

ЭТАЛОНЫ

Обзорная статья
УДК 535.241:69.058.2:621.9.011
<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-1-7-15>



Применение установок с балками равного сопротивления изгибу в качестве рабочих эталонов деформации

Л. А. Трибушевская, В. В. Митрофанов, Л. Е. Осипов 

УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», г. Екатеринбург, Россия
✉ form233@uniim.ru

Аннотация: Рассмотрены способ получения однородной деформации по длине рабочего участка балки равного сопротивления изгибу и возможность ее применения в составе рабочего эталона деформации. Изложены результаты анализа модели изгиба и конструкции балки равного сопротивления. В фокусе внимания – параметры, входящие в уравнение измерений и связанные с методическими факторами, а также оказывающие влияние на результат измерений относительной деформации. Предметами исследования являются 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). Установлены преимущества и недостатки применения балки равного сопротивления изгибу для определения характеристик первичных преобразователей деформации при испытаниях, калибровке и поверке. Экспериментально выявлено отклонение сигналов первичных преобразователей, расположенных вне осевого сечения, при ориентации вдоль оси балки и вдоль силовых линий, сходящихся в точке приложения нагрузки. Погрешность, обусловленная ориентацией первичных преобразователей на балке в зависимости от угла между боковыми гранями, может составлять от 0,15 до 0,23 %. Исследование пополнит теоретическую базу знаний о возможности использования консольной балки равного сопротивления как несущего элемента в градуировочных установках. Выводы могут быть полезны для проведения испытаний, калибровки и поверки первичных преобразователей деформации.

Ключевые слова: балка равного сопротивления изгибу, измерение деформации, метрология

Ссылка при цитировании: Трибушевская Л. А., Митрофанов В. В., Осипов Л. Е. Применение установок с балками равного сопротивления изгибу в качестве рабочих эталонов деформации // Эталоны. Стандартные образцы. 2024. Т. 20, № 1. С. 7–15. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-1-7-15>.

Статья поступила в редакцию 28.12.2023; одобрена после рецензирования 10.02.2024; принята к публикации 25.03.2024.

MEASUREMENT STANDARDS

Review article

Application of Installations with Uniform-Strength Beams as Working Deformation Standards

Lydia A. Tribushevskaja, Vladimir V. Mitrofanov, Leonid E. Osipov 

UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology, Yekaterinburg, Russia

✉ form233@uniim.ru

Abstract: A method for obtaining homogeneous deformation along the length of the measuring section of a uniform-strength beam and the possibility of its application as part of a working deformation standard are considered. The results of the analysis of the bending model and the design of a uniform-strength beam are presented. In the focus of attention are the parameters included in the measurement equation and related to methodological factors, as well as influencing the result of relative deformation measurements. The subjects of research are the presence of contact friction forces, heterogeneity of material properties, the special nature of the load application (bending, torsion, the presence of residual stresses in the body, geometrical parameters of the calibration beam, orientation of primary transducers on the beam, application of bending load, measurement of deflection and displacement of the neutral layer). The advantages and disadvantages of using a uniform-strength beam for determining the characteristics of primary strain transducers during testing, calibration, and verification were established. The deviation of signals of primary transducers located outside the axial cross-section when oriented along the beam axis and along the force lines converging at the point of load application was experimentally revealed. The error due to the orientation of the primary transducers on the beam depending on the angle between the lateral faces can range from 0.15 to 0.23 %. The study adds to the theoretical knowledge base on the possibility of using a cantilever uniform-strength beam as a load-bearing element in calibration installations. The conclusions may be useful for testing, calibrating, and verifying primary strain transducers.

Keywords: uniform-strength beam, strain gauges, metrology

For citation: Tribushevskaja L. A., Mitrofanov V. V., Osipov L. E. Application of installations with uniform-strength beams as working deformation standards. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2024;20(1):7–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-1-7-15>.

The article was submitted 28.12.2023; approved after reviewing 10.02.2024; accepted for publication 25.03.2024.

Введение

Контроль параметров работы и состояния деталей и узлов машин, инфраструктурных объектов и сооружений, например – мостов, тоннелей, трубопроводов, а также гражданских и промышленных зданий важен для обеспечения безопасности и надежности производственной и социальной инфраструктуры. Один из основных параметров, подлежащих определению, – механическое напряжение, значения которого принято определять путем измерения механических деформаций [1]. Гетерогенность объектов измерений обуславливает совершенно различные требования к средствам измерений деформации и, соответственно, методам измерений в зависимости от особенностей конструкций, условий их эксплуатации, размеров и материалов, из которых они изготовлены, и других характеристик.

