в целях утверждения типа и утверждены тензорезисторы ВТ (рег. № 93133-24) изготавливаемые ООО «Высокоточные измерения», г. Москва и ООО Торговым Домом «ЮгВесСтрой», г. Ставрополь рисунок 5.4. Диапазон измерений деформации с помощью тензорезисторов ВТ от минус 3000 до 3000 млн⁻¹, среднее значение чувствительности при нормальных условиях от 1,75 до 2,20, среднее квадратическое отклонение чувствительности от номинального 1 %. При разработке методики поверки предусмотрена периодическая поверка, основанная на сопоставлении результатов определения чувствительности, полученных при первичной и периодических поверках.

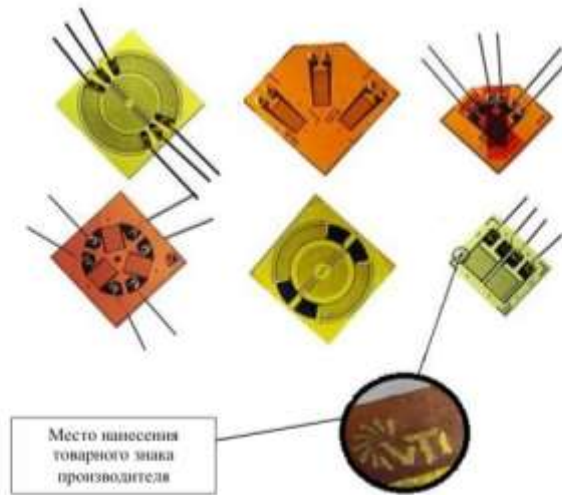


Рисунок 5.4– Общий вид тензорезисторов ВТ

Испытана в целях утверждения типа и утверждена установка с балками постоянного сечения, нагружаемыми по схеме чистого изгиба (рег. № 92055–24), изготовленная ООО «АВТОПРОГРЕСС-М», г. Москва, общий вид установки приведен на рисунке 5.5.

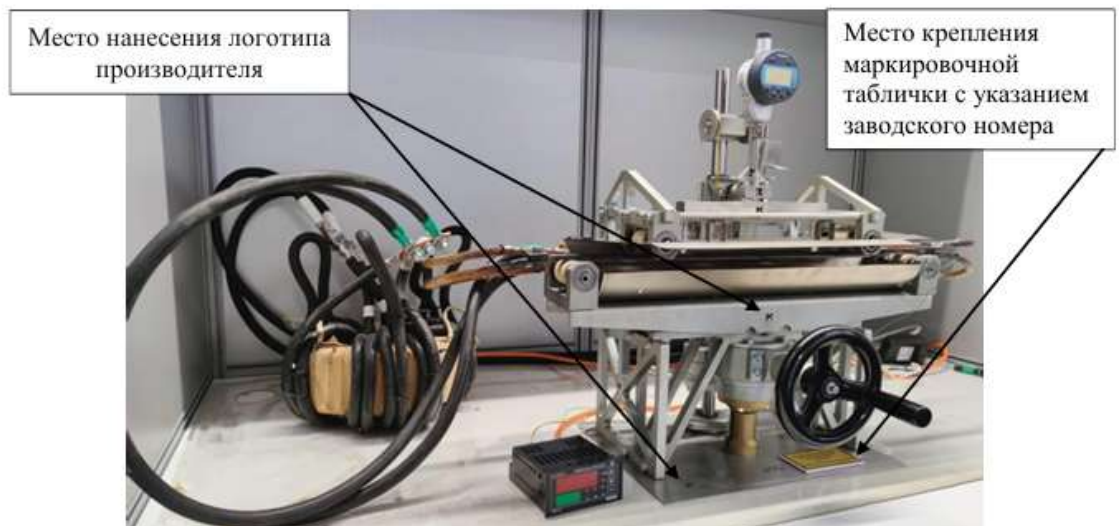
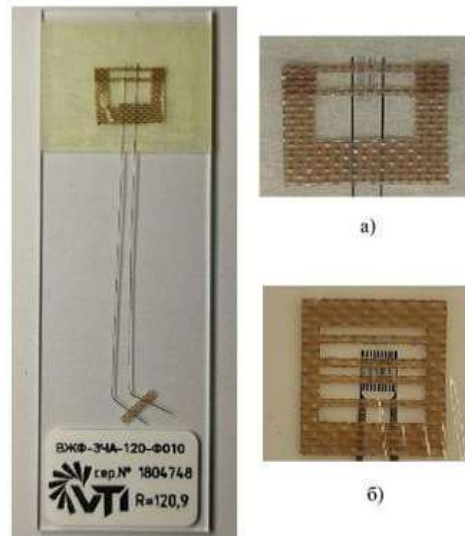


Рисунок 5.5– Общий вид установки с балками постоянного сечения, нагружаемыми по схеме чистого изгиба

Во время проведения испытаний установка с балками постоянного сечения, нагружаемыми по схеме чистого изгиба, была доработана в части создания механизма противовеса, компенсирующего вес прогибомера и обеспечивающего равномерное деформационное поле. Особенностью конструкции является «плавающая» нижняя траверса, которая позволяет обеспечить одновременное касание балки с верхними и нижними нажимными роликами. Пределы измерений деформации при нормальных условиях $\pm 3000 \text{ млн}^{-1}$, пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений деформации в поддиапазоне измерений от -1000 до 1000 млн^{-1} включ. $\pm 8 \text{ млн}^{-1}$, относительной погрешности измерений

деформации в поддиапазонах измерений от -3000 до -1000 млн⁻¹ включ. и св. 1000 до 3000 млн⁻¹ включ. $\pm 0,5$ %.

Испытаны в целях утверждения типа и утверждены тензорезисторы ВЖ (рег. № 95239-25), изготавливаемые ООО «Высокоточные измерения», г. Москва, и ООО Торговым Домом «ЮгВесСтрой», г. Ставрополь, общий вид приведен на рисунке 5.6.



а) Тензорезисторы исполнения ВЖЖ, ВЖН, ВЖП
б) Тензорезисторы исполнения ВЖФ

Рисунок 5.6– Общий вид тензорезисторов ВЖ

Диапазон измерений деформации с помощью тензорезисторов ВЖ от -2000 до 2000 млн⁻¹, среднее значение чувствительности при нормальных условиях от $1,8$ до $4,5$, среднее квадратическое отклонение чувствительности от номинального $3,0$ %.

Проведены испытания в целях утверждения типа тензометров 12XX (рег. № 91175-24), изготавливаемые ACE INSTRUMENT CO. LTD, Республика Корея. Принцип действия тензометров основан на изменении собственной частоты колебаний струны тензометра в зависимости от ее деформации, общий вид приведен на рисунке 5.7.

В ходе проведения испытаний была разработана и изготовлена оснастка. По результатам экспериментального опробования определены требования к условиям передачи единицы датчикам деформации методом косвенных измерений от эталонов длины 2 разряда – интерферометров лазерных, фотография схемы косвенных измерений с помощью интерферометра лазерного и оснастки, обеспечивающей соосность воспроизводимых и измеряемых перемещений приведена на рисунке 5.8.



Рисунок 5.7– Общий вид тензометров 12XX



Рисунок 5.8 – Косвенные измерения с помощью интерферометра лазерного

Разработана и внедрена методика калибровки МК 44–233 на тензометры для полотен пил (метод косвенных измерений от эталонов длины 2 разряда – интерферометров лазерных).

Разработана и внедрена методика калибровки МК 4–233 на тензокалибраторы (метод косвенных измерений с помощью эталонов длины 2 разряда – интерферометров лазерных).

С 2021 года с помощью исходного эталона поверено:

- более 240000 экземпляров тензорезисторов (более 200 партий тензорезисторов);
- 258 штук тензометров волоконно-оптических;
- установка с балками, нагружаемыми по схеме чистого изгиба (рабочий эталон)

для ООО «Автопрогресс».

Большое количество поверок в 2021 – 2022 гг. обусловлено отсутствием эталонов в организациях, занимающихся поверкой СИ. В настоящем году количество поверок тензорезисторов в УНИИМ – филиале ФГУП «ВНИИМ им.Д.И.Менделеева» не превышает 10 партий, что связано с созданием и внесением в реестр трех установок воспроизведения деформации (рабочих эталонов) для юридических лиц, занимающихся поверкой и калибровкой СИ.

5.2 Перспективы развития эталонов деформации

Современные машины, конструкции и специальная техника в реальных условиях эксплуатации подвергаются воздействиям высоких температур, динамических нагрузок, а иногда и комплексу влияющих факторов, выходящих за рамки расчетных статических нагрузок при нормальных температурах. Условия, отличные от нормальных, включающих циклические динамические нагрузки и (или) температурные воздействия до 1200 °С – 1500 °С с пластическими деформациями в локальных зонах концентрации напряжений характерны для:

- лопаток газотурбинных двигателей в авиации;
- элементов конструкций зданий, сооружений, плотин;
- котлов и паропроводов ТЭЦ, реакторов АЭС;
- несущих конструкций буровых платформ;
- рельсов высокоскоростных магистралей при динамическом контакте с подвижным составом.

Это обуславливает необходимость развития системы метрологического обеспечения средств измерений деформации для расширенных условий эксплуатации, выходящих за пределы лабораторных испытаний. Проведенные исследования и разработанные решения в области создания эталонного комплекса измерений деформации в статических условиях при нормальных температурах создают фундаментальную основу для решения специальных задач промышленности. Анализ современного состояния метрологического обеспечения позволяет выделить три приоритетных направления развития.

5.2.1 Метрологическое обеспечение измерений деформации в области деформаций свыше 5000 млн⁻¹

Свойства пластичности материалов определяют живучесть и надежность техники при экстремальных механических воздействиях. Современные средства измерений на основе волоконно-оптических брэгговских решеток и электронной

спеклоинтерферометрии позволяют выявлять опасные деформации, превышающие 5000 млн^{-1} .

Возможные пути решения:

- создание специального эталона единицы деформации с диапазоном до $100\,000 \text{ млн}^{-1}$ на основе испытательных машин и методов спекловой интерферометрии;
- разработка референтных методик измерений деформации в диапазоне свыше 5000 млн^{-1} ;
- создание стандартных образцов свойств материалов с аттестованными механическими характеристиками.

5.2.2 Метрологическое обеспечение измерений в условиях высоких температур

Натурные испытания изделий, эксплуатирующихся при температурах до $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, критически важны для авиационной, энергетической и двигателестроительной отраслей. Характеристики средств измерений, определенные при нормальных температурах, становятся малоэффективными и неточными в области высоких температур. Физические параметры одних и тех же объектов, измеренные различными исследователями, нередко существенно расходятся между собой.

Возможные направления решения:

- разработка специализированных эталонных установок с температурным диапазоном до $1500 \text{ }^\circ\text{C}$, в том числе с использованием конвекционного нагрева и нагрева непосредственным пропусканием электрического тока;
- проведение исследований влияния температуры на метрологические характеристики преобразователей.

5.2.3 Метрологическое обеспечение измерений динамических деформации

Измерения динамических деформаций приобретают ключевое значение для оценки усталостной долговечности и прочности конструкций. Устойчивость конструкций и материалов к интенсивным знакопеременным механическим нагрузкам в виде ускорений, сил и моментов сил является основой их безопасной эксплуатации. Несоответствие условий применения средств измерений условиям их поверки в статическом режиме ограничивает достоверность результатов испытаний.

Возможные направления решения проблемы:

- создание динамического эталона деформации с диапазоном частот до 10 кГц ;
- разработка методик динамической поверки средств измерений;
- внедрение методов моделирования процессов деформирования чувствительных элементов датчиков деформации и цифровых двойников эталонов.

Перспективы развития системы метрологического обеспечения средств измерений деформации связаны с созданием комплексной эталонной базы, охватывающей области измерений в широком диапазоне температур и деформаций, а также динамических деформаций. Реализация этих направлений и разработок на основе результатов диссертационных исследований создают основу для дальнейшего развития системы метрологического обеспечения в соответствии с потребностями высокотехнологичных отраслей промышленности.

Выводы по главе 5

Разработанный и аттестованный исходный эталон единицы величины деформации (рег. № 3.1.ZZB.0402.2021), позволил создать локальную поверочную схему для средств измерений деформации.

Обеспечена практическая реализация системы 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.

