

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Научная статья

УДК 53.089.68::620.171.35

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-1-38-52>



Разработка поверочной схемы для средств измерений деформации, используемых при одноосных испытаниях

Л. А. Трибушевская ✉

Уральский научно-исследовательский институт метрологии –
филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», г. Екатеринбург, Россия
✉ form233@uniim.ru

Аннотация: В статье рассмотрена проблема отсутствия прослеживаемости результатов измерений механической деформации к государственным эталонам единиц величин и описано исследование, целью которого являлась разработка проекта поверочной схемы. Проанализированы требования к метрологическим характеристикам тензометров, предъявляемые в отечественных и зарубежных стандартах. Определены основные способы нормирования метрологических характеристик, проведен их сравнительный анализ. Установлены преимущества и недостатки нормирования метрологических характеристик экстензометров, определенных в ISO 9513 *Metallic materials – Calibration of extensometer systems used in uniaxial testing* и ASTM E83 *Standard practice for verification and classification of extensometer systems*. Предложен единый подход к способу выражения допускаемых значений погрешности в единицах, принятых для измерений механической деформации, и представлен порядок передачи единицы деформации таким средствам измерений, как экстензометры, тензометры и измерительные преобразователи деформации. Предлагаемая поверочная схема для средств измерений деформации имеет значимость при установлении метрологической прослеживаемости средств измерений деформации, применяемых при одноосных испытаниях.

Работа сфокусирована на вопросах, которые необходимо учесть при создании единой системы метрологического обеспечения измерений деформации, в частности – о необходимости введения классификации средств измерений деформации, способах нормирования метрологических характеристик и методах передачи единицы от эталонов к измерителям деформации.

Ключевые слова: тензометры, экстензометры, измерение деформации, поверочная схема, испытания на растяжение, испытания на сжатие, одноосные испытания, начальная расчетная длина, базовая длина, ISO 9513, ASTM E83, машины испытательные

Ссылка при цитировании: *Трибушевская Л. А.* Разработка поверочной схемы для средств измерений деформации, используемых при одноосных испытаниях // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 1. С. 38–52. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-1-38-52>.

Статья поступила в редакцию 20.11.2024; одобрена после рецензирования 13.12.2024; принята к публикации 25.03.2025.

MODERN METHODS OF ANALYSIS OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Research Article

Development of a Verification Schedule for Deformation Measuring Instruments Used in Uniaxial Tests

Lydia A. Tribushevskaja ✉

UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, Yekaterinburg, Russia
✉ form233@uniim.ru

Abstract: The article considers the problem of the lack of traceability of mechanical deformation measurement results to state standards of measurement units and describes a study aimed at developing a verification schedule design. The requirements for metrological characteristics of strain gauges presented in domestic and foreign standards are analyzed. The main methods of standardization of metrological characteristics are defined; their comparative analysis is carried out. The advantages and disadvantages of standardization of metrological characteristics of extensometers defined in ISO 9513 and ASTM E83 are established. A unified approach to the method of expressing permissible error values in units adopted for measuring mechanical deformation is proposed, and the procedure for transferring the unit of deformation to such measuring instruments as extensometers, strain gauges and measuring transducers of deformation is presented. The proposed verification schedule for deformation measuring instruments is important in establishing the metrological traceability of deformation measuring instruments used in uniaxial tests.

The work is focused on issues that need to be taken into account when creating a unified system of metrological support for deformation measurements, in particular, the need to introduce a classification of deformation measuring instruments, methods for standardizing metrological characteristics, and methods for transferring units from standards to deformation measuring instruments.

Keywords: strain gauges, extensometers, strain measurement, verification schedule, tensile tests, compression tests, uniaxial tests, initial gauge length, reference length, ISO 9513, ASTM E83, testing machines

For citation: Tribushevskaja L. A. Development of a verification schedule for deformation measuring instruments used in uniaxial tests. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025;21(1):38–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-1-38-52>.

The article was submitted 20.11.2024; approved after reviewing 13.12.2024; accepted for publication 25.03.2024.

Введение

Меры и модели измерения деформации

Испытания на растяжение/сжатие широко применяются для определения характеристик прочности, упругости, пластичности и др. [1, 2] в проектировании и изготовлении компонентов, машин и конструкций [3–7]. При одноосном

испытании одновременно измеряются сила и деформация при растяжении (сжатии).

В общем понимании деформация есть изменение размеров и формы физических тел, вызванное переменной взаимного положения частиц тела, связанное с их перемещением друг относительно друга, обусловленное либо полем

напряжений (механическая деформация), либо изменением температуры (тепловое расширение). Характеристики прочности обусловлены не столько значением абсолютного изменения взаимного положения частиц тела, сколько его относительного изменения. В механике сплошных сред принято оперировать величиной «деформация бесконечно малой окрестности материальной точки» – так называемой мерой деформации. На практике используют различные меры деформации, которые позволяют оценить отдельные компоненты деформации или деформации отдельных элементов изделия: изменения линейных размеров, изменения углов, некоторых площадей и др. [8].

Перечислим наиболее распространенные меры деформации:

– *нормальная инженерная деформация* (относительная деформация):

$$\varepsilon = (l_1 - l_0)/l_0, \quad (1)$$

где ε – нормальная инженерная деформация (часто данную величину выражают в процентах) [9]; l_0 – начальная измеренная линейная геометрическая характеристика образца; l_1 – конечная измеренная линейная геометрическая характеристика образца;

– *деформация Генки* (логарифмическая (истинная) степень деформации), используемая также при расчетах параметров волочения:

$$e = \ln(l_1/l_0); \quad (2)$$

– *деформация Альманси – Эйлера, деформация Грина – Лагранжа* и др.