Создание средств измерений не решает в целом проблему обеспечения достоверности результатов измерений деформаций/напряжений, следовательно, не гарантирует надежность и качество производимых изделий и объектов. Исследование метрологических характеристик средств и методик измерений невозможно без эталонов и методов, позволяющих воспроизводить единицу величины в условиях ее дальнейшего измерения. Например, средства измерений деформации полного поля (тензорезисторы, оптоволоконные датчики, измерители и т. д.), особенностью градуировки которых является использование стандартного образца материала в виде артефакта или средства сравнения, обладающего установленным механическими свойствами [2]. Известные классические кинематические схемы градуировочных установок выполнены по принципу чистого

изгиба балки постоянного сечения или равного сопротивления. Установки с балками постоянного сечения имеют широкое распространение как в качестве испытательных, так и эталонных [3, 4, 5, 6]. Дополнительно требования к ним можно найти в стандартах ASTM E251 92(2009), AIA/NAS942 1964, BS6888:1988.

Что касается балок равного сопротивления (БРС), то в данной области исследований на данный момент очевидно недостаточно информации и глубины проработки. Несмотря на кажущийся элементарный конструктив БРС, существуют (а) сложность создания математических моделей на основании методов компьютерного моделирования и (б) невозможность с высокой точностью определить расчетным методом воспроизводимую деформацию. В работах [6, 7] авторами предложена аналитическая модель измерений, построенная на основании сочетания конечно-элементного анализа и имитационного эксперимента. Исследуемые модели полностью учитывают влияние угла прогиба на результаты расчета деформации и доказывают нелинейную зависимость между прогибом и деформацией. Результаты анализа неопределенности указывают на значимую составляющую, обусловленную несоответствием теоретической модели практическим результатам, и может достигать 6% при прогибе 5000 мкм, что является аргументом в пользу градуировки БРС посредством эталонов.

В данной работе подняты вопросы, касающиеся способа получения однородной деформации по длине рабочего участка балки равного сопротивления изгибу и возможности применения в качестве рабочих эталонов деформации. Соответственно, сформулированы цели исследования:

- провести анализ модели изгиба и конструкции балки равного сопротивления;
- определить основные причины неравномерности деформационного поля балки переменного сечения при определении характеристик первичных преобразователей деформации при испытаниях, калибровке и поверке;
- экспериментально исследовать и доказательно обосновать влияние угла между боковыми гранями БРС при ориентации первичных преобразователей вдоль оси балки и вдоль силовых линий.

Материалы и методы исследования

Предметом исследования 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 (рис. 1).

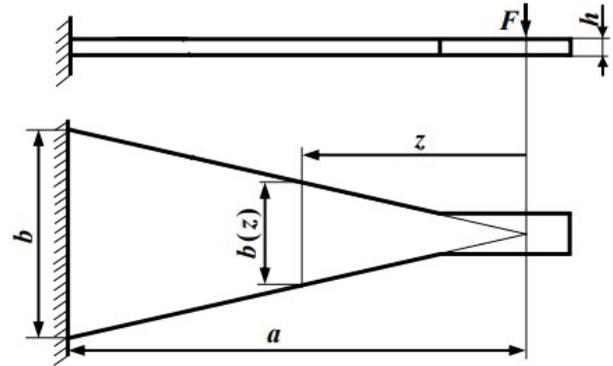


Рис. 1. Принципиальная схема БРС:

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

Fig. 1. Schematic diagram of the coupling system:

z – the distance from the point of load application to the desired section, mm; a – the distance from the rigid fixing to the point of load application, mm; b – the width of the wide edge of the beam, mm; h – beam thickness, mm; F – force, N

Балки равного сопротивления изгибу благодаря простоте кинематической схемы, отсутствию сложных опор трения-качения и 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.

Конструкции рассматриваемых в данной статье БРС соответствуют применяемым на практике (жесткая заделка широкого края балки, нагружение посредством микровинта или грузами известной массы, толщина балок от 2 до 6 мм, угол между боковыми гранями от 15° до 25°).

В основу уравнения измерений положена теория изгиба балки Эйлера-Бернулли [8, 9]. Согласно данной теории, принимаются допущения:

- деформация сдвига слоев относительно друг друга не учитывается (сечения балки, плоские и нормальные к оси до деформации, остаются после деформации плоскими и нормальными к изогнутой оси балки);
- балка предполагается нерастяжимой (перемещение и деформации предполагаются малыми);

– размеры сечения балки предполагаются малыми по сравнению с радиусом кривизны балки;

– материал рассматривается как линейно упругий согласно закону Гука.