Подтверждена эффективность созданной системы:

- поверено более 240 000 тензорезисторов;
- поверено 258 волоконно-оптических тензометров;
- поверено 3 установки с балками, нагружаемыми по схеме чистого изгиба (рабочие эталоны).

Создана основа для создания государственной поверочной схемы.

Объем выполненных работ в области обеспечения единства измерений деформации подтверждает научную и практическую значимость проведенных исследований, а также, с учетом перспективных требований к измерениям деформации, создает основу для дальнейшего развития системы метрологического обеспечения в соответствии с потребностями высокотехнологичных отраслей промышленности в областях расширения диапазона измерений и специальных условий измерений.

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 комплексного анализа современных методов и состояния метрологического обеспечения предложен и реализован системный подход, включающий разработку и аттестацию исходного эталона и создание схемы передачи размера единицы.

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 средствами 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:

- средства 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 СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящей работе использованы следующие сокращения и обозначения:

ОПК – оборонно-промышленный комплекс

СИ – средство измерений

ВБР – волоконно-оптические датчики на основе решёток Брэгга

ФГИС «АРШИН» – Федеральная государственная информационная система Росстандарта

ССД – стандартные справочные данные

ТКЛР – температурный коэффициент линейного расширения

СКО – среднеквадратичное отклонение

ПК – персональный компьютер

е.м.р. – единица младшего разряда

МБМВ – международное бюро мер и весов

ОСИ – образцовые средства измерений

БРС – балки равного сопротивления изгибу

ГПРМИ деформации – Государственная первичная референтная методика измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба деформации (ФР.ПР1.27.2019.00010)

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль

АЭС – атомная электростанция

СПИСОК ТЕРМИНОВ

В настоящей работе применяют следующие термины и определения:

Деформация: изменение формы и размеров тела, обусловленное изменением взаимного расположения частиц тела, связанное с их перемещением относительно друг друга под действием механических напряжений.

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

Прочность (твёрдого тела): механическое свойство твёрдого тела сохранять сплошность, целостность, конфигурацию, размеры, способность к упругой деформации под действием внешних нагрузок различной природы, сопротивляться разрушению.

Механическое напряжение: мера внутренних сил, возникающих в деформируемом теле под влиянием внешних воздействий.

Напряжения I рода: остаточные напряжения, затрагивающие значительный объём материала детали или изделия и обладают определенной ориентацией в зависимости от формы изделия.

Разрушающий метод определения остаточных напряжений: метод, основанный на принципе высвобождения накопленной упругой энергии при локальном нарушении целостности материала. При удалении части материала (путем сверления, разрезания или рассверливания) происходит перераспределение напряжений, что вызывает измеримую деформацию в окружающих зонах.

Деформация изгиба: вид деформации, возникающей при изгибе упругого тела под действием изгибающей нагрузки.

Чистый изгиб: частный случай изгиба, при котором в сечениях балки поперечная сила равна нулю (при чистом изгибе на поверхности изгибаемой балки имеется участок, на котором деформация равномерна).

Нейтральный слой балки: продольное сечение изгибаемой балки, в точках которой нормальные напряжения, параллельные оси балки, равны нулю. Нейтральная ось делит сечение на две части, в одной из которых действуют растягивающие нормальные напряжения, а в другой— сжимающие.

Упругая линия балки: условное название кривой, форму которой принимает ось стержня (балки) при изгибе.

Статистическая модель измерений: результат измерений представляет собой сумму трёх составляющих: общее среднее значение (математическое ожидание), лабораторная составляющая систематической погрешности в условиях повторяемости и случайная составляющая погрешности каждого результата измерений в условиях повторяемости [65].

Целевое назначение методики: соответствие методики (метода) измерений свойствам объекта измерений и характеру измеряемых величин.

Устойчивость методики: способность методики измерений не подвергаться воздействию небольших, но выходящих за установленные пределы отклонений ее параметров.

Тензорезистор: измерительный преобразователь линейной деформации в изменение активного сопротивления, принцип действия которого основан на тензорезистивном эффекте.

Выходной сигнал тензорезистора: отношение приращения сопротивления тензорезистора, вызванного воздействием деформации или влияющей величины, к его начальному сопротивлению.

Измерительный мост: измерительный мост представляет собой соединение четырех полных сопротивлений, при этом путем изменения как минимум одного из четырех сопротивлений (так называемых плеч) мостовая схема уравнивается, т.е. выходная величина на выводах делителей напряжения обращается в нуль. В зависимости от количества изменяемых сопротивлений различают схемы мостов по количеству активных плеч ($1/4$ мост, $1/2$ мост, полный мост).

Компенсационный тензорезистор: для компенсации температурной погрешности резистор с постоянным сопротивлением в одном из плеч моста заменяют компенсационным (нерабочим) тензорезистором. При этом температурные условия, в которых работают оба тензорезистора одинаковы, но компенсационный тензорезистор не подвергается воздействию деформации.

Коэффициент преобразования калибратора: отношение напряжения на выходе прибора к напряжению на входе (питания моста).

Смещение: отклонение результатов анализа от истинного или опорного значения.

Параллельные измерения multiple determinations: серия единичных измерений, выполненных в условиях повторяемости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Серьёзов А. Н. и др. Применение оптоволоконных технологий при создании встроенных систем самодиагностики авиационных конструкций //Системы анализа и обработки данных. – 2016. – №. 3 (64). – С. 95-105. doi: 10.17212/1814-1196-2016-3-95-105.
- 2 ISO 18649:2004 Mechanical vibration — Evaluation of measurement results from dynamic tests and investigations on bridges, июль 2004 г.
- 3 ГОСТ 31937-2024 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
- 4 «Лаборатория полей деформаций». Просмотрено: 4 декабрь 2025 г. Онлайн . Доступно на: <http://imash.ru/scientific-section/section1/structure1/laboratory-deformation-fields/>
- 5 Потапова Л. Б., Ярцев В. П. Статистический критерий текучести твердых материалов при сложном напряженном состоянии //Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2003. – Т. 9. – №. 3. – С. 477-485.
- 6 Патокин Е.В., «Метрологическая аттестация тензорезисторов для измерения в диапазоне упруго-пластических деформаций в конструкциях и деталях машин: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.02.19». Москва, 1994 г. Просмотрено: 4 декабрь 2025 г. Онлайн . Доступно на: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000334110>
- 7 Patterson E. A. et al. Calibration and evaluation of optical systems for full-field strain measurement //Optics and Lasers in Engineering. – 2007. – Т. 45. – №. 5. – С. 550-564.
- 8 Плешанов В. С. и др. Измерение деформации материалов методом корреляции цифровых изображений //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2008. – Т. 312. – №. 2S. – С. 343-349.
- 9 Смирнов С. В. и др. Исследование методом корреляции цифровых изображений пластического течения стали 08Г2БМ при растяжении //XI Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» – 2017. – С. 113-113.
- 10 ГОСТ 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009 Неопределённость измерения. Часть 1. Введение в руководства по выражению неопределённости измерения/ подготовлен Объединенным комитетом по руководствам в метрологии (JCGM) с целью продвижения идей оценивания неопределённости измерения, изложенных в «Руководстве по выражению неопределённости измерения» (GUM), и в качестве вводного руководства по применению дополнений к GUM.
- 11 ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 Межгосударственный стандарт. Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения («Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement», IDT). ПОДГОТОВЛЕН Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК 125 «Статистические методы в управлении качеством продукции» на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии международного

документа, указанного в пункте 5 ВНЕСЕН Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 14 июля 2017 г. N 101-п). Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии 12 сентября 2017 г. № 1065-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 34100.3-2017 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 сентября 2018 г.

12 Феодосьев В.И., Соппротивление материалов. Федеральное государственное унитарное предприятие «Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр «Наука». Просмотрено: 17 июль 2025 г. Онлайн . Доступно на: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29016904>

13 Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела [Учеб. пособие для мех.-мат. и физ. спец. ун-тов]. – Наука, 1988.

14 Hou G. Y. et al. Structural deformation sensing based on distributed optical fiber monitoring technology and neural network //KSCCE Journal of Civil Engineering. – 2021. – Т. 25. – №. 11. – С. 4304-4313, doi: 10.1007/s12205-021-1805-z.

15 Wang S. et al. Displacement observation data-based structural health monitoring of concrete dams: A state-of-art review //Structures. – Elsevier, 2024. – Т. 68. – С. 107072.

16 Sun G., Zhang S. A review on warpage measurement metrologies for advanced electronic packaging //Microelectronics Reliability. – 2024. – Т. 160. – С. 115456.

17 Goch G. et al. Gear metrology—An update //CIRP Annals. – 2023. – Т. 72. – №. 2. – С. 725-751.

18 Yue C. et al. Research on online deformation monitoring of thin-walled parts driven by digital twin //Digital Engineering. – 2024. – Т. 3. – С. 100023.

19 Roy R., Surace C., Gherlone M. Full-field deformation reconstruction of beams using the inverse Finite Element Method: Application to thin-walled structures //Thin-Walled Structures. – 2024. – Т. 200. – С. 111907, doi: 10.1016/j.tws.2024.111907.

20 Qu C. et al. High-Precision large deformation measurement of array SAR based on FBG strain monitoring and initial state reconstruction //Measurement. – 2024. – Т. 228. – С. 114381., doi: 10.1016/j.measurement.2024.114381.

21 Wang Y. et al. Perforated piezoresistive film-based flexible bidirectional strain sensors for large bending deformation detection and health monitoring of glass fiber-reinforced polymers //Composites Part B: Engineering. – 2025. – Т. 293. – С. 112111, doi: 10.1016/j.compositesb.2025.112111.

22 Shi H. et al. Three-dimensional deformation monitoring of internal nodes of large-span suspended dome structure using videogrammetry under camera instability //Measurement. – 2025. – Т. 242. – С. 116009, doi: 10.1016/j.measurement.2024.116009.

- 23 Krizsma S., Suplicz A. Monitoring and modelling the deformation of an aluminium prototype mould insert under different injection moulding and clamping conditions //Results in Engineering. – 2023. – Т. 20. – С. 101556, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101556.
- 24 Zhang C. et al. Long-term operation state monitoring and stress–deformation mechanism research of bridge abutment anchorage structure //Construction and Building Materials. – 2025. – Т. 458. – С. 139655, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139655.
- 25 Ильюшин А.А., Пластичность. Часть 1. Упруго-пластические деформации. 2004. — 376 с. М.:Логос, 2004.
- 26 Тимошенко С.П., Сопротивление материалов, т. 1, 2 тт. Москва: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1965.
- 27 Касаткин Б. С. и др. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений //Киев: Наукова думка. – 1981. – Т. 583.
- 28 Писаренко Г. С. Сопротивление материалов/Писаренко ГС //Агарев ВА, Квитка АЛ—К.: Вища школа. – 1973.
- 29 Радченко С. Ю., Дорохов Д. О. Новая форма представления меры линейной деформации //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2011. – №. 2. – С. 446-457.
- 30 Rees D. Basic engineering plasticity: an introduction with engineering and manufacturing applications. – Elsevier, 2012.
- 31 Жакыпбек А. Б., Дуйшеналиев Т. Б., Чыныбаев М. К. О тензорах Грина и Лагранжа //Наука и техника Казахстана. – 2006. – №. 2. – С. 24-27.
- 32 Елисеев В. В. Механика деформируемого твердого тела. – 2006.
- 33 Трещев А. А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной или наведенной чувствительностью к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения //Москва–Тула: РААСН–ТулГУ. – 2016.
- 34 Мехеда В. А. М 55 Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие //Самара: Издательство Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2011.
- 35 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.
- 36 Кошеленко А. С., Жедь О. В., Солис П. Н. В. Экспериментальное исследование методом делительных сеток деформированного состояния дорнованного отверстия //Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2013. – №. 2. – С. 9-18.
- 37 Яковлев В. Ф. Измерение деформаций и напряжений деталей машин //М.: Машгиз. – 1963.