Данные меры имеют свои преимущества и ограничения, понятны и в первом приближении адекватно описывают элементарные деформации в простых процессах деформирования – растяжении и осадке (сжатии). Под «первым приближением» в данном контексте следует понимать однородность деформации по всему объему, монотонность процесса деформирования [10], идентичность геометрии образца до деформации и после (т. е. отсутствие шейки, бочкообразности и т. д.).

В реальности по объективным причинам невозможно осуществление не только таких идеальных условий деформирования, но и идеальной геометрии, структуры деформируемого материала. Выбор моделей измерения

деформации материала обусловлен задачами исследования:

– *физические модели* направлены на изучение влияния несовершенств кристаллической решетки на их прочность; на исследования возможностей повышения прочности и пластичности металлов и сплавов, однако они не дают оценки механических свойств реальных материалов;

– *инженерно-физические модели* рассматривают материал как совокупность зерен с различной ориентированной кристаллической структурой, позволяют объяснить ряд важных особенностей поведения материала и могут применяться в задачах прочностной надежности тел, для которых модель сплошности не применима [11];

– *инженерные модели сплошной среды* рассматривают материал как сплошное и однородное тело. Такие модели усредняют свойства в объемах материала, содержащих достаточно большое число структурных элементов (например, зерен материала). Однородность понимается в том смысле, что все неоднородные дискретные структурные элементы заменяются «осредненной» непрерывной средой¹.

Инженерные модели материала (модели сплошной среды) широко применяются в задачах прочностной надежности в сочетании с системой экспериментальных исследований, и логично при одноосных испытаниях использование меры инженерной (относительной) деформации для измерений деформации.

При испытаниях на растяжение деформация (ε) аппроксимируется средним единичным удлинением в направлении приложенной силы, определяемым по общему удлинению (ΔL) выбранной измерительной длины (L_0) [8], и деформация выражается отношением

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}. \quad (3)$$

Методы и основные средства измерений деформации

Существует большое разнообразие методов измерения деформации при испытании на растяжение, например с помощью

¹ Биргер И. А., Мавлютов Р. Р. Сопротивление материалов : Учебное пособие. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 560 с.

тензометрического датчика, экстензометра, движения траверсы машины, геометрический муаровый метод, оптические методы измерения деформации и др.

ГОСТ 18957–73² устанавливает, что тензометры предназначены для измерения линейных деформаций строительных материалов и конструкций в статическом режиме в условиях непосредственного и постоянного соприкосновения с объектом измерений и бывают механическими, оптико-механическими и электромеханическими тензорезисторными. ISO 9513³ дает определение слова «extensometer» как «оборудование, используемое для измерения смещения или деформации на поверхности испытуемого образца». Важно, что в переводе значение слова «tensometer» не совпадает с русскоязычным значением слова «тензометр», установленным ГОСТ 18957–73. В настоящей статье для применяемых при одноосных испытаниях средств измерений деформации принят термин, распространенный в русском языке, а именно – экстензометр.

Преимуществами экстензометров перед остальными средствами и методами являются, в частности, точность, простота использования и подконтрольность [12]. Так, например, в исследованиях [13] авторы усовершенствовали оптический экстензометр, используя модернизированный объектив и меняя ширину угла обзора с помощью оптических призм. Результаты показали, что значения деформации, полученные с помощью предложенного экстензометра при одноосном растяжении, отлично согласуются с данными, полученными с помощью тензометрического датчика, что подтверждает высокую точность оптического экстензометра. Работа [14] посвящена определению влияющих на деформацию горной породы отклонений, полученных с помощью навесных экстензометров на силоизмерительной машине, для повышения точности измерения деформации. Исследование заключалось в проведении циклических температурных испытаний образца алюминиевого сплава

при изменении температуры окружающей среды до 90 °С при гидростатическом давлении, поддерживаемом на уровне 2 МПа. В исследовании [15] представлены результаты испытаний по оценке точности измерений, проводимых оптической системой анализа полей перемещений и деформаций при одновременном использовании навесного осевого датчика деформации. Показана высокая эффективность применения метода корреляции цифровых изображений для изучения поведения материалов на стадиях неупругого деформирования при возникновении неоднородных полей деформаций, а также волн локализованной пластической деформации.

Актуальные проблемы исследования

Одной из важнейших задач является получение достоверного и воспроизводимого результата измерений в условиях прослеживаемости [16–18]. Представленные в утвержденной Приказом № 2498⁴ поверочной схеме для средств измерений силы машины силоизмерительные поверяются в эксплуатации, таким образом результат измерений силы является прослеживаемым. Многие силоизмерительные машины при поставке укомплектованы экстензометрами, что позволяет с помощью единого программного обеспечения обеспечить синхронное получение результатов измерений силы и деформации и дальнейшую их математическую обработку.

Однако при внесении в раздел «Утвержденные типы средств измерений» ФИФ ОЕИ⁵ часто метрологические характеристики экстензометра не подтверждаются, что приводит к пренебрежению данным средством измерений в ходе испытаний в пользу измерителей перемещения траверсы, что негативно сказывается на точности и сопоставимости результатов измерений, полученных в одной и тем более в разных лабораториях. Причиной сложившейся ситуации является отсутствие метрологического обеспечения на уровне нормативных документов

² ГОСТ 18957–73 Тензометры для измерения линейных деформаций строительных материалов и конструкций. Общие технические условия.

³ ISO 9513 Metallic materials – Calibration of extensometer systems used in uniaxial testing.