Из этого следует, что деформация ε_z распределена по высоте сечения по линейному закону. В соответствии с законом Гука, механическое напряжение σ также распределено по линейному закону, где коэффициент пропорциональности E – модуль Юнга (модуль упругости). В сечении балки возникает изгибающий момент M . На сечение действует распределенная нагрузка F .

В общем виде для случая изгиба используются выражения:

– деформации:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (1)$$

– закона Гука:

$$\sigma = \frac{M}{W}, \quad (2)$$

– изгибающего момента силы:

$$M = F \cdot z, \quad (3)$$

– момента сопротивления:

$$W = \frac{b(z) \cdot h^2}{6}. \quad (4)$$

После подстановки в выражение (1) получим зависимость деформации от нагрузки:

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot a \cdot F}{b \cdot h^2 \cdot E}, \quad (5)$$

где ε – деформация балки, млн^{-1} ; σ – нормальное механическое напряжение, Н/м^2 ; M – изгибающий момент силы, $\text{Н} \cdot \text{м}$; W – момент сопротивления, м^3 ; F – нагрузка, Н ; 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 ; E – модуль упругости I рода, Н/мм^2 .

На практике для определения расчетного значения деформации используется значение прогиба балки. Так по результатам анализа тонких балок с переменным поперечным сечением при больших нелинейных упругих деформациях выведена функция зависимости деформации от прогиба балки [10, 11, 12]:

$$\varepsilon = \frac{h}{a^2} \omega, \quad (6)$$

где ε – деформация балки, млн^{-1} ; ω – прогиб балки в точке приложения нагрузки, мм .

Анализу и экспериментальным исследованиям подлежали как параметры, которые входят в уравнение измерения, так и параметры, связанные с методическими факторами и оказывающие влияние на результат измерений относительной деформации.

Результаты исследования

Так как первичные преобразователи являются изделиями разовой установки (рис. 2), они характеризуются выборочным средним значением характеристики (например, чувствительности) и средним квадратическим отклонением, которые определяются по выборке из партии. Это формирует требование к соответствию площади градуировочной балки суммарной площади выборки первичных преобразователей с учетом необходимой дополнительной площади для их монтажа с целью минимизации влияния факторов окружающей среды и установки в условиях воспроизводимости. По площади контакта первичного преобразователя с градуировочной балкой происходит усреднение измеряемой деформации. Поэтому при разработке эталонной установки необходимо на этапе конструирования определиться с требуемыми размерами рабочей зоны и обеспечением равномерности деформационного поля в пределах этой зоны.

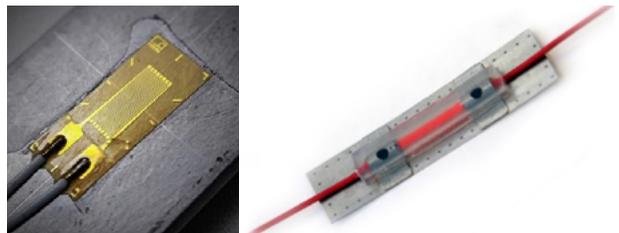


Рис. 2. Общий вид первичных преобразователей деформации

Fig. 2. General view of primary strain transducers

Основные причины неравномерности деформационного поля балки

Неравномерность деформационного поля – важная характеристика эталонной установки. Рассмотрим детально основные причины неравномерности деформационного поля балки.

Неоднородность свойств материала и наличие остаточных напряжений в теле. Неравномерность деформационного поля обусловлена процессом изготовления исходного проката, используемого для градуировочной балки. При упругопластическом деформировании поликристаллических материалов вследствие структурной неоднородности, обусловленной различной

ориентацией отдельных зерен и технологической обработкой, возникает неоднородность деформации поликристалла. Остаточные напряжения в упругих телах появляются по разным причинам, среди которых – механическая обработка или пластическая деформация в одной какой-либо части тела, холодная обработка материала прокаткой или протяжкой, нагрев при неравномерном охлаждении, закаливании [13]. Практически независимо от вида нагружения, для одного и того же материала характер неоднородности при статическом и длительном статическом нагружении сохраняется. Внутриверенная неоднородность порождает неравномерность макродеформации на отдельных малых участках деформируемого образца [14].