- 38 Немировский Ю. В., Мищенко А. В. Влияние выбора материалов и структуры конструкции на пластическое деформирование и разрушение слоистых стержневых систем //Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – №. S1-1. – С. 180-183, doi: 10.24411/1683-805X-2004-00243.
- 39 Racziewicz W., Bacharz M. Experimental verification of shrinkage due to drying in concrete under varying humidity conditions in accordance with the Eurocode2 standard //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – Т. 49. – С. 00084, doi: 10.1051/e3sconf/20184900084.
- 40 Феодосьев В.И., Сопротивление материалов: учебник для вузов (Механика в техническом университете), 15-е-е., испр. изд., т. 2, 8 тт. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумэна, 2010.
- 41 Фролов К.В., «Сб. научных трудов,» в Проблемы надежности и ресурса в машиностроении, М., Наука,. 1988.
- 42 Александров А.Я., Ахметзянов М.Х., Поляризациино-оптические методы механики деформируемого тела. М.: «Наука», 1973.
- 43 Fairuz Omar A. Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists //Sensor Review. – 2013. – Т. 33. – №. 2. doi: 10.1002/9781118014103.
- 44 Wang L., Choi J. Highly stretchable strain sensors with improved sensitivity enabled by a hybrid of carbon nanotube and graphene //Micro and Nano Systems Letters. – 2022. – Т. 10. – №. 1. – С. 17. doi: 10.1186/s40486-022-00160-9.
- 45 Jahn H., Fröhlich T., Zentner L. Development of an analytical model and method for analyzing deformation in planar load cells //Mechanism and Machine Theory. – 2024. – Т. 203. – С. 105812, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2024.105812.
- 46 Lyubutin P. S., Panin S. V. Mesoscale measurement of strains by analyzing optical images of the surface of loaded solids //Journal of applied mechanics and technical physics. – 2006. – Т. 47. – №. 6. – С. 905-910, doi: 10.1007/s10808-006-0131-z.
- 47 Leendertz J. A. Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect //Journal of Physics E: Scientific Instruments. – 1970. – Т. 3. – №. 3. – С. 214-218, doi: 10.1088/0022-3735/3/3/312.
- 48 Hung Y. Y., Rowlands R. E., Daniel I. M. Speckle-shearing interferometric technique: a full-field strain gauge //Applied Optics. – 1975. – Т. 14. – №. 3. – С. 618-622, doi: 10.1364/ao.14.000618.
- 49 Revie R.W. и Uhlig H.H., Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering, 4th ed. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 2008.
- 50 Sherwood G. R. et al. 3D-printed phononic crystal waveguide transducers for nonlinear ultrasonic damage detection //Ndt & E International. – 2021. – Т. 121. – С. 102456, doi: 10.1016/j.ndteint.2021.102456.

- 51 Dong Z. Z. et al. Microstructure change and shape memory characteristics in welded Fe–28Mn–6Si–5Cr–0.53 Nb–0.06 C alloy //Materials Science and Engineering: A. – 2006. – Т. 438. – С. 800-803, doi: 10.1016/j.msea.2005.12.054.
- 52 Трибушевская Л. А., Шимолин Ю. Р. Первичная референтная методика измерений деформации поверхности упругодеформированной балки //Измерительная техника. – 2022. – №. 2. – С. 34-43, doi: 10.32446/0368-1025it.2022-2-34-43. – EDN BJFZKY.
- 53 ГОСТ 28840-90 Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 29.12.90 № 3530, Москва.
- 54 ГОСТ 28841-90 Машины для испытания материалов на усталость. Общие технические требования.
- 55 ГОСТ 28845-90 Машины для испытания материалов на ползучесть, длительную прочность и релаксацию. Общие технические требования, 2004 г.
- 56 INTERNATIONAL RECOMMENDATION OIML R 65 FORCE MEASURING SYSTEM OF UNIAXIAL MATERIAL TESTING MACHINES (Edition 2000 - English version only) ERRATUM 1 (2001.07.09) On page 17 the text of B.17 (Annex B).
- 57 BS 6888:1988 Methods for calibration of bonded electrical resistance strain gauges., BRITISH STANDARD, 1988 г.
- 58 ASTM E251:20 – Standard Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages, 2020 г.
- 59 AIA/NAS 942 2021 - Aerospace Industries Association of America Inc. STRAIN GAGES, BONDED RESISTANCE. - AIA/NAS. – 67 p, 2021 г.
- 60 Fong W., Koay K. L., Azid I. A. Experimental evaluation on the silicon mechanical performance of electronic packaging //Journal of Mechanical Engineering And Sciences. – 2017. – Т. 11. – №. 1. – С. 2456-2468, doi: 10.15282/jmes.11.1.2017.5.0226.
- 61 Браутман Л., Крок Р., «Композиционные материалы: В 8-ми т. пер. с англ.,» в т.7 Анализ и проектирование конструкций. Часть 1. под ред. К.Чамиса Composite Materials/ Нью-Йорк, 1975, 1978, р. 300., Пер.изд. М., Машиностроение.
- 62 Горшков А. Г., Трошин В. Н., Шалашилин В. И. Сопротивление материалов. – Общество с ограниченной ответственностью Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2002. – С. 1-544.
- 63 Тимошенко С. П., Прочность и колебания элементов конструкций, т. 704 стр., , 1975. М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1975.
- 64 Васидзу К., Вариационные методы в теории упругости и пластичности. Пер. с англ., т. 1, 2 тт. М.: Мир, 1987.

- 65 ГОСТ Р ИСО 5725-1-2022 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения. Принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 23 апреля 2002 г №161-ст.
- 66 «ООО ПФ «НОГРАН». Просмотрено: 25 август 2025 г. Онлайн . Доступно на: <https://nogran.ru/>
- 67 Астахов М. Ф. и Шкадов В. Я., Термоупругость и тепловые напряжения в конструкциях, М.:Физматлит. 2016.
- 68 ГОСТ 21616-91 Тензорезисторы. Общие технические условия. УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 25.04.91 N 573.
- 69 Пачурин В. Г., Галкин В. В., Пачурин Г. В. Оценка деформационной неоднородности в раскатанных изделиях с клиновым профилем //Фундаментальные исследования. – 2014. – №. 11-4. – С. 765-773.
- 70 Романов А., Разрушение при малоцикловом нагружении. М.: «Наука», 1988.
- 71 ГОСТ Р 8.563-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений. РАЗРАБОТАН Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы» (ФГУП «ВНИИМС») ВНЕСЕН Управлением метрологии Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2009 г. N 1253-ст.
- 72 ГОСТ Р 53442-2015 Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Установление геометрических допусков. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения (ISO 1101:2012, Geometrical Product Specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out, MOD). ПОДГОТОВЛЕН Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский и конструкторский институт средств измерений в машиностроении» (ОАО «НИИИзмерения») на основе официального перевода на русский язык англоязычной версии указанного в пункте 4 международного стандарта, который выполнен Федеральным государственным унитарным предприятием «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия» («СТАНДАРТИНФОРМ») ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 242 «Допуски и средства контроля» Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 августа 2015 г. № 1115-с.
- 73 Kittel С., Introduction to solid state physics, 8th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2005.
- 74 Чернышев Г.Н., Попов А.Л., и Козинцев В.М., «Полезные и опасные остаточные напряжения», Природа, вып. № 10(1046), сс. 17–24, 2002 г.
- 75 Буркин С. П., Шимов Г. В., Андрюкова Е. А. Остаточные напряжения в металлопродукции. – 2015.

- 76 Митрофанов В.В. и Шимолин Ю.Р., «Устройство для получения чистого изгиба эталонной балки», RU 2621462 С1, 6 июнь 2017 г. Просмотрено: 13 октябрь 2025 г. Онлайн. Доступно на: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002621462_20170606_C1_RU/
- 77 Митрофанов В.В., «Способ получения чистого изгиба балки постоянного сечения и устройство для его осуществления», RU 2526787 С2, 27 август 2014 г. Просмотрено: 13 октябрь 2025 г. Онлайн . Доступно на: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002526787_20140827_C2_RU/
- 78 ГОСТ Р 51814.5–2005. Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов. – Введ. 01.07.2005. – М.: Стандартиформ, 2005.
- 79 Р 50.1.097–2014. Статистические методы. Примеры измерений при анализе повторяемости и воспроизводимости. – Введ. 01.07.2015. – М.: Стандартиформ, 2015.
- 80 W. F. Quirós-Solano, N. Gaio, C. Silvestri, G. Pandraud, R. Dekker, и P. M. Sarro, «Metal and Polymeric Strain Gauges for Si-Based, Monolithically Fabricated Organs-on-Chips», *Micromachines*, т. 10, вып. 8, с. 536, авг. 2019, doi: 10.3390/mi10080536.
- 81 Шимолин Ю. Р., Трибушевская Л. А., Остроухов Л. А. Межлабораторные сличительные испытания в области измерений деформации //Эталоны. Стандартные образцы. – 2020. – №. 2. – С. 57-61.
- 82 ГОСТ 8.543-86 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений деформации, 1 январь 1987 г.
- 83 Шимолин Ю. Р. и Злыдникова Л. А. (Трибушевская), «Современные тенденции развития метрологического обеспечения измерений деформации», *Законодательная И Прикладная Метрология*, вып. 6 (157), сс. 23–25, 2018.
- 84 «Российская Федерация. Законы. Об обеспечении единства измерений" Федеральный закон от 26.06.2008 N 102-ФЗ (ред. от 08.08.2024, с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2025),» Принят Государственной думой 11 июня 2008 года. Одобрен Советом Федерации 18 июня 2008 года. В Интернете. Available: <https://legalacts.ru/doc/federalnyi-zakon-ot-26062008-n-102-fz-ob/?ysclid=m92r5osz9m184962680>. Дата обращения: 04 апрель 2025 .
- 85 Червяковская Н. Н., Соломахо В. Л. Методика разработки рабочих поверочных схем для средств измерений //Наука и техника. – 2007. – №. 3. – С. 29-33..
- 86 МИ 2230-92 Методика количественного обоснования поверочных схем при их разработке.
- 87 МИ 83-76 Государственная система обеспечения единства измерений. Методика определения параметров поверочных схем. - М.: Изд-во стандартов, 1976.
- 88 IEC 61757:2018 Fibre optic sensors - Generic specification. - TC 86/SC 86C. - 78 стр.

- 89 МИ 1742-87 ГСИ. Установка для воспроизведения деформации. Методика поверки. РАЗРАБОТАНЫ Всесоюзным научно-исследовательским институтом метрологии стандартных образцов. УТВЕРЖДЕНЫ ВНИИМСО 10 апреля 1987 г.
- 90 Трибушевская Л. А., Митрофанов В. В., Осипов Л. Е. Применение установок с балками равного сопротивления изгибу в качестве рабочих эталонов деформации //Эталон. Стандартные образцы. – 2024. – Т. 20. – №. 1. – С. 7-15, doi: 10.20915/2077-1177-2024-20-1-7-15.
- 91 МИ 187-86 Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Достоверность и требования к методикам поверки средств измерений. Утвержден 25.07.1986 ВНИИМС, разработан ВНИИМС, — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 39 с.
- 92 МИ 188-86 Методические указания. ГСИ. Средства измерений. Установление значений параметров методик поверки. Разработаны ВНИИМС. Утверждены ВНИИМС 1986 г. — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 12-39 с.
- 93 Whelan M. P. et al. Calibration of a Speckle Interferometry Full-Field Strain Measurement System //Strain. – 2008. – Т. 44. – №. 2. – С. 180-190, doi: 10.1111/j.1475-1305.2007.00364.x.
- 94 Artemyev M. I., Titov V. N. Modern equipment for testing materials working under temperature-force loading and in vacuum conditions //TestMat: Proceedings of the VI All-Russian conference on testing and research of material properties. – 2015. – С. 12-13.
- 95 Tabin J. Strain measurement by means of clip-on extensometers during discontinuous plastic flow at 4 K //Cryogenics. – 2022. – Т. 123. – С. 103451, doi: 10.1016/j.cryogenics.2022.103451.
- 96 Gangwar V., Acharyya S. K., Banerjee A. Calibration of tensile tests in drop-weight impact machine and implementation in simulation of Charpy impact tests //Procedia Structural Integrity. – 2024. – Т. 60. – С. 123-135, doi: 10.1016/j.prostr.2024.05.035.
- 97 Шишкин В. В., Гранев И. В., Шелемба И. С. Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков //Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3. – №. 1. – С. 61-75.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**Результаты исследования информативных параметров и влияющих факторов при измерении деформации
поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого
изгиба**

Таблица А.1 – Расчет дополнительной погрешности при измерении деформации в зависимости от исходной неплоскостности балки