⁴ Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений силы : Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 2498 от 22 октября 2019 г.

⁵ Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

для данных средств измерений, в частности поверочной схемы, стандартизированной методики поверки и, соответственно, документированных требований в стандартах на методы испытаний.

В настоящее время к действующим документам в области измерения деформации относится ГОСТ 8.543–86⁶, который в силу ряда несоответствий фактически не является рабочим [19]. В последнее десятилетие отмечается востребованность метрологического обеспечения в области измерений деформации. Об этом свидетельствует регистрация более 40 новых типов средств измерений деформации, прошедших испытания в целях утверждения типа и внесенных в ФИФ ОЕИ: тензорезисторы (10 типов); датчики измерений локальных деформаций (6 типов); тензометры, включая экстензометры (22 типа); тензокалибраторы и установки воспроизведения деформации (10 типов). Общий объем поступающих на отечественный рынок средств измерений деформации превышает 1 млн шт. в год. Приходится констатировать определенное отставание уровня нормативной и эталонной базы потребностям в метрологическом обеспечении этого вида измерений. Очевидна необходимость обеспечения документально подтвержденной установленной связи средств измерений деформации с Государственным первичным эталоном длины, т. е. обеспечения прослеживаемости в соответствии с требованиями 102-ФЗ⁷.

Предмет и цель исследования

УНИИМ – филиалом ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» в 2019 г. разработана и утверждена Государственная первичная референтная методика измерений (ГПРМИ) деформации поверхности упругодеформированной балки прямоугольного постоянного сечения, нагружаемой по схеме чистого изгиба (ФР.ПР1.27.2019.00010). В 2021 г. утвержден исходный эталон, реализующий ГПРМИ ФР.ПР1.27.2019.00010, и локальная поверочная схема для средств измерений деформации полного поля. Данная схема не предусматривает

⁶ ГОСТ 8.543–86 Государственная поверочная схема для средств измерений деформации.

⁷ Об обеспечении единства измерений : Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ.

передачу единицы средствам измерений деформации, принцип действия которых основан на измерении относительного перемещения двух точек исследуемого объекта.

Цель статьи – обсуждение проекта дополнения локальной поверочной схемы для средств измерений деформации полного поля. Для обсуждения предложены результаты исследования метрологического обеспечения средств измерений деформации. Исследование заключалось в решении вопросов оценки погрешностей, определения эталонов и методов, используемых для определения значений метрологических характеристик.

Материалы и методы

Определение меры и модели измерений деформации

В рамках настоящих исследований для одноосных испытаний принята инженерная модель сплошной среды и определена применяемая мера деформации – инженерная (1). Данная мера является не высокоточной, но наиболее соответствующей поставленным задачам рутинных измерений деформации при одноосных испытаниях. Поэтому приклеиваемые измерители, экстензометры полного поля, которые используют сложные алгоритмы обработки данных и, соответственно, иные меры деформации [20], не являются объектом внимания настоящей статьи.

Классификация экстензометров

Классификация экстензометров является необходимым этапом при определении единых принципов, методов и требований к эталонам при передаче единицы. Распространяемость метода одноосных испытаний на широкий спектр конструкционных материалов (металлы, композиты, пластмассы, полимеры и др.) обуславливает необходимость формулирования дополнительных требований к условиям и применяемым средствам измерений. Экстензометры можно классифицировать по ряду признаков: функциональному назначению, степени автоматизации, области применения, точности, конструктивным особенностям [21]. Обобщенно классификацию экстензометров можно представить в виде блок-схемы (рис. 1). В блок-схеме не отражены

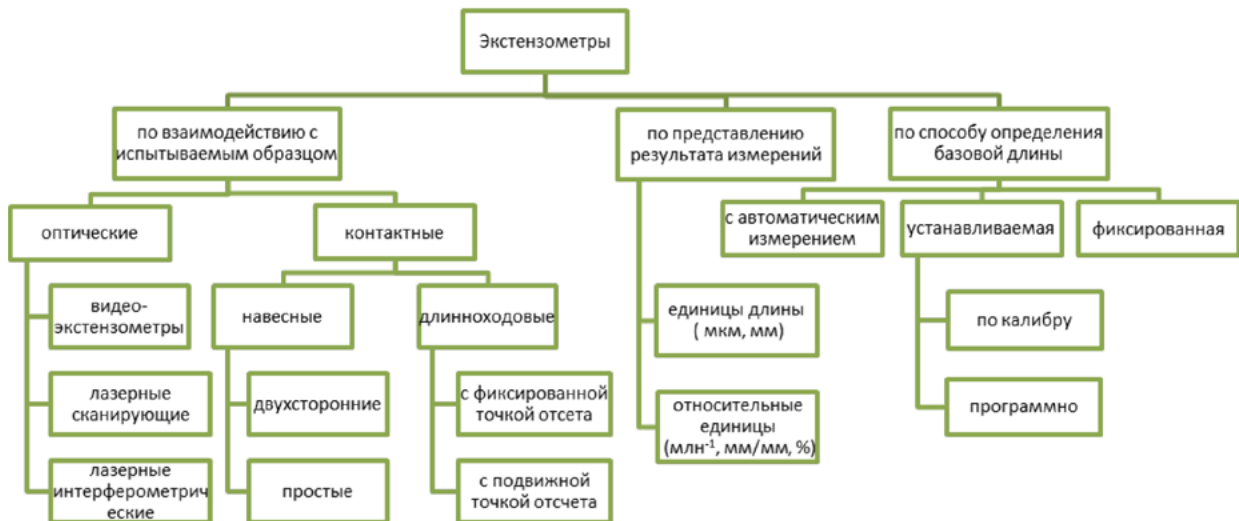


Рис. 1. Типология экстензометров

Fig. 1. Typology of extensometers

экстензометры, разрабатываемые для применения в специальных условиях [22–24].