Наличие сил контактного трения. Данная причина на неравномерности деформационного поля связана с процессом механической обработки при изготовлении градуировочной балки. Широко распространен способ изготовления деталей путем обработки металлов давлением. Любой процесс листовой и объемной штамповки сопровождается неравномерностью деформации. Пластическая деформация влияет на циклическую прочность как на микроуровне, изменяя плотность и структуру дефектов кристаллической решетки, так и на макроуровне, когда в силу неравномерности деформации в объеме штампуемой заготовки возникают и остаются остаточные микродеформации решетки. Кроме того, контакт инструмента с заготовкой изменяет характер поверхностных микронеровностей и состояние приповерхностных слоев материала балки [15].

Особый характер приложения нагрузки (изгиб, кручение). Высокие требования к нагружающему стенду, его кинематике и геометрии обусловлены высокими требованиями к неравномерности деформационного поля. Отклонение от теоретической модели является причиной возникновения сложного вида деформации вместо ожидаемого изгиба и, как следствие, – несоответствия теоретического уравнения деформации практическому результату [6, 7].

Геометрические параметры градуировочной балки. Непараллельность и неплоскостность граней градуировочной балки являются источниками расхождений в значениях моментов инерции в сечениях балки по длине балки и, как следствие, неравномерного деформационного поля. Данный влияющий фактор обусловлен тем, что геометрические параметры входят в уравнение измерения.

Ориентация первичных преобразователей на балке. Заданное значение деформации воспроизводится вдоль продольной оси балки. Имеет место также и поперечная

деформация, обусловленная эффектом Пуассона и другими факторами. В связи с этим ориентация первичных преобразователей на балке является одним из ответственных моментов при монтаже, а допускаемые отклонения от заданного направления нормируются в технической документации. Для оценки влияния отклонения оси преобразователя от установленного направления и определения условий ориентации на балке применялась концепция силовых линий. Силовые линии (СЛ) – траектории передачи нагрузки от точки к точке в объеме детали, их совокупность есть силовой поток. Силовые линии напряжений непрерывны и не обрываются в какой-либо точке. Факт их разрыва означал бы начало разрушения материала [16]. Число силовых линий одинаково в любом сечении детали. Плотность силового потока и число силовых линий на единицу площади поперечного сечения определяет напряжение. Применение концепции силовых линий в описании формальных полей напряжений и деформаций поверхности БРС позволило предположить некорректность общепринятой схемы монтажа преобразователей, а именно – параллельно оси балки – и подтвердить данное предположение путем эксперимента (рис. 3). Рассмотрим вариант расположения силовых линий главных напряжений по всему рабочему полю балки. На краях изгибаемой пластины трапецевидной формы векторы напряжений типа «растяжение – сжатие» могут быть направлены только параллельно краям.

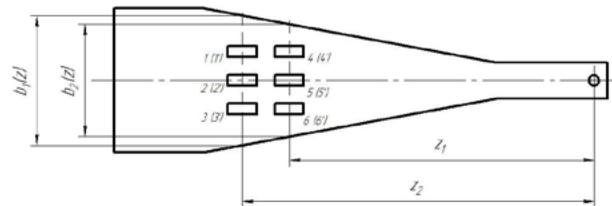


Рис. 3. Схема монтажа первичных преобразователей деформации по инструкции предприятия:

z_1, z_2 – расстояние от точки приложения нагрузки до искомого сечения, мм;

$b_1(z), b_2(z)$ – ширина относительно широкого края балки от точки приложения нагрузки

до искомого сечения, мм; $1(1') \dots n(n')$ – номер преобразователя деформации при растяжении (сжатии')

Fig. 3. Installation scheme of primary strain transducers according to the company's instructions:

z_1, z_2 – the distance from the point of the load application to the desired section, mm;

$b_1(z), b_2(z)$ – the width of the relatively wide edge of the beam from the point of the load application to the desired section, mm; $1(1') \dots n(n')$ – number of tensile (compression') strain transducer

То есть силовые линии в рабочей зоне должны быть прямолинейны, эквидистантны и сходиться в точке приложения изгибающей силы. Из этого следует, что в любом поперечном сечении балки векторы нормальных напряжений и деформаций (растяжение – сжатие) не перпендикулярны плоскости этих сечений и, следовательно, в них возникают тангенциальные напряжения, что приводит к ужесточению требований к точности ориентации осей чувствительности преобразователей деформации.