Толщина балки Деформация		Радиус кривизны балки, обусловленный изначальной её неплоскостностью, r, мм													
		8000	12000	18000	27000	40500	60750	91125	136687,5	205031,3	307546,9	461320,3	691980,5	1037971	1556956
		Соответствующий изначальной неплоскостности прогиб балки. f, мкм													
		-1406	-937	-625	-417	-278	-185	-123	-82	-55	-37	-24	-16	-11	-7
h=6 мм ε=3000 млн ⁻¹	mF (10 ⁻⁶ см ²)	8,437	3,750	1,666	0,741	0,329	0,147	0,064	0,033	0,011	0,005	0,005	-0,007	0,030	0,002
	e (10 ⁻³ см ²)	0,375	0,250	0,167	0,111	0,074	0,050	0,033	0,025	0,012	0,009	0,014	-0,026	0,173	0,020
	Δε, %	0,0375	0,0250	0,0167	0,0111	0,0074	0,0049	0,0033	0,0022	0,0015	0,0010	0,0007	0,0004	0,0003	0,0002
ε=5000 млн ⁻¹	Δε, млн ⁻¹	1,875	1,250	0,833	0,556	0,370	0,247	0,165	0,110	0,073	0,049	0,033	0,022	0,014	0,010
h=4 мм ε=3000 млн ⁻¹	mF (10 ⁻⁶ см ²)	2,500	1,112	0,494	0,219	0,098	0,043	0,017	0,007	0,004	0,004	-0,005	0,020	0,002	-0,026
	e (10 ⁻³ см ²)	0,167	0,111	0,074	0,049	0,033	0,022	0,013	0,008	0,006	0,009	-0,018	0,115	0,014	-0,338
	Δε, %	0,0250	0,0167	0,0111	0,0074	0,0049	0,0033	0,0022	0,0015	0,0010	0,0007	0,0004	0,0003	0,0002	0,0001
ε=5000 млн ⁻¹	Δε, млн ⁻¹	1,250	0,833	0,556	0,370	0,247	0,165	0,110	0,073	0,049	0,033	0,022	0,014	0,010	0,006
h=8 мм ε=3000 млн ⁻¹	mF (10 ⁻⁶ см ²)	20,000	8,889	3,951	1,756	0,781	0,345	0,150	0,066	0,029	0,007	-0,009	0,003	0,003	-0,052
	e (10 ⁻³ см ²)	0,667	0,444	0,296	0,197	0,132	0,087	0,057	0,037	0,025	0,009	-0,018	0,009	0,014	-0,338
	Δε, %	0,0500	0,0333	0,0222	0,0148	0,0099	0,0066	0,0044	0,0029	0,0020	0,0013	0,0009	0,0006	0,0004	0,0003
ε=5000 млн ⁻¹	Δε, млн ⁻¹	2,501	1,667	1,111	0,741	0,494	0,329	0,219	0,146	0,098	0,065	0,043	0,029	0,019	0,013
h=10 мм ε=3000 млн ⁻¹	mF (10 ⁻⁶ см ²)	39,063	17,361	7,716	3,429	1,524	0,679	0,305	0,135	0,069	0,025	0,001	0,013	-0,024	-0,024
	e (10 ⁻³ см ²)	1,042	0,694	0,463	0,309	0,206	0,137	0,093	0,061	0,047	0,026	0,001	0,030	-0,082	-0,123
	Δε, %	0,0625	0,0417	0,0278	0,0185	0,0123	0,0082	0,0055	0,0037	0,0024	0,0016	0,0011	0,0007	0,0005	0,0003
ε=5000 млн ⁻¹	Δε, млн ⁻¹	3,126	2,084	1,389	0,926	0,617	0,412	0,274	0,183	0,122	0,081	0,054	0,036	0,024	0,016

Примечание – исходная неплоскостность выражена через радиус кривизны и соответствующий ему первоначальный прогиб балки на длине 300 мм.
mF (10⁻⁶ см²) - приведенная площадь;
e (10⁻³ см²) - расстояние нейтральной оси nn от центра тяжести с;
Δε, % - дополнительная погрешность при измерении деформации, обусловленная исходной неплоскостностью балки.

Таблица А.2 – Дополнительная погрешность при измерении деформации в зависимости от материала балки для диапазона изменения рабочих температур 0,5 °С и 1 °С

Материал	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	Деформация, млн ⁻¹							
		10	50	100	500	1000	2000	3000	5000
Сталь	0,5	0,000002	0,00001	0,000019	0,000094	0,00019	0,000375	0,00057	0,00094
	1	0,000004	0,000018	0,000038	0,00019	0,00038	0,00075	0,0011	0,0019
Сплав Al	0,5	0,000004	0,000018	0,000036	0,00018	0,00036	0,00075	0,0011	0,0018
	1	0,000007	0,000036	0,000073	0,00036	0,00073	0,0015	0,0022	0,0036
Поликарбонат	0,5	0,00001	0,000036	0,000074	0,00036	0,00073	0,0015	0,0022	0,0036
	1	0,00001	0,000074	0,00015	0,00074	0,0015	0,0030	0,0043	0,0072

Таблица А.3 – Результаты исследований стабильности поддержания нагрузки

Период времени	0 мин	30 мин	1 час	2 часа	3 часа	4 часа	5 часов	Δf , мкм	$\Delta \epsilon$, млн ⁻¹
Значение прогиба, мкм	870,22	870,22	870,26	870,26	870,31	870,32	871,32	0,1	0,2
	1500,14	1501,15	1500,18	1500,19	1500,21	1500,21	1500,21	0,07	0,2
	2000,17	2000,17	2000,17	2000,17	2000,18	2000,18	2000,18	0,01	0,01

Таблица А.4 – Расчетные значения поправки Π_1 для материалов балки с коэффициентом Пуассона 0,30 и 0,35, в зависимости от толщины балки

в микрометрах

$\varepsilon_{\text{ном}}$ млн ⁻¹	Номинальная толщина балки, мм													
	4		5		6		7		8		9		10	
	коэффициент Пуассона													
	0,30	0,35	0,30	0,35	0,30	0,35	0,30	0,35	0,30	0,35	0,30	0,35	0,30	0,35
500	1,4	1,7	1,1	1,3	1,0	1,1	0,8	1,0	0,7	0,8	0,6	0,7	0,6	0,7
1000	2,8	3,3	2,3	2,7	1,9	2,2	1,6	1,9	1,4	1,7	1,3	1,5	1,1	1,3
2000	5,7	6,7	4,6	5,3	3,8	4,5	3,3	3,8	2,9	3,3	2,5	3,0	2,3	2,7
3000	8,6	10,3	6,9	8,0	5,7	6,7	4,9	5,7	4,3	5,0	3,8	4,5	3,4	4,0
4000	—	—	—	—	7,6	8,9	6,5	7,6	5,7	6,7	5,1	5,9	4,6	5,3
5000	—	—	—	—	9,5	11,1	8,2	9,5	7,1	8,3	6,4	7,4	5,7	6,7

Условия использования рассчитанных поправок, приведенных в таблице А.4: толщина балки не отличается от номинальной более чем на 0,1 мм и значения измеряемой деформации, не отличаются от приведенных в таблице А.4 более чем на $0,05 \cdot \varepsilon_{\text{ном}}$, но не более 150 млн⁻¹. Для указанных условий, с учетом точности определения величин, входящих в (2.5) изменение размера поправки, не превышает 5 %, что не является значимым для размера самой поправки, который не превышает 11 мкм.

Таблица А.5 – Расчетные значения поправок P_2 и P_2' в зависимости от толщины балки

в микрометрах

$\varepsilon_{\text{НОМ}}$ млн ⁻¹	Номинальная толщина балки, мм													
	4		5		6		7		8		9		10	
	P_2	P_2'	P_2	P_2'	P_2	P_2'	P_2	P_2'	P_2	P_2'	P_2	P_2'	P_2	P_2'
500	0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1000	0,3	-0,3	0,2	-0,2	0,1	-0,1	0,1	-0,1	0,1	-0,1	0,1	-0,1	0,1	-0,1
2000	1,2	-1,2	0,8	-0,8	0,5	-0,5	0,4	-0,4	0,3	-0,3	0,2	-0,2	0,2	-0,2
3000	2,7	-2,7	1,7	-1,7	1,2	-1,2	0,9	-0,9	0,7	-0,7	0,5	-0,5	0,4	-0,4
4000	4,6	-4,7	3,0	-3,1	2,1	-2,2	1,5	-1,5	1,2	-1,2	0,9	-0,9	0,7	-0,7
5000	7,5	-7,7	4,7	-4,9	3,3	-3,4	2,4	-2,4	1,8	-1,9	1,5	-1,5	1,0	-1,1

Методикой измерений предусмотрены условия использования рассчитанных поправок, приведенных в таблице А.5 – шаровые опоры диаметром $(5,0 \pm 0,2)$ мм, базы прогибомера $(80,0 \pm 0,5)$ мм и значений толщины балок и значений деформации, отличающихся от номинальных не более чем на 3 %. Использование приведенных поправок не является значимым дополнительным источником погрешности измерений деформации, в случае несоответствия указанных условий для указанных значений, с учетом точности определения величин, входящих в (2.5) изменение размера поправки не превышает 5 %, что не является значимым, для размера самой поправки, которая не превышает 8 мкм.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты оценивания показателей точности методики измерений деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба

Таблица Б.1 – Значения коэффициентов влияния в зависимости от толщины балки

в миллионных долях/микрометр

h мм	Коэффициент влияния	$\varepsilon_{\text{НОМ}}$, млн ⁻¹					
		500	1000	2000	3000	4000	5000
4	C_1	2,486	2,485	2,481	2,478	2,473	2,468
	C_2	0,026	0,104	0,416	0,938	1,673	2,620
	C_3	-0,013	-0,025	-0,051	-0,076	-0,102	-0,128
5	C_1	3,108	3,106	3,102	3,098	3,094	3,089
	C_2	0,017	0,067	0,266	0,599	1,069	1,672
	C_3	-0,013	-0,025	-0,051	-0,076	-0,102	-0,128
6	C_1	3,729	3,727	3,723	3,718	3,713	3,708
	C_2	0,012	0,046	0,185	0,416	0,741	1,159
	C_3	-0,013	-0,025	-0,051	-0,076	-0,102	-0,128
7	C_1	4,351	4,349	4,344	4,339	4,333	4,328
	C_2	0,008	0,034	0,136	0,305	0,544	0,850
	C_3	-0,013	-0,025	-0,051	-0,076	-0,102	-0,128
8	C_1	4,973	4,970	4,964	4,959	4,953	4,947
	C_2	0,006	0,026	0,104	0,234	0,416	0,651
	C_3	-0,013	-0,025	-0,051	-0,076	-0,102	-0,128
9	C_1	5,594	5,591	5,585	5,579	5,572	5,566
	C_2	0,005	0,021	0,082	0,184	0,329	0,514
	C_3	-0,013	-0,026	-0,051	-0,076	-0,102	-0,128
10	C_1	6,216	6,212	6,206	6,199	6,192	6,185
	C_2	0,004	0,017	0,066	0,149	0,266	0,416
	C_3	-0,013	-0,026	-0,051	-0,076	-0,102	-0,128

$$C_1 = \frac{\partial \varepsilon}{\partial F}, C_2 = \frac{\partial \varepsilon}{\partial h}, C_3 = \frac{\partial \varepsilon}{\partial L}$$

В случае толщины балки отличающихся от приведенных в таблице Б.1 более чем на 0,15 мм и значений измеряемой деформации, отличающихся от приведенных в таблице Б.1 более чем на 150 млн⁻¹, значения коэффициентов подлежат расчету по формулам (2.53) – (2.61).