В соответствии с приведенной на рис. 1 блок-схемой конструкция и принцип действия экстензометра определяются, главным образом, характером его взаимодействия с испытываемым образцом. Контактные экстензометры (рис. 2) представлены навесными и длинноходовыми экстензометрами. При применении навесных экстензометров результат измерений

определяется линейным перемещением одного ножа относительно другого, которое пропорционально изменению выходного сигнала первичного преобразователя. В длинноходовом экстензометре для получения значения деформации необходимо учитывать перемещений двух пар ножей. Диапазон и результат измерений большинства бесконтактных экстензометров определяется зоной обзора и относительным изменением положения одной метки относительно другой.



Рис. 2. Длинноходовой и навесной экстензометры Instron

Fig.2. Instron Long Travel and Hanging Extensometers

Критерии при разработке поверочной схемы

При работе над проектом поверочной схемы, наряду с метрологическими параметрами, характеризующими уровень точности передачи размера единицы физической величины от эталона к рабочим средствам измерений, учитывались организационно-технические и экономические параметры, составляющие принцип многокритериальности разработки поверочной схемы [25]. Ниже представлены наиболее значимые аспекты.

Диапазон и погрешность измерений. Требования к точности измерения деформации регламентированы в отечественных стандартах на машины для испытания материалов (ГОСТ 28840–90, ГОСТ 28841–90, ГОСТ 28845–90)⁸. В ГОСТ 28840–90 машины классифицируются по допускаемой погрешности измерения деформации (удлинения) на четыре группы (1; 2; 3; 5 % измеряемой величины), а в ГОСТ 28845–90 машины для испытания на ползучесть по допускаемой погрешности измерения деформации подразделяются на три группы (0,5; 1,0; 2,0 и 1; 2; 3 % предельного значения диапазона для металлов и полимерных материалов, соответственно). Надо отметить, что в отечественных стандартах не нормируется погрешность для малых значений деформации, также никак не ограничено значение максимального допускаемого разрешения. Представление данных средств измерений в государственной поверочной схеме для средств измерений деформации по ГОСТ 8.543–86 ограничивалось одной веткой в две ступени (соответствующая часть схемы представлена на рис. 3).

В настоящее время парк средств измерений деформации, применяемых при одноосном растяжении, данной схемой не может быть обеспечен в силу возросших требований к точности и диапазону измерений, а также многообразия конструктивных решений тензометров,

экстензометров, измерителей деформации, измерителей перемещений.

Эталоны и методы передачи единицы. Тензокалибраторы – эталон деформации согласно ГОСТ 8.543–86 – преимущественно обеспечивают передачу единицы деформации навесным экстензометрам и экстензометрам, абсолютное перемещение ножей которых не превышает 40–50 мм. Именно такой диапазон измерений имеет большинство представленных на рынке и в государственном реестре средств измерений тензокалибраторов. Тензокалибраторы реализуют метод прямых измерений. Для экстензометров, перемещение ножей которых превышает 40 мм, поверка (калибровка) осуществляется с помощью измерителей линейных перемещений лазерных с применением кинематически развязанного образца (двух половинок одного образца) и вспомогательного средства сличения, в качестве которого чаще всего выступает машина испытательная, на которой установлен экстензометр.

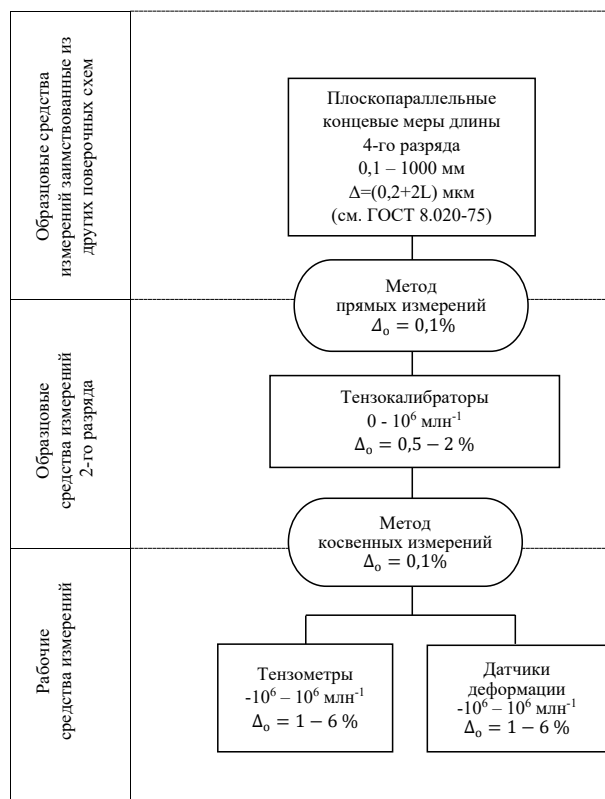


Рис. 3. Обеспечение прослеживаемости тензометров в соответствии с ГОСТ 8.543–86

Fig. 3. Ensuring traceability of strain gauges in accordance with GOST 8.543–86

⁸ ГОСТ 28840–90 Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования. ГОСТ 28841–90 Машины для испытания материалов на усталость. Общие технические требования. ГОСТ 28845–90 Машины для испытания материалов на ползучесть, длительную прочность и релаксацию. Общие технические требования.