График зависимости отклонения выходных сигналов первичных преобразователей от деформации представлен на рис. 4.

График показывает, что разность выходных сигналов преобразователей достигает 120 мкОм/Ом при значениях деформации 1 000 млн⁻¹. Разница значений сигналов преобразователей правой и левой частей балки обусловлена разностью координат положения по оси балки. К тому же использовались преобразователи с базой 5 и 7 мм, соответственно отмечена различная степень усреднения измеряемой деформации. Таким образом, погрешность, обусловленная ориентацией первичных преобразователей на балке в зависимости от угла между боковыми гранями, может составлять от 0,15 до 0,23 %, а среднее квадратическое отклонение не превышает 0,7 %.

Результаты экспериментальных исследований показали отклонение сигналов первичных преобразователей, расположенных вне осевого сечения при ориентации вдоль оси балки и вдоль силовых линий, сходящихся

в точке приложения нагрузки. Следовательно, предусмотренное в локальной поверочной схеме минимальное значение предела допускаемых доверительных границ погрешности градуировки рабочего эталона в соответствии с МИ 223092 составляет 1,5 %.

Также необходимо отметить, что механизм силового воздействия, или передачи нагрузки БРС, является дополнительным источником погрешности в части определения корректной разметки БРС.

Приложение изгибающей нагрузки. Для изгиба БРС применяются микровинт (перемещение подвижного штока воспроизводит необходимый прогиб балки), кулачковый механизм и прямое нагружение грузами на подвесе. Следует отметить, что последний способ нагружения БРС находит самое широкое применение: он удобен при размещении БРС в климатических камерах, не требует в своем составе сложных механизмов, обеспечивающих воспроизведение прогиба с высокой точностью, а прикладываемая нагрузка остается независимой от температуры окружающего воздуха. При проектировании БРС необходимо выбрать оптимальное соотношение «масса груза – толщина балки – воспроизводимая деформация». Для малогабаритных балок, нагружаемых вручную, небольшие значения толщины являются причиной существенных значений прогиба при нагружении и, соответственно, приводят к невозможности оценить с высокой точностью длину плеча изгибающей силы. По результатам расчета для деформации 3 000 млн⁻¹ для БРС толщиной 2 мм и длиной 30 мм изменение расстояния