Таблица Б.2 – Стандартное отклонение погрешности измерений деформации балки, обусловленная непараллельностью рабочих и боковых граней балки

В МИЛЛИОННЫХ ДОЛЯХ

Толщина балки, мм	Деформация балки*, млн ⁻¹					
	ϵ_{500}	ϵ_{1000}	ϵ_{2000}	ϵ_{3000}	ϵ_{4000}	ϵ_{5000}
4	0,92	1,85	3,70	5,54	7,39	9,24
5	0,75	1,50	3,00	4,50	6,00	7,51
6	0,64	1,27	2,54	3,81	5,08	6,35
7	0,55	1,11	2,21	3,32	4,42	5,53
8	0,49	0,98	1,96	2,94	3,93	4,91
9	0,44	0,89	1,77	2,66	3,54	4,43
10	0,40	0,81	1,62	2,42	3,23	4,04

* - без учета знака деформации

Таблица Б.3 – Стандартное отклонение погрешности измерений деформации балки, обусловленной непараллельностью рабочих и боковых граней балки

в процентах

Толщина балки, мм	Деформация балки*, млн ⁻¹					
	ϵ_{500}	ϵ_{1000}	ϵ_{2000}	ϵ_{3000}	ϵ_{4000}	ϵ_{5000}
4	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
5	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
6	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127
7	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111
8	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098
9	0,089	0,089	0,089	0,089	0,089	0,089
10	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081

* - без учета знака деформации

Таблица Б.4 – Составляющая погрешности измерений деформации стальной балки, обусловленная изменением геометрических размеров балки при изменении температуры

В МИЛЛИОННЫХ ДОЛЯХ

Толщина балки, мм	Деформация балки*, млн ⁻¹					
	ϵ_{500}	ϵ_{1000}	ϵ_{2000}	ϵ_{3000}	ϵ_{4000}	ϵ_{5000}
4	0,0007	0,0028	0,0113	0,0256	0,0456	0,0714
5	0,0006	0,0023	0,0091	0,0204	0,0364	0,0569
6	0,0005	0,0019	0,0076	0,0170	0,0303	0,0474
7	0,0004	0,0016	0,0065	0,0146	0,0260	0,0406
8	0,0003	0,0014	0,0057	0,0128	0,0227	0,0355
9	0,0003	0,0013	0,0050	0,0113	0,0200	0,0313
10	0,0003	0,0011	0,0046	0,0102	0,0182	0,0284

* - без учета знака деформации

Таблица Б.5 – Расчет составляющей погрешности измерений деформации балки из сплава алюминия, обусловленной изменением геометрических размеров балки при изменении температуры

В МИЛЛИОННЫХ ДОЛЯХ

Толщина балки, мм	Деформация балки*, млн ⁻¹					
	ϵ_{500}	ϵ_{1000}	ϵ_{2000}	ϵ_{3000}	ϵ_{4000}	ϵ_{5000}
4	0,0013	0,0052	0,0210	0,0473	0,0843	0,1320
5	0,0011	0,0042	0,0168	0,0378	0,0673	0,1053
6	0,0009	0,0035	0,0140	0,0314	0,0561	0,0876
7	0,0008	0,0030	0,0120	0,0270	0,0480	0,0751
8	0,0006	0,0027	0,0105	0,0236	0,0420	0,0657
9	0,0006	0,0024	0,0093	0,0210	0,0370	0,0579
10	0,0006	0,0021	0,0084	0,0189	0,0336	0,0525

* - без учета знака деформации

Таблица Б.6 – Составляющая погрешности измерений деформации балки из поликарбоната, обусловленная изменением геометрических размеров балки при изменении температуры

В МИЛЛИОННЫХ ДОЛЯХ

Толщина балки, мм	Деформация балки*, млн ⁻¹					
	ε_{500}	ε_{1000}	ε_{2000}	ε_{3000}	ε_{4000}	ε_{5000}
4	0,0041	0,0165	0,0660	0,1490	0,2657	0,4161
5	0,0033	0,0133	0,0528	0,1191	0,2122	0,3320
6	0,0027	0,0111	0,0441	0,0991	0,1767	0,2762
7	0,0024	0,0095	0,0377	0,0850	0,1513	0,2365
8	0,0020	0,0084	0,0330	0,0744	0,1324	0,2071
9	0,0019	0,0076	0,0293	0,0661	0,1165	0,1826
10	0,0017	0,0066	0,0266	0,0595	0,1060	0,1655

* - без учета знака деформации

Таблица Б.7 – Расчет составляющей погрешности измерений прогиба, обусловленной неоднородностью механических и геометрических параметров балки с номинальным прогибом 1100 мкм

в микрометрах

f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_t	S_f	MS_{within} ($t \leq t \leq (t+9)$)	MS_{among} ($t \leq t \leq (t+9)$)	H_f
-13,22	-13,56	-13,22	-13,56	-13,26	-13,37	0,18	0,07	0,26	0,20
-13,98	-13,85	-13,98	-13,85	-13,97	-13,92	0,07	0,07	0,25	0,19
-13,75	-13,66	-13,75	-13,66	-13,51	-13,67	0,10	0,09	0,16	0,12
-13,71	-13,37	-13,71	-13,37	-13,54	-13,54	0,17	0,09	0,25	0,18
-13,96	-13,25	-13,96	-13,25	-13,98	-13,68	0,39	0,08	0,25	0,18
-13,47	-13,54	-13,47	-13,54	-13,40	-13,49	0,06	0,07	0,28	0,21
-13,17	-13,08	-13,17	-13,08	-12,92	-13,08	0,10	0,07	0,33	0,23
-13,45	-13,36	-13,45	-13,36	-13,23	-13,37	0,09	0,08	0,22	0,17
-14,08	-13,87	-13,08	-13,87	-13,03	-13,59	0,49	0,10	0,21	0,14
-14,00	-13,23	-13,00	-13,03	-13,72	-13,40	0,44	0,08	0,23	0,18
-13,50	-13,47	-13,50	-13,47	-13,46	-13,48	0,02	0,06	0,26	0,20
-13,94	-13,97	-13,08	-13,97	-13,11	-13,61	0,47	0,06	0,34	0,24
-13,97	-13,92	-13,97	-13,92	-13,88	-13,93	0,04	0,04	0,36	0,25
-13,56	-13,56	-13,56	-13,56	-13,56	-13,56	0,00	0,04	0,33	0,24
-13,37	-13,36	-13,07	-13,04	-13,05	-13,18	0,17	0,04	0,42	0,27
-13,83	-13,79	-13,83	-13,79	-13,58	-13,76	0,10	0,06	0,38	0,25
-13,83	-13,31	-13,83	-13,31	-13,22	-13,50	0,30	0,06	0,39	0,26
-13,97	-13,10	-13,97	-13,10	-13,97	-13,62	0,48	0,07	0,39	0,25
-13,26	-13,45	-13,26	-13,45	-13,18	-13,32	0,12	0,05	0,39	0,26
-13,78	-13,88	-13,78	-13,88	-13,90	-13,84	0,06	0,05	0,45	0,28
-13,16	-13,13	-13,16	-13,13	-13,30	-13,18	0,07	0,06	0,37	0,25
-13,27	-13,39	-13,27	-13,39	-13,44	-13,35	0,08	0,06	0,40	0,26
-13,98	-13,68	-13,98	-13,68	-13,96	-13,86	0,16	0,06	0,43	0,27

f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_t	S_f	MS_{within} ($t \leq t \leq (t+9)$)	MS_{among} ($t \leq t \leq (t+9)$)	H_f
-13,07	-13,12	-13,07	-13,12	-13,07	-13,09	0,03	0,06	0,35	0,24
-13,82	-12,90	-13,82	-13,90	-13,96	-13,68	0,44	0,06	0,33	0,23
-13,70	-13,86	-13,70	-13,86	-13,76	-13,78	0,08	0,04	0,45	0,29
-13,00	-13,96	-13,00	-13,96	-13,57	-13,49	0,48	0,04	0,45	0,29
-13,11	-13,52	-13,11	-13,52	-13,45	-13,35	0,21	0,03	0,45	0,29
-13,17	-13,05	-13,17	-13,05	-13,19	-13,13	0,07	0,03	0,56	0,33
-13,69	-13,33	-13,69	-13,33	-13,65	-13,54	0,19	0,03	0,53	0,32
-13,10	-13,04	-13,10	-13,04	-13,14	-13,08	0,04	0,02	0,57	0,33
-13,13	-13,12	-13,13	-13,12	-13,58	-13,21	0,20	0,02	0,52	0,32
-13,10	-13,04	-13,10	-13,04	-13,14	-13,08	0,04	0,02	0,62	0,35
-13,14	-13,16	-13,14	-13,16	-13,17	-13,16	0,01	0,03	0,54	0,32
-13,96	-13,89	-13,96	-13,89	-13,88	-13,92	0,04	0,03	0,45	0,29
-13,88	-13,73	-13,88	-13,73	-13,72	-13,79	0,08	0,05	0,38	0,26
-13,01	-13,04	-13,01	-13,04	-13,96	-13,21	0,42	0,05	0,44	0,28
-13,81	-13,81	-13,82	-13,81	-13,83	-13,82	0,01	0,04	0,40	0,27
-13,29	-13,29	-13,29	-13,29	-13,29	-13,29	0,00	0,04	0,36	0,25
-13,09	-13,04	-13,09	-13,04	-13,14	-13,08	0,04	0,04	0,34	0,24
-13,52	-13,53	-13,52	-13,53	-13,25	-13,47	0,12	0,04	0,24	0,20
-13,90	-13,95	-13,90	-13,95	-13,85	-13,91	0,04	0,04	0,33	0,24
-13,78	-13,86	-13,78	-13,86	-13,08	-13,68	0,33	0,04	0,27	0,21
-13,58	-13,53	-13,58	-13,53	-13,53	-13,55	0,03	0,03	0,28	0,22
-13,92	-13,09	-13,92	-13,09	-14,00	-13,60	0,47	0,03	0,28	0,22
-13,02	-13,08	-13,02	-13,08	-13,07	-13,06	0,03	0,01	0,38	0,27
-13,46	-13,44	-13,46	-13,44	-13,74	-13,50	0,13	0,03	0,22	0,19
-13,41	-13,90	-13,41	-13,90	-13,80	-13,68	0,25	0,03	0,21	0,19
-13,47	-13,43	-13,47	-13,43	-13,39	-13,44	0,03	0,02	0,22	0,20
-13,64	-13,61	-13,64	-13,61	-13,65	-13,63	0,02	0,02	0,20	0,19

f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_t	S_f	MS_{within} ($t \leq t \leq (t+9)$)	MS_{among} ($t \leq t \leq (t+9)$)	H_f
-13,99	-13,97	-13,99	-13,97	-14,02	-13,98	0,02	0,03	0,21	0,19
-13,54	-13,49	-13,54	-13,49	-13,48	-13,51	0,03	0,03	0,23	0,20
-13,55	-13,26	-13,55	-13,26	-13,27	-13,38	0,16	0,03	0,24	0,21
-13,50	-13,52	-13,50	-13,52	-13,56	-13,52	0,02	0,02	0,39	0,27
-13,93	-13,99	-13,93	-13,99	-14,02	-13,97	0,04	0,02	0,39	0,27
-14,00	-13,14	-14,00	-13,14	-13,95	-13,64	0,46	0,04	0,27	0,22
-13,74	-13,67	-13,74	-13,67	-13,63	-13,69	0,05	0,02	0,27	0,22
-13,48	-13,48	-13,48	-13,48	-13,49	-13,49	0,00	0,02	0,25	0,22
-13,59	-13,54	-13,59	-13,54	-13,55	-13,56	0,03	0,03	0,27	0,22
-13,65	-13,76	-13,65	-13,76	-13,94	-13,76	0,12	0,03	0,33	0,24
-13,19	-13,16	-13,19	-13,16	-13,24	-13,18	0,03	0,03	0,34	0,25
-13,43	-13,42	-13,43	-13,42	-13,46	-13,43	0,02	0,04	0,29	0,22
-12,92	-12,99	-12,92	-12,99	-13,14	-12,99	0,09	0,05	0,31	0,23
-13,55	-13,54	-13,55	-13,54	-13,55	-13,54	0,01	0,05	0,17	0,15
-13,77	-13,11	-13,77	-13,11	-13,74	-13,50	0,36	0,05	0,19	0,17
-13,39	-13,24	-13,39	-13,24	-13,25	-13,30	0,08			
-13,54	-13,75	-13,54	-13,75	-13,52	-13,62	0,12			
-13,78	-13,74	-13,78	-13,74	-13,00	-13,61	0,34			
-13,84	-13,74	-13,84	-13,74	-13,90	-13,81	0,07			
-13,93	-13,87	-13,93	-13,87	-13,38	-13,79	0,23			
-13,84	-13,23	-13,84	-13,23	-13,22	-13,47	0,34			
-13,31	-13,14	-13,31	-13,14	-13,70	-13,32	0,23			
Стандартное отклонение результатов измерений прогиба деформированной балки, обусловленное неоднородностью свойств балки, мкм									0,24

Таблица Б.8 – Расчет составляющей погрешности измерений деформации обусловленной неоднородностью механических параметров балки

В МИЛЛИОННЫХ ДОЛЯХ

Толщина балки, мм	Деформация балки, млн ⁻¹					
	ε_{500}	ε_{1000}	ε_{2000}	ε_{3000}	ε_{4000}	ε_{5000}
4	0,60	0,60	0,60	0,59	0,59	0,59
5	0,75	0,75	0,74	0,74	0,74	0,74
6	0,90	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
7	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
8	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19
9	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34
10	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,48