Несмотря на высокие показатели точности лазерных измерительных систем, вышеуказанный способ поверки (калибровки) является дорогостоящим и предъявляет дополнительные требования не только к квалификации поверителя, но и к техническому устройству, применяемому в качестве вспомогательного средства сличения:

- 1) соосное перемещение подвижной траверсы машины;
- 2) обеспечение перемещений с малым шагом дискретности;
- 3) возможность полной остановки при достижении заданного перемещения.

Соответственно, при поверке (калибровке) установленных на мощных гидравлических машинах экстензометров могут быть получены заниженные показатели точности из-за невозможности обеспечить условия поверки (калибровки).

Технические требования к средствам измерений деформации. Особенность средств измерений перемещений одного ножа относительно другого при минимально-возможном влиянии со стороны экстензогра на систему «образец – машина», а с другой – сохраняемость экстензогра при разрыве образца. Что объясняет применение малых измерительных усилий (около 0,3 Н) при прижимной силе, обеспечивающей контакт ножей к образцу во время всего испытания без проскальзывания (часто используют дополнительные пружинные скобки или резинки), малый вес навесных экстензометров (примерно 120 г), и может быть ограничивающим условием для применения мягких материалов.

Для применяемых в качестве эталонов средств измерений – тензокалибраторов – наряду с высокой точностью измерений воспроизводимых перемещений предъявляются следующие требования:

- обеспечение соосности и исключительно возвратно-поступательного движения подвижного штока относительно неподвижного, жесткости конструкции, что не позволяет в качестве эталона рассматривать использование микрометрических головок без их проверки в приспособлении;
- выражение допускаемых значений погрешности в единицах, принятых для измерений

механической деформации экстензометры, можно разделить по единице величин, в которых представлен результат измерений. В случае представления результата измерений в единицах длины не требуется пересчет показаний для установления соответствия показаниям эталона. Однако результат измерений деформации предполагает использование относительных единиц измерений, и ряд рабочих средств измерений представляет результат измерений также в относительных единицах;

– начальная расчетная (базовая) длина: а) если при каждом испытании определяется фактическое значение расстояния между парами ножей, необходимо нормировать и проверять погрешность данного измерения; б) если 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 экстензометров и (или если функционал экстензогра 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 экстензометры и тензокалибраторы зарубежного производства, которые изготавливаются в соответствии с ISO 9513 или ASTM E83⁹. Ни один из подходов к нормированию метрологических характеристик экстензометров ISO 9513 или ASTM E83 не позволяет охватить все экстензометры для одноосных испытаний без использования пересчета относительной деформации в абсолютное удлинение. В табл. 1 приведены требования

⁹ ASTM E83 Standard practice for verification and classification of extensometer systems.

для экстензометров различных классов точности по ISO 9513 и ASTM E83, а на рис. 4 сопоставлены границы допустимой погрешности для экстензометров классов 0,5 по ISO 9513

и B-1 по ASTM E83 в зависимости от начальной расчетной (базовой) длины.

ISO 9513 не учитывает при нормировании размер начальной расчетной длины, поэтому

Таблица 1. Классификация экстензометров

Table 1. Classification of extensometers

Документ	Класс экстензометра	Относительная погрешность определения начальной расчетной длины, %	Разрешающая способность*			Допускаемая погрешность*		
			$(r/l_i) \cdot 100, \%$	$r, \text{мкм}$	мм/мм	$q_{\text{гб}}, \%$	$(l_i - l_{\text{гб}}), \text{мм}$	мм/мм
ASTM E83	Класс А	$\pm 0,1$	0,05		0,00001	$\pm 0,1$		$\pm 0,00002$
ISO 9513	0,2	$\pm 0,2$	0,1	0,2		$\pm 0,2$	$\pm 0,6$	
ASTM E83	Класс B-1	$\pm 0,25$	0,25		0,00005	$\pm 0,5$		$\pm 0,0001$
ISO 9513	0,5	$\pm 0,5$	0,25	0,5		$\pm 0,5$	$\pm 1,5$	
ASTM E83	Класс B-2	$\pm 0,5$	0,25		0,0001	$\pm 0,5$		$\pm 0,0002$
ISO 9513	1	$\pm 1,0$	0,5	1,0		$\pm 1,0$	± 3	
ASTM E83	Класс С	$\pm 1,0$	0,5		0,0005	$\pm 1,0$		$\pm 0,001$
ASTM E83	Класс D	$\pm 1,0$	0,5		0,005	$\pm 1,0$		$\pm 0,01$
ASTM E83	Класс E	$\pm 1,0$	0,5		0,05	$\pm 1,0$		$\pm 0,1$
ISO 9513	2	$\pm 2,0$	1,0	2,0		$\pm 2,0$	$\pm 6,0$	

* Что больше.