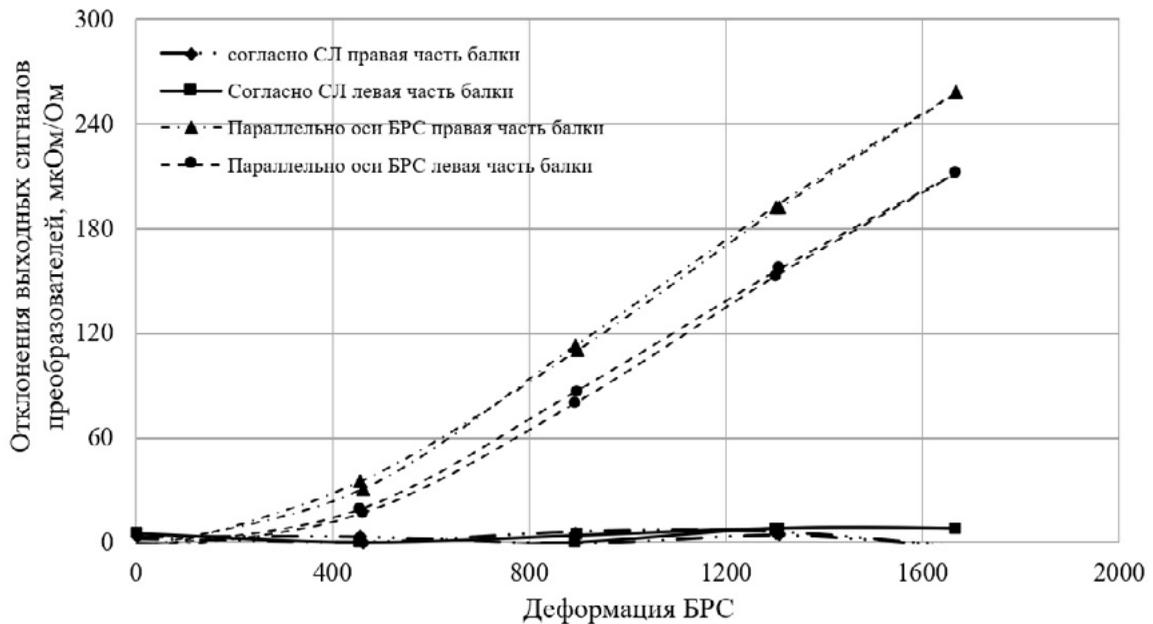


Рис. 4. Отклонения от сигналов преобразователей, расположенных по оси балки

Fig. 4. Deviations from the signals of transducers located along the beam axis

до точки приложения нагрузки, обусловленное изгибом балки, составит 0,074 мм (при пересчете в единицы деформации составит 0,25 %). Это расстояние должно учитываться при вычислении поправки в величину изгибающего момента по всей длине балки с учетом составляющей горизонтальной проекции ширины балки, обусловленной эффектом Пуассона. Такой способ оценки деформации – посредством использования грузов известной массы – рассмотрен в [17]. Стоит отметить, что экспериментальные результаты согласуются с результатами моделирования, а максимальная погрешность измерения деформации составила 7,4 %.

Измерение прогиба. Метод оценки деформации посредством измерения прогиба балки является приоритетным, однако конец фактической балки равного сопротивления имеет конструктивное расширение для обеспечения нагружения, и прогиб расширенной области меньше расчетного прогиба. К тому же изгиб балки приводит к смещению точки измерения прогиба, что вносит ошибки в результат измерений. Таким образом, положение измерения прогиба оказывает существенное влияние на результат расчета деформации. Авторы статьи [6] определили оптимальное положение измерения прогиба согласно результатам численного моделирования. Оптимальное положение находилось на стыке эффективной рабочей зоны и зоны расширения балки.

Смещение нейтрального слоя. Значительный изгиб балки также становится причиной смещения нейтрального слоя, так как приложенная сила не перпендикулярна касательной к балке и может быть разложена на две взаимно перпендикулярные составляющие. Составляющая, перпендикулярная плоскости сечения, создает в сечении балки дополнительное растяжение и соответствующее нормальное напряжение. Поперечное сечение находится в плоскости, перпендикулярной нейтральной оси балки, т. к. в соответствии с принципом минимума потенциальной энергии момент сопротивления сечения должен иметь минимальное значение. Тогда распределение напряжений в балке происходит не по линейному закону, а по гиперболическому, и, поскольку сумма нормальных усилий, распределенных по поперечному сечению, равняется нулю, можно заключить, что нейтральная ось перемещается от центра тяжести по направлению к центру кривизны оси балки. В итоге это приводит к неравенству по модулю значений деформации растяжения – сжатия на поверхности балки.

Заключение

В рамках данной работы экспериментально исследованы способы получения однородной деформации

по длине рабочего участка и возможности применения балок равного сопротивления изгибу в качестве рабочих эталонов деформации. По итогам представлены следующие данные:

- результаты анализа модели изгиба и конструкции балки равного сопротивления изгибу;
- параметры, входящие в уравнение измерения и связанные с методическими факторами, а также оказывающие влияние на результат измерений деформации;
- рассмотрены основные причины неравномерности деформационного поля балки переменного сечения при определении характеристик первичных преобразователей деформации;
- отклонения сигналов первичных преобразователей, расположенных вне осевого сечения при ориентации вдоль оси балки и вдоль силовых линий, сходящихся в точке приложения нагрузки по результатам эксперимента. Погрешность, обусловленная ориентацией первичных преобразователей на балке в зависимости от угла между боковыми гранями, может составлять от 0,15 до 0,23 %.

Дополнительно можно сделать вывод о том, что установление метрологических характеристик БРС с помощью компаратора с установленными характеристиками на балках чистого изгиба позволяет (а) выявить разницу деформации верхних и нижних волокон, (б) определить отклонения при ориентации первичных преобразователей для реальной разметки балки, (в) определить поправки для каждой ступени нагружения.

Полученные результаты могут быть использованы для накопления и расширения теоретической базы знаний о возможности использования консольной балки равного сопротивления как несущего элемента в градуировочных установках. Помимо прочего, эти данные могут быть полезны при определении технических и метрологических характеристик первичных преобразователей деформации при испытаниях, калибровке и поверке.

Благодарности: Это исследование не получало финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора.