Таблица Б.9 – Результаты экспериментальных исследований оценки показателя повторяемости измерений толщины балки, $p=1$, $N=10$

в миллиметрах

	Номер единичного измерения в условиях повторяемости, мм									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5,9469	5,9466	5,9439	5,9468	5,9412	5,9421	5,9429	5,9418	5,9425	5,9417
2	5,947	5,9467	5,9439	5,9467	5,9412	5,9421	5,9429	5,9418	5,9425	5,9417
3	5,9471	5,9466	5,9439	5,9467	5,9412	5,9421	5,9427	5,9418	5,9425	5,9417
4	5,9471	5,9466	5,944	5,9467	5,9411	5,9421	5,9427	5,9418	5,9424	5,9417
5	5,947	5,9466	5,9439	5,9468	5,9411	5,9421	5,9427	5,9418	5,9424	5,9416
h_{i1}	5,94702	5,94662	5,94392	5,94674	5,94116	5,9421	5,94278	5,9418	5,94246	5,94168
h_1	5,9436									
$S_{h_1}^2, \text{мм}^2$	$5,32 \cdot 10^{-7}$									

Таблица Б.10 – Результаты экспериментальных исследований оценки показателя повторяемости измерений толщины балки, $p=2$, $N=10$

в миллиметрах

	Номер единичного измерения в условиях повторяемости, мм									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5,9391	5,9407	5,9417	5,9414	5,9411	5,9417	5,9417	5,9408	5,9423	5,9407
2	5,939	5,9408	5,9417	5,9413	5,9411	5,9417	5,9416	5,9408	5,9423	5,9407
3	5,939	5,9407	5,9417	5,9413	5,9412	5,9417	5,9416	5,9408	5,9423	5,9407
4	5,939	5,9408	5,9417	5,9413	5,9411	5,9417	5,9416	5,9408	5,9423	5,9407
5	5,939	5,9407	5,9417	5,9413	5,9411	5,9417	5,9416	5,9408	5,9423	5,9407
h_{i2}	5,93902	5,94074	5,9417	5,94132	5,94112	5,9417	5,94162	5,9408	5,9423	5,9407
h_2	5,9411									
$S_{h_2}^2, \text{мм}^2$	$1,60 \cdot 10^{-7}$									

Таблица Б.11 – Результаты экспериментальных исследований оценки показателя повторяемости измерений толщины балки, $p=3$, $N=10$

в миллиметрах

	Номер единичного измерения в условиях повторяемости, мм									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5,9412	5,94047	5,9404	5,9404	5,9403	5,9399	5,9398	5,9408	5,9395	5,9396
2	5,9411	5,9404	5,9404	5,9404	5,9403	5,9399	5,9398	5,9407	5,9395	5,9396
3	5,9412	5,9404	5,9403	5,9404	5,9403	5,9397	5,9498	5,9408	5,9395	5,9396
4	5,9411	5,9404	5,9402	5,9404	5,9403	5,9399	5,9398	5,9407	5,9395	5,9396
5	5,9411	5,9404	5,9404	5,9404	5,9403	5,9399	5,9398	5,9408	5,9395	5,9396
h_{i3}	5,94114	5,940414	5,94034	5,9404	5,9403	5,93986	5,9418	5,94076	5,9395	5,9396
h_3	5,9404									
$S_{h_3}^2, \text{мм}^2$	$9,76 \cdot 10^{-8}$									

Таблица Б.12 – Результаты экспериментальных исследований оценки показателя повторяемости измерений толщины балки, $p=4$, $N=10$

в миллиметрах

	Номер единичного измерения в условиях повторяемости, мм									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5,9437	5,9422	5,9427	5,9423	5,942	5,9438	5,9423	5,9437	5,9421	5,9416
2	5,9437	5,9422	5,9427	5,9423	5,942	5,9438	5,9423	5,9437	5,9421	5,9416
3	5,9437	5,9422	5,9427	5,9422	5,942	5,9438	5,9423	5,9437	5,9421	5,9416
4	5,9436	5,9422	5,9427	5,9422	5,942	5,9437	5,9423	5,9437	5,9421	5,9417
5	5,9436	5,9423	5,9427	5,9423	5,942	5,9438	5,9423	5,9437	5,9421	5,9416
h_{i4}	5,94366	5,94222	5,9427	5,94226	5,942	5,94378	5,9423	5,9437	5,9421	5,94162
h_4	5,9426									
$S_{h_4}^2, \text{мм}^2$	$1,25 \cdot 10^{-7}$									

Таблица Б.13 – Результаты экспериментальных исследований оценки показателя повторяемости измерений толщины балки, $p=5$, $N=10$

в миллиметрах

	Номер единичного измерения в условиях повторяемости, мм									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5,9391	5,9433	5,9395	5,9404	5,9428	5,9429	5,9426	5,9419	5,9409	5,9416
2	5,9391	5,9433	5,9395	5,9405	5,9429	5,9429	5,9426	5,9419	5,9409	5,9417
3	5,9392	5,9433	5,9395	5,9405	5,9429	5,943	5,9427	5,9419	5,9409	5,9417
4	5,9392	5,9433	5,9396	5,9405	5,9429	5,943	5,9427	5,9419	5,9409	5,9417
5	5,9392	5,9433	5,9396	5,9405	5,9429	5,943	5,9426	5,9419	5,9409	5,9417
h_{i5}	5,939168	5,9433	5,93954	5,94048	5,94288	5,94296	5,94264	5,9419	5,9409	5,94168
h_5	5,9415									
$S_{h_5}^2, \text{мм}^2$	$4,32 \cdot 10^{-7}$									

$$G_{h(\max)} = 0,57 < 0,841; \text{ для } (S_{h_{ip}}^2)_{\max} = 5,32 \cdot 10^{-7} \text{мм}^2;$$

$$S_{hp}^2 = 3,13 \cdot 10^{-7} \text{мм}^2; \sigma_{eh}^2 \approx 3,13 \cdot 10^{-7} \text{мм}^2.$$

Таблица Б.14 – Определение дисперсии результата измерений толщины балки в условиях установленных граничных значений влияющих факторов

$S_{hp}^2 \cdot 10^{-7}$, мм ²	Общее среднее	$S_h \cdot 10^{-6}$, мм ²	$GR_{h(max)}$	$GR_{h(min)}$	$GR_{5(табл)}$	Заключение	$S_{Lh}^2 \cdot 10^{-7}$, мм ²	$S_{Rh}^2 \cdot 10^{-7}$, мм ²
3,13	5,942	1,62	1,384	1,140	1,715	++	2,62	5,75

Таблица Б.15 – Определение показателя повторяемости результата измерений прогиба балки

в микрометрах

Номер единичного измерения в условиях повторяемости, мм	Номер серии в условиях повторяемости (р)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_{1p}	956,07	956,10	956,29	956,41	956,24	956,06	956,18	956,02	955,97	956,50
f_{2p}	956,08	956,11	956,27	956,39	956,29	956,00	956,26	956,08	956,01	956,36
f_{3p}	956,10	956,09	956,39	956,32	956,30	956,02	956,09	956,00	956,22	956,24
f_{4p}	956,14	956,09	956,37	956,47	956,16	955,99	956,20	956,08	956,21	956,15
f_{5p}	956,19	956,06	956,38	956,31	956,33	956,17	956,21	956,02	956,18	956,27
f_p	956,08	956,09	956,34	956,38	956,26	956,05	956,19	956,03	956,12	956,30
S_{fp}^2	0,00044	0,00006	0,00050	0,00070	0,00071	0,00086	0,00062	0,00023	0,00225	0,00282
$G_f(max)$	0,307									
$G_f(табл)$	0,841									
Заключение	+									
S_{fp}^2 , мкм ²	0,00092									
σ_{ef}^2 , мкм ²	0,00092									

Таблица Б.16 – Определение дисперсии результата измерений прогиба балки в условиях установленных граничных значений влияющих факторов

S_{fp}^2 , мкм ²	Общее среднее	S_f^2 , мкм ²	$GR_{f(max)}$	$GR_{f(min)}$	$GR_{10(табл)}$	Заключение	S_{Lf}^2 , мкм ²	S_{Rf}^2 , мкм ²
0,00092	956,18	0,0161	1,519	1,194	2,290	++	0,003157	0,0041

Таблица Б.17 – Определение показателя повторяемости результата измерений длины базы прогибомера

Номер серии	Номер единичного измерения в условиях повторяемости, мм					Среднее	S_{lpi}^2 , мм ²	$G_{l(max)}$	$G_{10(табл)}$	Заключение	S_{lp}^2 , мм ²
	n1	n2	n3	n4	n5						
1	79,489	79,542	79,529	79,418	79,412	79,478	0,00074	0,317	1,887	+	0,00039
2	79,415	79,414	79,405	79,447	79,319	79,400	0,00046				
3	79,436	79,436	79,448	79,44	79,433	79,439	0,00001				
4	79,429	79,430	79,439	79,389	79,421	79,422	0,00007				
5	79,437	79,415	79,424	79,528	79,528	79,466	0,00064				
6	79,428	79,428	79,359	79,347	79,445	79,401	0,00040				

$\sigma_{el}^2 \approx 0,00039 \text{ мм}^2$.

Таблица Б.18 – Определение дисперсии результата измерений длины базы прогибомера в условиях установленных граничных значений влияющих факторов

S_{lp}^2 , мкм ²	Общее среднее	S_l^2 , мкм ²	$GR_{l(max)}$	$GR_{l(min)}$	$GR_{6(табл)}$	Заключение	S_{Li}^2 , мм ²	S_{Rl}^2 , мм ²
0,00039	79,441	0,000793	1,331	1,406	1,887	++	0,00011	0,00050

Таблица Б.19 – Оценка показателя повторяемости результата измерений деформации, σ_r

В МИЛЛИОННЫХ ДОЛЯХ

Номинальная толщина балки, мм	Деформация балки*, млн ⁻¹					
	500	1000	2000	3000	4000	5000
4	0,2	0,5	1,0	1,5	2,2	2,9
5	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	2,6
6	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
7	0,3	0,5	1,0	1,4	1,9	2,4
8	0,3	0,5	1,0	1,4	1,9	2,4
9	0,3	0,5	1,0	1,4	1,9	2,4
10	0,3	0,5	1,0	1,4	1,9	2,4

* - без учета знака деформации

Таблица Б.20 – Оценка показателя воспроизводимости результата измерений деформации, σ_R

В МИЛЛИОННЫХ ДОЛЯХ

Номинальная толщина балки, мм	Деформация балки*, млн ⁻¹					
	500	1000	2000	3000	4000	5000
4	0,3	0,6	1,1	1,8	2,6	3,5
5	0,3	0,6	1,1	1,7	2,3	3,1
6	0,4	0,6	1,1	1,7	2,3	2,9
7	0,4	0,6	1,1	1,6	2,2	2,8
8	0,4	0,6	1,1	1,6	2,2	2,8
9	0,4	0,6	1,1	1,6	2,2	2,7
10	0,5	0,7	1,1	1,6	2,2	2,7

* - без учета знака деформации

Таблица Б.21 - Результаты расчета погрешности измерений деформации для стальной балки толщиной 4 мм

В МИЛЛИОННЫХ ДОЛЯХ

Составляющие погрешности	Деформация, млн ⁻¹					
	500	1000	2000	3000	4000	5000
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial F} \cdot 2 \cdot \frac{\Delta_{дп}}{\sqrt{3}}$	0,211	0,211	0,211	0,210	0,210	0,209
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial F} \cdot H_{дп}$	0,224	0,224	0,223	0,223	0,223	0,222
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial F} \cdot \frac{\Delta_{км}}{\sqrt{3}}$	0,249	0,248	0,248	0,248	0,247	0,247
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial h} \cdot \frac{\Delta_{опт}}{\sqrt{3}}$	0,008	0,031	0,123	0,276	0,492	0,769
$c_{\Delta hb} \Delta_{hb}$	0,267	0,533	1,067	1,600	2,133	2,667
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial h} \cdot \Delta_{th}$	0,006	0,013	0,025	0,038	0,051	0,063
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial L} \cdot \frac{\Delta_m}{\sqrt{3}}$	0,038	0,076	0,151	0,227	0,303	0,379
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial F} \cdot \sqrt{3} \cdot s_H$	1,0323	1,032	1,030	1,029	1,027	1,025
Δ_c	1,3	1,4	1,7	2,2	2,7	3,3
S_{Δ}	0,7	0,7	0,9	1,1	1,4	1,7
S_R	0,3	0,6	1,2	1,8	2,6	3,4
S_{Σ}	0,7	0,9	1,5	2,2	3,0	3,8
Δ	1,4	1,8	2,9	4,3	5,9	7,3