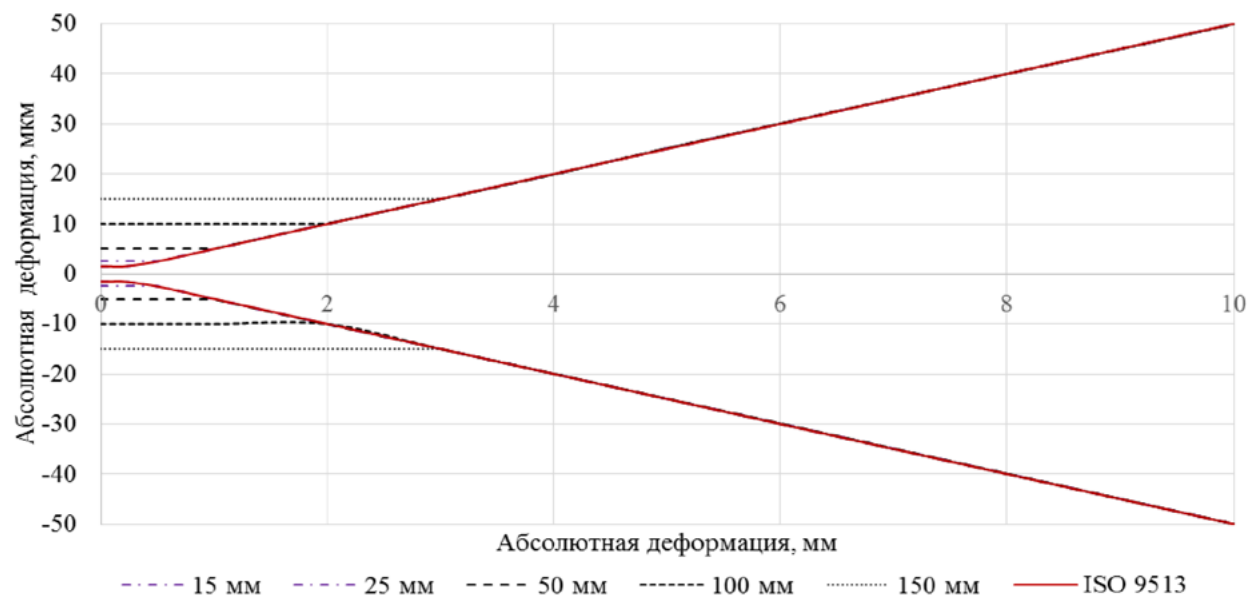


Рис. 4. Пределы допустимой погрешности для экстензометров классов 0,5 по ISO 9513 и B-1 по ASTM E83 в зависимости от начальной расчетной длины

Fig. 4. Limits of permissible error for extensometers of classes 0.5 according to ISO 9513 and B-1 according to ASTM E83 depending on the initial gauge length

требования данного стандарта соответствуют наиболее жестким условиям по ASTM E83. В настоящее время большинство навесных экстензометров оснащается дополнительными вставками (их количество может достигать десяти), позволяющими измерять деформацию на разной начальной расчетной (базовой) длине. Принцип работы длинноходовых экстензометров изначально предполагает выбор произвольной начальной расчетной (базовой) длины, ограниченной только конструктивными особенностями экстензометра.

Результаты и обсуждение

С учетом рассмотренных выше данных разработан проект поверочной схемы, устанавливающей порядок передачи единицы деформации таким средствам измерений как экстензометры, измерительные преобразователи деформации. Их принцип действия основан на измерении относительного перемещения двух точек исследуемого объекта, составляющих базовую длину. Усреднение измеряемых деформаций происходит математически при допущении однородности деформации на всей поверхности базовой длины исследуемого объекта (более 25 типов утвержденных СИ).

Проект поверочной схемы охватывает средства измерений деформации, применяемые при одноосных испытаниях. Графическая часть приведена на рис. 5.

Как видно на рис. 5, передача единицы средствам измерений деформации (экстензометрам) осуществляется от средств измерений длины, таких как микрометрические винты (тензокалибраторы), и заимствованных эталонов из поверочной схемы длины (измерителей линейных перемещений лазерных), что определяет два основных метода передачи единицы – прямых измерений и сличений с помощью вспомогательного средства сличения.

Проект поверочной схемы охватывает средства измерений деформации с диапазоном измерений от $(0,001/L_0)$ млн⁻¹ до $(1\,000/L_0)$ млн⁻¹ (в абсолютном виде соответствует деформациям от 1 до 10^6 мкм) и пределами погрешности от 0,6 мкм до 2 %.

Приведенный в проекте поверочной схемы способ нормирования метрологических характеристик актуален для общей классификации

и позволяет однозначно определить при поверке/калибровке характеристики эталонов, обеспечивающие необходимый запас по точности. Также учитывает минимальные значения показателей точности средства измерений при передаче единицы от установленного эталона предусмотренными методами.

Стоит отметить: данный способ не всегда может быть удобным при выборе экстензометра для поставленной задачи, где известны начальные расчетные длины при испытаниях и требуемая точность результата измерений. Для поверочной схемы принята единица физической величины деформации – миллионная доля, млн⁻¹ (за рубежом microstrain, $\mu\epsilon$, также на практике используется %). Диапазоны и погрешности тензокалибраторов и тензометров представлены в виде функции от базовой длины (L_0 , м) и деформации (ϵ , млн⁻¹)

$$\Delta = \begin{cases} \Delta, \epsilon < \frac{\Delta}{\Delta_0 \cdot L_0}; \\ \Delta_0, \epsilon \geq \frac{\Delta}{\Delta_0 \cdot L_0}; \end{cases} \rightarrow \Delta = \max(k \cdot \epsilon; \Delta \epsilon / L_0). \quad (4)$$

Например, характеристика погрешности экстензометра с пределами абсолютной погрешности $\pm 1,5$ мкм в диапазоне от наименьшего предела измерений до 0,3 мм и относительной погрешности $\pm 0,5$ % в диапазоне измерений свыше 0,3 мм до верхнего предела измерений представлена как $\Delta = \max(0,005 \cdot \epsilon; 1,5/L_0)$ млн⁻¹.

С точки зрения экономической целесообразности в схеме предусмотрено 3 разряда эталонов и соответствующее число ступеней поверочной схемы. Разделение по точности экстензометров и тензокалибраторов аналогично применяемому в ISO 9513, что позволяет однозначно установить класс экстензометра независимо от базовой длины, которая может быть различна при использовании одного и того же экстензометра.