Acknowledgments: This research did not receive financial support in the form of a grant from any governmental, for-profit, or non-profit organizations.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: The author declares no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Development of a novel adaptive range strain sensor for structural crack monitoring / Z. Jia [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10. P. 1710. <https://doi.org/10.3390/jmse10111710>
2. Chen G., Liu H., Gao R. Calibration technology of optical fiber strain sensor // *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*. 2022. Vol. 28. P. 551–559. <https://doi.org/10.1007/s12204-022-2406-9>
3. Применение оптоволоконных технологий при создании встроенных систем самодиагностики авиационных конструкций / А. Н. Серьезнов [и др.] // *Системы анализа и обработки данных*. 2016. Т. 64, № 3. С. 95–105.
4. Zubin D. Theoretical design of calibration beams for strain gauge factor measuring apparatus // *Strain*. 1998. Vol. 34. P. 99–107. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.1998.tb01092.x>
5. Standard stand for determining the metrological characteristics of resistance strain gages / V. S. Volobuev [et al.] // *Measurement Techniques*. 2000. Vol. 43. P. 1052–1056. <https://doi.org/10.1023/A:1010939718310>
6. Calibration model optimization for strain metrology of equal strength beams using deflection measurements / Y. Yan [et al.] // *Sensors*. 2023. Vol. 23, № 6. P. 3059. <https://doi.org/10.3390/s23063059>
7. Research on a precision calibration model of a flexible strain sensor based on a variable section cantilever beam / Q. Wang [et al.] // *Sensors*. 2023. Vol. 23. P. 4778. <https://doi.org/10.3390/s23104778>
8. Анализ и проектирование конструкций. В 2 т. Т. 7. Ч. 1 / Г. Сендецки, А. Викарио мл., Р. Толанд и др. ; ред. К. Чамис ; Перевод В. В. Васильева ; под ред. Ю. М. Тарнопольского. 1978. 344 с.
9. Манжосов В. К. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов. Ульяновск: УлГТУ, 2016. 59 с.
10. Zheng W.-H., Dan D.-H., Cheng W. Calibration of 0.1 μe -level resolution FBG sensor by the equal strength beam // *Journal of Optoelectronics Laser*. 2017. Vol. 28, № 4. P. 365–370. <https://doi.org/10.16136/j.joel.2017.04.0245>
11. Oore S., Oore M. Uniform strength for large deflections of cantilever beams under end point load // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2009. Vol. 38. P. 499–510. <https://doi.org/10.1007/s00158-008-0291-y>
12. Research on a precision calibration model of a flexible strain sensor based on a variable section cantilever beam / J. Cui [et al.] // *Sensors*. 2023. Vol. 23. P. 4778. <https://doi.org/10.3390/s23104778>
13. Тимошенко С. П. Прочность и колебания элементов конструкций. М.: Наука, 1975. 704 с.
14. Романов А. Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. М.: Наука, 1988. 280 с.
15. Пачурин В. Г., Галкин В. В., Пачурин Г. В. Оценка деформационной неоднородности в раскатанных изделиях с клиновым профилем // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 11, Ч. 4. С. 765–773.
16. Орлов П. И. Основы конструирования. Справочно-методическое пособие в 3-х книгах. Кн. 1. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977. 623 с.
17. Tu Y., Gong H., Chen J., Jin Y. Simulation and experimental investigations on the strain measurement of the uniform strength beam using a FBG sensor // *Journal of Physics Conference Series*. 2011. Vol. 276, № 1. P. 012145. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/276/1/012145>

REFERENCES

1. Jia Z., Ma G., Su X., Li Y., Xing C., Ye S. et al. Development of a novel adaptive range strain sensor for structural crack monitoring. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022;10:1710. <https://doi.org/10.3390/jmse10111710>
2. Chen G., Liu H., Gao R. Calibration Technology of optical fiber strain sensor. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*. 2022;28:551–559. <https://doi.org/10.1007/s12204-022-2406-9>
3. Serious A. N., Kuznetsov A. B., Lukyanov A. V., Bragin A. A. Application of fiber-optic technologies in the creation of embedded self-diagnosis systems for aircraft structures. *Analysis and data processing systems*. 2016;64(3):95–105. (In Russ.).
4. Zubin D. Theoretical design of calibration beams for strain gauge factor measuring apparatus. *Strain*. 1998;34:99–107.
5. Volobuev V. S., Klokov N. P., Kosov L. I., Kamkova V. D., Minakov V. P., Tikhomirov V. I. Standard stand for determining the metrological characteristics of resistance strain gages. *Measurement Techniques*. 2000;43:1052–1056. <https://doi.org/10.1023/A:1010939718310>
6. Yan Y., Wu Z., Cui J., Chen K., Tang Y., Yang N. Calibration model optimization for strain metrology of equal strength beams using deflection measurements. *Sensors*. 2023;23:3059. <https://doi.org/10.3390/s23063059>
7. Wang Q., Cui J., Tang Y., Pang L., Chen K., Zhang B. Research on a precision calibration model of a flexible strain sensor based on a variable section cantilever beam. *Sensors*. 2023;23:4778. <https://doi.org/10.3390/s23104778>
8. Sendetski G., Vikario A. ml., Toland R. Analysis and design of structures. In 8 vol. of vol. 7. Is. 7. New York: London; 1978. 300 p. (In Russ.).
9. Manzhosov V. K. Laboratory workshop on the resistance of materials. Ulyanovsk: UIGTU; 2016. 59 p. (In Russ.).
10. Zheng W., Dan D., Cheng W. Calibration of 0.1 μe -level resolution FBG sensor by the equal strength beam. *Journal of Optoelectronics Laser*. 2017;28(4):365–370. <https://doi.org/10.16136/j.joel.2017.04.0245>
11. Oore S., Oore M. Uniform strength for large deflections of cantilever beams under end point load. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2009;38:499–510. <https://doi.org/10.1007/s00158-008-0291-y>