Таблица Б.22 - Результаты расчета погрешности измерений деформации для балки из сплава алюминия толщиной 6 мм

В МИЛЛИОННЫХ ДОЛЯХ

Составляющие погрешности	Деформация, млн ⁻¹					
	500	1000	2000	3000	4000	5000
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial F} \cdot 2 \cdot \frac{\Delta_{дп}}{\sqrt{3}}$	0,316	0,316	0,316	0,316	0,315	0,315
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial F} \cdot H_{дп}$	0,336	0,335	0,335	0,335	0,334	0,334
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial F} \cdot \Delta_{км}$	0,373	0,373	0,372	0,372	0,371	0,371
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial F} \cdot \frac{\Delta_{км}}{\sqrt{3}}$	0,003	0,014	0,054	0,123	0,218	0,341
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial h} \cdot \frac{\Delta_{опт}}{\sqrt{3}}$	0,183	0,367	0,733	1,100	1,467	1,833
$\left \frac{\partial \varepsilon}{\partial h} \right \cdot \Delta_{th}$	0,006	0,013	0,025	0,038	0,051	0,063
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial L} \cdot \frac{\Delta_{м}}{\sqrt{3}}$	0,038	0,076	0,151	0,227	0,303	0,380
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial F} \cdot \sqrt{3} \cdot s_H$	1,548	1,548	1,546	1,544	1,542	1,540
Δ_c	1,8	1,9	2,0	2,2	2,5	2,8
S_{Δ}	1,0	1,0	1,0	1,2	1,3	1,5
S_R	0,4	0,6	1,2	1,7	2,3	3,0
S_{Σ}	1,0	1,2	1,6	2,1	2,7	3,3
Δ	2,0	2,3	3,1	4,1	5,2	6,5

Таблица Б.23 - Результаты расчета погрешности измерений деформации для балки из поликарбоната толщиной 9 мм

В МИЛЛИОННЫХ ДОЛЯХ

Составляющие погрешности	Деформация, млн-1					
	500	1000	2000	3000	4000	5000
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial F} \cdot 2 \cdot \frac{\Delta_{дп}}{\sqrt{3}}$	0,527	0,527	0,527	0,526	0,525	0,525
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial F} \cdot H_{дп}$	0,559	0,559	0,559	0,558	0,557	0,557
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial F} \cdot \frac{\Delta_{км}}{\sqrt{3}}$	0,622	0,621	0,621	0,620	0,619	0,619
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial h} \cdot \frac{\Delta_{опт}}{\sqrt{3}}$	0,001	0,005	0,020	0,044	0,079	0,123
$c_{\Delta hb} \Delta_{hb}$	0,128	0,256	0,511	0,767	1,022	1,278
$\left \frac{\partial \varepsilon}{\partial h} \right \cdot \Delta_{th}$	0,006	0,013	0,025	0,038	0,051	0,063
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial L} \frac{\Delta_m}{\sqrt{3}}$	0,038	0,076	0,151	0,227	0,304	0,380
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial F} \cdot \sqrt{3} \cdot s_H$	2,323	2,322	2,319	2,316	2,314	2,311
Δ_c	2,7	2,8	2,8	2,9	3,0	3,1
S_{Δ}	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6
S_R	0,5	0,7	1,2	1,7	2,3	2,9
S_{Σ}	1,5	1,6	1,9	2,3	2,8	3,3
Δ	3,0	3,1	3,7	4,5	5,5	6,5

Таблица Б.24 - Результаты расчета неопределённости измерений деформации для балки из сплава В95 толщиной 6 мм

Толщина балки	Длина базы прогибомера	Прогиб балки	Деформация
5,944 мм	79,47 мм	0,26701 мм	1006,25 млн ⁻¹

Таблица Б.25 - Результаты расчета неопределённости измерений деформации для балки из сплава ВТ 95 толщиной 6 мм

Источник неопределенности	Значение характеристики		Оценка неопределённости по типу А/В	Коэффициент влияния		Число степеней свободы	$ C_i \cdot u_i$ ($ c_j \cdot \Delta_j$)
	u_i	ед.изм.		$C_i (c_j)$	ед.изм.		
Стандартная неопределённость результатов измерений в условиях повторяемости	0,60	млн ⁻¹	А	1	-	9	0,60
Стандартная неопределённость результатов измерений, прогиба балки с помощью прибора «Микрон-04»	0,070	мкм	В	3,727	$\frac{1}{\text{м}}$	-	0,26
Стандартная неопределённость результатов измерений, прогиба балки с помощью КМД	0,0520	мкм	В				0,19
Стандартная неопределённость результатов измерений, прогиба балки с помощью пластины стеклянной	0,0578	мкм	В				0,22
Стандартная неопределённость результатов измерений, геометрических параметров балки	0,173	мкм	В	0,046	$\frac{1}{\text{м}}$	-	0,008
Стандартная неопределённость результатов измерений, длины базы прогибомера	1,734	мкм	В	-0,025	$\frac{1}{\text{м}}$	-	0,044
Стандартная неопределённость измерений прогиба, обусловленная неоднородностью деформационного поля	0,24	мкм	А	3,727	$\frac{1}{\text{м}}$	-	0,90
Непараллельность рабочих граней балки	1,73	мм	А	В	$\frac{\text{млн}^{-1}}{\text{мм}}$	-	0,58
Непараллельность боковых граней балки	1,73	мм	А	В	$\frac{\text{млн}^{-1}}{\text{мм}}$	-	0,12
Изменение температуры во время измерений	0,14	°С	А	В	$\frac{\text{млн}^{-1}}{\text{°С}}$	-	0,003
Суммарная стандартной неопределённости, млн ⁻¹							1,29
Расширенная неопределённость (при коэффициенте охвата, соответствующем уровню доверия 0,95), млн ⁻¹							2,59
Контрольное значение расширенной неопределённости результатов измерений, U_k , млн ⁻¹							3,7

Таблица Б.26 - Результаты расчета неопределённости измерений деформации для балки из поликарбоната номинальной толщиной 9 мм

Толщина балки, мм	Длина базы прогибомера, мм	Прогиб балки, мм	Деформация, млн ⁻¹
8,957	79,44	0,7838	4969

Таблица Б.27 - Результаты расчета неопределённости измерений деформации для балки из поликарбоната номинальной толщиной 9 мм

Источник неопределенности	Значение характеристики		Оценка неопределённости по типу А/В	Коэффициент влияния		Число степеней свободы	$ C_i \cdot u_i$ ($ c_j \cdot \Delta_j$)
	Стандартная неопределённость	ед.изм.		$C_i (c_j)$	ед.изм.		
Стандартная неопределённость результатов измерений в условиях повторяемости	2,98	млн ⁻¹	А	1	-	9	2,98
Стандартная неопределённость результатов измерений, прогиба балки с помощью прибора «Микрон-04»	0,070	мкм	В	5,566	$\frac{1}{\text{м}}$	-	0,39
Стандартная неопределённость результатов измерений, прогиба балки с помощью КМД	0,0520	мкм	В			-	0,29
Стандартная неопределённость результатов измерений, прогиба балки с помощью пластины стеклянной	0,058	мкм	В			-	0,32
Стандартная неопределённость результатов измерений, геометрических параметров балки	0,173	мкм	В			0,510	$\frac{1}{\text{м}}$
Стандартная неопределённость результатов измерений, длины базы прогибомера	1,734	мкм	В	-0,127	$\frac{1}{\text{м}}$	-	0,22
Стандартная неопределённость измерений прогиба, обусловленная неоднородностью деформационного поля	0,24	мкм	А	5,566	$\frac{1}{\text{м}}$	-	1,34
Непараллельность рабочих граней балки	1,73	мм	В	0,335	$\frac{\text{млн}^{-1}}{\text{мм}}$	-	0,32
Непараллельность боковых граней балки	1,73	мм	В	0,069	$\frac{\text{млн}^{-1}}{\text{мм}}$	-	0,09
Изменение температуры во время измерений	0,14	°С	В	0,02	$\frac{\text{млн}^{-1}}{\text{°С}}$	-	0,16
Суммарная стандартной неопределённости, млн ⁻¹							3,3
Расширенная неопределённость (при коэффициенте охвата, соответствующем уровню доверия 0,95), млн ⁻¹							6,6
Контрольное значение расширенной неопределённости результатов измерений, U_k , млн ⁻¹							7,2

Таблица Б.28 - Результаты расчета неопределённости измерений деформации для балки из стали номинальной толщиной 4 мм

Толщина балки, мм	Длина базы прогибомера, мм	Прогиб балки, мм	Деформация, млн ⁻¹
4,015	79,40	0,1780	453,7

Таблица Б.29 - Результаты расчета неопределённости измерений деформации для балки из стали номинальной толщиной 4 мм

Источник неопределенности	Значение характеристики		Оценка неопределённости по типу А/В	Коэффициент влияния		Число степеней свободы	$ C_i \cdot u_i$ $(c_j \cdot \Delta_j)$
	Стандартная неопределённость	ед. изм.		$C_i (c_j)$	ед. изм.		
Стандартная неопределённость результатов измерений в условиях повторяемости	0,3	мкм	А	1	-	9	0,3
Стандартная неопределённость результатов измерений, прогиба балки с помощью прибора «Микрон–04»	0,070	мкм	В	5,566	$\frac{1}{\text{м}}$	-	0,26
Стандартная неопределённость результатов измерений, прогиба балки с помощью КМД	0,0520	мкм	В			-	0,19
Стандартная неопределённость результатов измерений, прогиба балки с помощью пластины стеклянной	0,0578	мкм	В			-	0,22
Стандартная неопределённость результатов измерений, геометрических параметров балки	0,173	мкм	В	0,510	$\frac{1}{\text{м}}$	-	0,002
Стандартная неопределённость результатов измерений, длины базы прогибомера	1,734	мкм	В	-0,127	$\frac{1}{\text{м}}$	-	0,02
Стандартная неопределённость измерений прогиба, обусловленная неоднородностью деформационного поля	0,24	мкм	А	5,566	$\frac{1}{\text{м}}$	-	0,60
Непараллельность рабочих граней балки	1,73	мм	В	0,335	$\frac{\text{млн}^{-1}}{\text{мм}}$	-	0,26
Непараллельность боковых граней балки	1,73	мм	В	0,069	$\frac{\text{млн}^{-1}}{\text{мм}}$	-	0,05
Изменение температуры во время измерений	0,14	°С	В	0,02	$\frac{\text{млн}^{-1}}{\text{°С}}$	-	0,0004
Суммарная стандартной неопределённость							0,82
Расширенная неопределённость (при коэффициенте охвата, соответствующем уровню доверия 0,95)							1,6
Контрольное значение расширенной неопределённости результатов измерений, U_k							3,6

Таблица Б.30 – Структура стандартной неопределённости результатов измерений, обусловленная влиянием методических параметров, в диапазоне измерений от -5000 до 5000 млн⁻¹