Текстовая часть проекта поверочной схемы содержит также технические требования для средств измерений, применяемых в качестве эталонов, – тензокалибраторов: соосности и характеру движения подвижного штока, жесткости. К сожалению, в рамках документа на поверочную схему невозможно предусмотреть требования к средствам

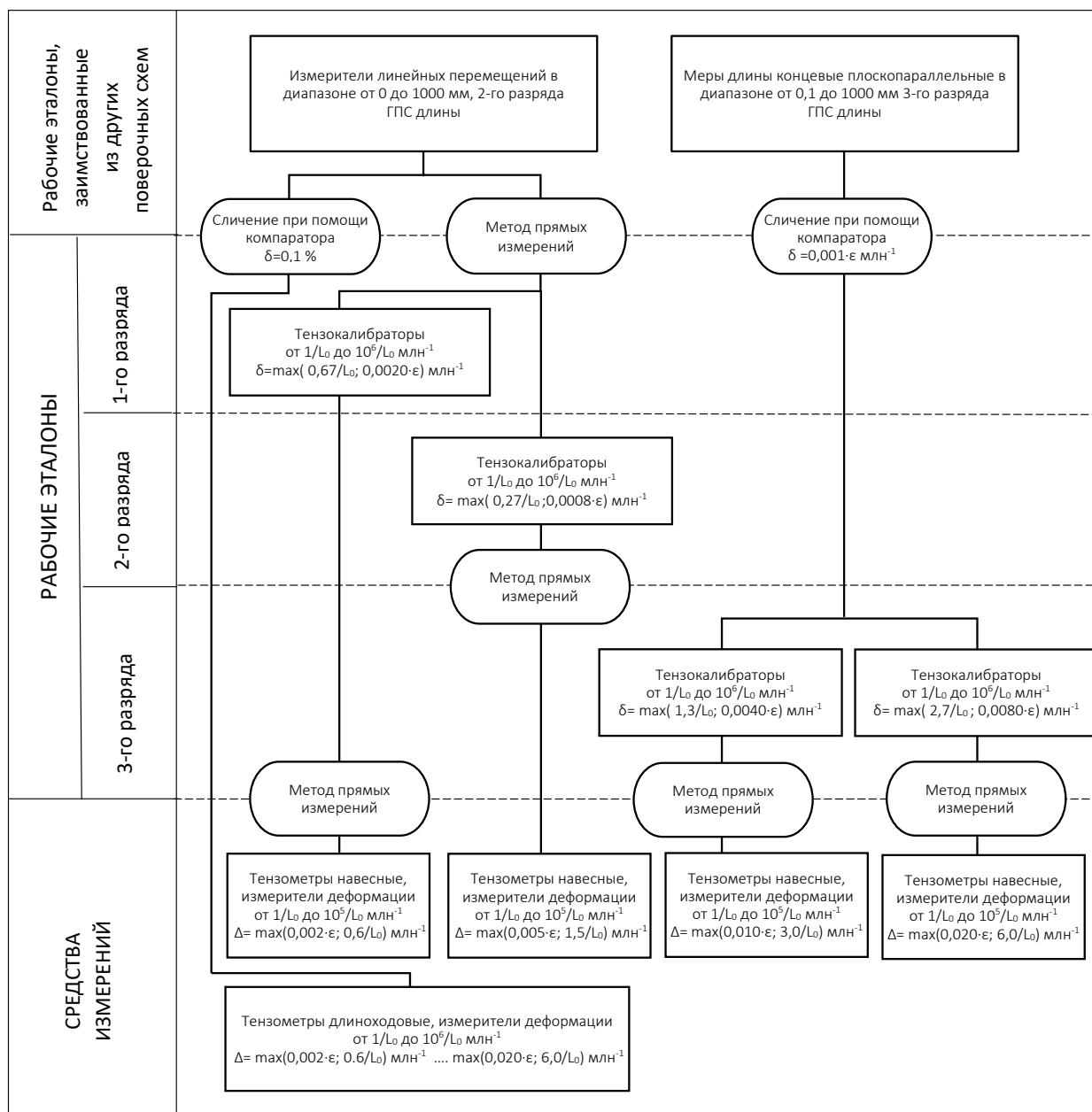


Рис. 5. Обеспечение прослеживаемости тензометров в соответствии с вновь разрабатываемой схемой

Fig. 5. Ensuring traceability of strain gauges in accordance with the newly developed schedule

измерений – составляющим погрешности измерений деформации, обусловленным погрешностью измерений базовой длины, соосностью, пространственным положением экстензометра, ценой наименьшего разряда отсчетного устройства – в виду их многообразия. Большинство применяемых при одноосных испытаниях методик поверки утвержденных типов измерителей перемещений (деформации) не содержит

операций определения вышеуказанных составляющих погрешности экстензометров, не учитывает конструктивные особенности, связанные с подвижностью ножей экстензометра относительно точек отсчета (случай, когда при деформации образца перемещаются обе пары ножей, и в зависимости от конструкции экстензометра результат измерений может быть итогом аддитивных операций относительно

значений перемещений каждой пары ножей). Таким образом, наряду с разработкой и внедрением поверочной схемы для средств измерений деформации актуальной является разработка типовой методики поверки (калибровки) экстензометров.

Целью данного исследования являлась разработка поверочной схемы для средств измерений деформации. С этой целью рассмотрены теоретические и практические вопросы измерений деформации, оценки погрешностей, определены эталоны и методы определения значений метрологических характеристик.