12. Cui J., Tang Y., Pang L., Chen K., Zhang B. Research on a Precision Calibration Model of a Flexible Strain Sensor Based on a Variable Section Cantilever Beam. *Sensors*. 2023;23:4778. <https://doi.org/10.3390/s23104778>
13. Timoshenko S. P. Strength and vibrations of structural elements. Moscow: Nauka; 1975. 704 p. (In Russ.).
14. Romanov A. N. Destruction under low-cycle loading. Moscow: Nauka; 1988. 280 p. (In Russ.).
15. Pachurin V. G., Galkin V. V., Pachurin G. V. Assessment of deformation heterogeneity in rolled products with a wedge profile. *Fundamental research*. 2014;11(4):765–773. (In Russ.).
16. Orlov P. I. Fundamentals of design. A reference manual in 3 books. Book 1. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie; 1977. 623 p. (In Russ.).
17. Tu Y., Gong H., Chen J., Jin Y. Simulation and experimental investigations on the strain measurement of the uniform strength beam using a FBG sensor. *Journal of Physics Conference Series*. 2011;276(1):012145.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

ASTM E251 92 Standard test methods for performance characteristics of metallic bonded resistance strain gages. 2009. Available at: <https://www.astm.org/e0251-92r09.html> [Accessed 13 September 2023].

AIA/NAS – NAS942 Strain gages, bonded resistance. 2021. Available at: <https://standards.globalspec.com/std/9987360/NAS942> [Accessed 13 September 2023].

BS6888:1988 Methods for calibration of bonded electrical resistance strain gauges. Available at: <https://standards.globalspec.com/std/879593/BS%206888> [Accessed 13 September 2023].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Трибушевская Лидия Александровна – и. о. заведующего лабораторией метрологии силы, массы и линейно-угловых величин УНИИМ – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» 620075, Россия, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, д. 4
e-mail: form233@uniim.ru
Researcher ID: ABI-7037-2020

Митрофанов Владимир Витальевич – инженер лаборатории метрологии силы, массы и линейно-угловых величин УНИИМ – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» 620075, Россия, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, д. 4
e-mail: form233@uniim.ru

Осипов Леонид Евгеньевич – инженер лаборатории метрологии силы, массы и линейно-угловых величин УНИИМ – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» 620075, Россия, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, д. 4
e-mail: osipovle@uniim.ru
ResearcherID: ABB-6879-2020
<https://orcid.org/0000-0003-1106-8038>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lydia A. Tribushevskaya – Acting Head of the laboratory of metrology of force, mass and linear-angular magnitudes, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology 4 Krasnoarmeyskaya str., Yekaterinburg, 620075, Russia
e-mail: form233@uniim.ru
Researcher ID: ABI-7037-2020

Vladimir V. Mitrofanov – Engineer of the laboratory of metrology of force, mass and linear-angular magnitudes, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology 4 Krasnoarmeyskaya str., Yekaterinburg, 620075, Russia
e-mail: form233@uniim.ru

Leonid E. Osipov – Engineer of the laboratory of metrology of force, mass and linear-angular magnitudes, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology 4 Krasnoarmeyskaya str., Yekaterinburg, 620075, Russia
e-mail: osipovle@uniim.ru
ResearcherID: ABB-6879-2020
<https://orcid.org/0000-0003-1106-8038>