Источник неопределенности	Значение характеристики		Оценка неопределённости по типу А/В	Коэффициент влияния		Число степеней свободы
	Стандартная неопределённость	ед.изм.		$C_i (c_i)$	ед.изм.	
Стандартная неопределённость результатов измерений, прогиба балки, u_{Bf}	0,18	мкм	В	$\frac{4hF(-4h-8F)}{(L^2+4F^2\pm 4Fh)^2} + \frac{4h}{(L^2+4F^2\pm 4Fh)}$	$\frac{1}{\text{м}}$	-
Стандартная неопределённость результатов измерений, геометрических параметров балки, u_{Bh}	0,3	мкм	В	$-\frac{16hF^2}{(L^2+4F^2\pm 4Fh)^2} + \frac{4F}{(L^2+4F^2\pm 4Fh)}$	$\frac{1}{\text{м}}$	-
Стандартная неопределённость результатов измерений, длины базы прогибомера, u_{BL}	3	мкм	В	$-\frac{8hFL}{(L^2+4F^2\pm 4Fh)^2}$	$\frac{1}{\text{м}}$	-
Стандартная неопределённость измерений прогиба, обусловленная неоднородностью деформационного поля, u_{Hf}	0,24	мкм	А	$\frac{4hF(-4h-8F)}{(L^2+4F^2\pm 4Fh)^2} + \frac{4h}{(L^2+4F^2\pm 4Fh)}$	$\frac{1}{\text{м}}$	9
Непараллельность рабочих граней балки, Δh	1,73	мм	В	$\frac{1 \cdot \varepsilon}{h}$	$\frac{\text{млн}^{-1}}{\text{мм}}$	9
Непараллельность боковых граней балки, Δb	1,73	мм	В	$\frac{2 \cdot \varepsilon}{b}$	$\frac{\text{млн}^{-1}}{\text{мм}}$	9
Изменение температуры во время измерений, Δt	0,14	°С	В	$-\frac{16\alpha h^2 F^2}{(L^2+4F^2\pm 4Fh)^2} + \frac{4F\alpha h}{(L^2+4F^2\pm 4Fh)}$	$\frac{\text{млн}^{-1}}{\text{°С}}$	9
<p>Примечания:</p> <p>1) h - толщина балки, м; F – прогиб балки, м; L - длина базы прогибомера, м; ε – результат измерений деформации, млн⁻¹; b - ширина балки, м, α - температурный коэффициент линейного расширения материала балки, °С⁻¹.</p> <p>2) Оценка вкладов в суммарную неопределённость может быть рассчитана по формулам: $u_{\varepsilon i} = C_i \cdot u_i$ и $u_{\varepsilon j} = c_j \cdot \Delta_j$.</p> <p>3) Оценка суммарной стандартной неопределённости может быть рассчитана по формуле $\tilde{u}_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i^2 u_i^2 + \sum_{j=1}^m c_j^2 \Delta_j^2}$ и удовлетворяют условию $\tilde{u}_\Sigma \leq u_\Sigma$.</p> <p>4) Знак «+» - при установке прогибомера на балку для случая растяжения верхних волокон, знак «-» - для случая сжатия.</p>						

Таблица Б.31 – Исследования геометрических размеров балки

Толщина балки, h									Ширина балки, b							
По оси А-А				По оси В-В				Общее среднее, мм	\bar{h} , мм	СКО(h), отн.ед	R_h , мм	R_{h_1} , мм	\bar{b} , мм	b , мм	СКО(b)	R_b , мм
1	2	3	\bar{h} (А), мм	1	2	3	\bar{h} (В), мм									
5,954	5,954	5,954	5,954	5,963	5,963	5,963	5,963	5,958	/	/	/	29,969	29,972	0,000025	0,006	
5,953	5,953	5,953	5,953	5,953	5,953	5,953	5,953	5,953	/	/	/	29,969				
5,952	5,951	5,951	5,951	5,959	5,959	5,959	5,959	5,955	/	/	/	29,969				
5,953	5,953	5,953	5,953	5,958	5,958	5,958	5,958	5,956	/	/	/	29,970				
5,940	5,940	5,940	5,940	5,976	5,976	5,976	5,976	5,958	5,959	0,002	0,006	29,970				
5,953	5,953	5,953	5,953	5,958	5,958	5,958	5,958	5,955				29,970				
5,953	5,953	5,952	5,953	5,955	5,951	5,951	5,952	5,953				29,970				
5,955	5,955	5,954	5,955	5,954	5,954	5,954	5,954	5,954				29,974				
5,959	5,959	5,958	5,959	5,953	5,953	5,953	5,953	5,956				29,975				
5,954	5,954	5,954	5,954	5,953	5,953	5,953	5,953	5,954				29,973				
5,953	5,953	5,953	5,953	5,955	5,953	5,952	5,953	5,953				29,975				
5,951	5,949	5,949	5,950	5,967	5,967	5,967	5,967	5,958				29,973				
5,955	5,955	5,955	5,955	5,961	5,961	5,961	5,961	5,958				29,975				
5,959	5,959	5,959	5,959	5,958	5,959	5,950	5,956	5,957				29,975				
5,956	5,956	5,956	5,956	5,951	5,951	5,951	5,951	5,954				29,975				
5,953	5,952	5,952	5,952	5,965	5,965	5,965	5,965	5,959				29,975				
5,956	5,955	5,956	5,955	5,968	5,958	5,958	5,961	5,958				29,975				
5,954	5,955	5,954	5,954	5,959	5,959	5,959	5,959	5,957				29,972				
5,959	5,959	5,956	5,958	5,959	5,959	5,959	5,959	5,958	29,970							
5,950	5,960	5,960	5,957	5,953	5,953	5,953	5,953	5,955	29,969							

Таблица Б.32 – Результаты сравнения метрологических характеристик УВТ 32А-85 и установки воспроизведения единицы деформации

Диапазон измерений деформации (без учета знака), млн ⁻¹	Среднее квадратическое отклонение результата измерений на установке воспроизведения единицы деформации, $\sigma_{РЛ}$, млн ⁻¹	Среднее квадратическое отклонение результата измерений УВТ 32А-85	Границы абсолютной неисключенной систематической погрешности при доверительной вероятности Р=0,95 для установки воспроизведения единицы деформации, $\pm\Delta_c$, млн ⁻¹	Неисключенная систематическая погрешность УВТ 32А-85
от 10 до 500 вкл.	0,5	$7 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon$	$3 + 10^{-5} \cdot \varepsilon$	$9 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon$
св. 500 до 1000 вкл.	$0,2 + 6 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon$		$3 + 10^{-5} \cdot \varepsilon$	
св. 1000 до 3000 вкл.	$0,2 + 6 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon$	—	$3 + 10^{-5} \cdot \varepsilon$	—
ε – деформация, млн ⁻¹				

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Создание системы передачи единицы деформации средствам измерений и рабочим эталонам

Таблица В.1 – Пределы допускаемых доверительных границ погрешности эталонов

В МИЛЛИОННЫХ ДОЛЯХ

Разряд	Диапазон измерений (без учета знака)	i	S_i	$S_{(i-1)}$	$S_{M(i-1)}$	$S_{\Sigma(i-1)}$	$S_{\Gamma i}$	ν_i	$S_{\Sigma i}$	$t_{\Sigma i}$ или $t_{\Gamma i}$	$\delta_{\Sigma i}$	Принято $\delta_{\Sigma i}$
ИЭ	от 10 до 500 вкл.		0,5			1,56			1,63	1,96	3,2	3,6
ИЭ	св. 500 до 1000 вкл.		0,8			1,58			1,77	1,96	3,5	3,8
ИЭ	св. 1000 до 3000 вкл.		2,0			1,68			2,61	1,96	5,1	5,6
ИЭ	св. 3000 до 5000 вкл.		3,2			1,79			3,66	1,96	7,2	7,4
1 р.	от 10 до 500 вкл.	1	0,5	0,50	0,25	1,63			1,65	2,16	3,6	4+0,0015ε
1 р.	св. 500 до 1000 вкл.	1	1,0	0,80	0,50	1,77			1,83	2,09	3,8	
1 р.	св. 1000 до 3000 вкл.	1	3,0	2,00	1,50	2,61			2,98	2,06	6,1	
1 р.	св. 3000 до 5000 вкл.	1	5,0	3,20	2,50	3,66			4,37	1,99	8,7	
2 р.	от 10 до 500 вкл.	2	1,0	0,50	0,25	1,63	1,70	6,4	2,73	2,14	5,8	7
2 р.	св. 500 до 1000 вкл.	2	2,0	0,80	0,50	1,77	1,99	6,9	3,05	2,09	6,4	
2 р.	св. 1000 до 3000 вкл.	2	6,0	2,00	1,50	2,61	3,78	10,2	5,09	2,07	10,5	0,05ε
2 р.	св. 3000 до 5000 вкл.	2	10,0	3,20	2,50	3,66	5,84	14,4	7,55	2,00	15,1	
3 р.	от 10 до 500 вкл.	3	2,5	0,5	0,5	1,65	2,00	7,1	3,1	2,54	7,9	10
3 р.	св. 500 до 1000 вкл.	3	5,0	1,0	1	1,83	2,91	7,7	3,9	2,48	9,6	0,01ε
3 р.	св. 1000 до 3000 вкл.	3	15,0	3,0	3	2,98	7,40	12,3	8,5	2,38	20,1	
3 р.	св. 3000 до 5000 вкл.	3	25,0	5,0	5	4,37	12,11	17,4	13,4	2,31	31,0	

Таблица В.2 – Пределы допускаемых доверительных границ погрешности средств измерений

В МИЛЛИОННЫХ ДОЛЯХ

Наименование СИ	Диапазон измерений (без учета знака)	$S_{M(i-1)}$	$S_{\Sigma(i-1)}$	S_i	S_{Σ}	t	δ_{Σ}	Принято δ_{Σ}	α_p	$\alpha_{\sigma p}$	α_p	$(P_{gr})_{m\bar{g}}$ ($\beta = 1$)	P_{bam} ($\beta = 0,8$)
Экстензометры полного поля, измерители деформации	от 10 до 500 вкл.	0	4,1	2,0	4,1	1,96	8,1	8+0,002ε	0,40	0,25	0,40	0,105	0,083
	св. 500 до 1000 вкл.	0	4,4	3,2	4,5	1,96	8,9		0,40	0,25	0,38	0,105	0,074
	св. 1000 до 3000 вкл.	0	6,5	8,0	7,0	1,96	13,7		0,40	0,25	0,40	0,105	0,083
	св. 3000 до 5000 вкл.	0	8,1	12,8	9,1	1,96	17,8		0,45	0,25	0,41	0,147	0,083
Тензорезисторы, измерители деформации	от 10 до 500 вкл.	0,5	4,7	1,7	4,8	1,96	9,3	10	0,35	0,30	0,38	0,078	0,074
	св. 500 до 1000 вкл.	1	4,6	2,9	4,7	1,96	9,2		0,40	0,35	0,45	0,078	0,107
	св. 1000 до 3000 вкл.	3	6,6	10,0	7,4	1,96	14,5	0,005ε	0,45	0,30	0,50	0,162	0,130
	св. 3000 до 5000 вкл.	5	10,9	16,7	12,2	1,96	24,0		0,40	0,30	0,42	0,121	0,083
Тензорезисторы, измерители деформации	от 10 до 500 вкл.	0,25	6,1	2,9	6,1	1,96	12,0	20	0,45	0,35	0,47	0,162	0,060
	св. 500 до 1000 вкл.	0,5	6,8	4,4	6,9	1,96	13,6		0,45	0,45	0,47	0,167	0,060
	св. 1000 до 3000 вкл.	1,5	12,7	17,1	13,8	1,96	27,1	0,015ε	0,40	0,35	0,50	0,062	0,050
	св. 3000 до 5000 вкл.	2,5	21,6	40,0	25,0	1,96	49,0		0,35	0,25	0,50	0,062	0,050
Тензорезисторы, измерители деформации	от 10 до 500 вкл.	0,5	8,9	8,3	9,3	1,96	18,2	30	0,35	0,30	0,40	0,078	0,050
	св. 500 до 1000 вкл.	1	11,1	16,7	12,3	1,96	24,0		0,35	0,30	0,40	0,078	0,050
	св. 1000 до 3000 вкл.	3	24,2	50,0	28,9	1,96	56,6	0,02ε	0,35	0,30	0,50	0,078	0,130
	св. 3000 до 5000 вкл.	5	38,3	83,3	46,6	1,96	91,2		0,35	0,30	0,50	0,078	0,130

α_{sp} – отношение предела допускаемого значения систематической составляющей погрешности поверки к пределу допускаемого значения систематической составляющей погрешности средства измерений (принято от 0,35 до 0,5);

$\alpha_{\sigma p}$ – отношение предела допускаемого значения случайной составляющей погрешности поверки к пределу допускаемого значения случайной составляющей погрешности средства измерений (принято от 0,25 до 0,3);

$(P_{gr})_{m\bar{g}}$ – наибольшая средняя для совокупности пригодных к применению экземпляров СИ вероятность ошибочного признания непригодными к применению в действительности годных экземпляров СИ. Данный критерий является показателем достоверности методики поверки определены по соотношению α_{sp} и $\alpha_{\sigma p}$;

P_{bam} – наибольшая вероятность ошибочного признания пригодным любого в действительности непригодного к дальнейшему применению экземпляра СИ.