Заключение

Разработан проект поверочной схемы для средств измерений деформации, определяющий единый подход к способу выражения допускаемых значений погрешности, с учетом:

- применяемой меры деформации и соответствующей модели материала при одноосных испытаниях;
- обзора требований к характеристикам средств измерений деформации, приведенных в отечественных и зарубежных стандартах;

– выбора в качестве опорных принципов классификации, принятой в ISO 9513;

– требований к единицам величин и способам выражения допускаемых значений погрешности в единицах, принятых для измерений механической деформации.

Характеристики предусмотренных проектом поверочной схемы экстензометров и их соотношение с нормируемыми в стандартах ISO и ASTM приведены в табл. 2.

Ожидается, что результаты представленной в статье работы внесут вклад в дискуссию о форме представления характеристик и содержании поверочной схемы для средств измерений деформации. Полученные результаты могут быть полезны при определении технических и метрологических характеристик первичных преобразователей деформации при испытаниях, калибровке и поверке.

Благодарности: Автор выражает свою признательность заведующему отделом метрологии механических и геометрических величин и характеристик УНИИМ – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

Таблица 2. Экстензометры, предусмотренные проектом поверочной схемы

Table 2. Extensometers provided for by the design of the verification schedule

Пределы допускаемых абсолютных погрешностей (согласно поверочной схеме), млн ⁻¹	Относительная погрешность определения начальной расчетной длины, %	Разрешающая способность*			Допускаемая погрешность*			Соответствие зарубежным стандартам
		$(r/l_i) \cdot 100, \%$	$r, \text{мкм}$	$(l_i/L) \text{ мм/мм}$	$q_{rv}, \%$	$(l_i - l_{tr}), \text{мкм}$	$(l_i/L) \text{ мм/мм}$	
$\max(0,002 \cdot \varepsilon; 0,6/L_0)$	$\pm 0,2$	0,05	0,2	$0,02/L_0$	$\pm 0,2$	$\pm 0,6$	$\pm 0,6/L_0$	Класс 0,2 ISO 9513
$\max(0,005 \cdot \varepsilon; 1,5/L_0)$	$\pm 0,5$	0,25	0,5	$0,05/L_0$	$\pm 0,5$	$\pm 1,5$	$\pm 1,5/L_0$	Класс 0,5 ISO 9513 Класс B-1 ASTM E83 ($L_0 \leq 0,015$) Класс B-2 ASTM E83 ($L_0 \leq 0,0075$)
$\max(0,010 \cdot \varepsilon; 3,0/L_0)$	$\pm 1,0$	0,5	1,0	$0,1/L_0$	$\pm 1,0$	$\pm 3,0$	$\pm 3,0/L_0$	Класс 1 ISO 9513 Класс C ASTM E83 ($L_0 \leq 0,003$) Классы C, D, E ASTM E83 в части диапазона свыше $0,1 L_0, L_0, 10 L_0, \text{мм}$, соответственно
$\max(0,020 \cdot \varepsilon; 6,0/L_0)$	$\pm 2,0$	1,0	2,0	$0,2/L_0$	$\pm 2,0$	$\pm 6,0$	$\pm 6,0/L_0$	Класс 2 ISO 9513

* Что больше, где L_0 – начальная расчетная (базовая) длина, м.

В. В. Толмачеву, а также рецензентам за ценные замечания, касающиеся изложения методологических подходов к оцениванию вкладов в неопределенность измерений.

Acknowledgments: The author expresses her gratitude to Vladimir V. Tolmachev, Head of the Department of Metrology of Mechanical and Geometric Quantities and Characteristics of the UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, and also to the reviewers for valuable comments concerning the presentation of methodological approaches to assessing contributions to measurement uncertainty.

Вклад автора: Автор подтверждает единичную ответственность за следующее: сбор данных, анализ и интерпретацию результатов, а также подготовку рукописи.

Contribution of the author: The author confirms sole responsibility for the following: data collection, analysis and interpretation of results, and manuscript preparation.

Конфликт интересов: Работа выполнена в рамках диссертационного исследования

«Метрологическое обеспечение измерений механической деформации в диапазоне от $-5\,000$ до $5\,000$ млн⁻¹». Научный консультант: Толмачев В. В., канд. физ.-мат. наук, заведующий отделом метрологии механических и геометрических величин и характеристик УНИИМ – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

Conflict of interest: The work was carried out within the framework of the dissertation research «Metrological support for measurements of mechanical deformation in the range from -5000 to 5000 ppm». Scientific consultant: Vladimir V. Tolmachev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Department of Metrology of Mechanical and Geometric Quantities and Characteristics, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology.

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

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Адамов А. А., Лантев М. Ю., Горишкова Е. Г. Анализ отечественной и зарубежной нормативной базы по механическим испытаниям полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2012. № 3. С. 72–77.
2. Углепластики: технология получения и определение механических характеристик / В. Н. Манхиров [и др.] // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2019. № 2–3. С. 12–19. <https://doi.org/10.18101/2306-2363-2019-2-3-12-19>
3. A viscoplastic self-consistent analysis of tensile anisotropy and tension-compression asymmetry in rare-earth magnesium alloy / X. Zhang [et al.] // Journal of Rare Earths. 2024. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jre.2024.04.024> (дата обращения: 30.04.2024).
4. Tensile and micro-compression behaviour of AISI 316L austenitic stainless steel single crystals at 20 °C and 300 °C: Experiments, modelling and simulations / J.-M. Scherer [et al.] // Materials Science and Engineering: A. 2024. Vol. 900. P. 146471. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146471>
5. Experiment research on tensile and compression cyclic loading of sheet metal / Q. Li [et al.] // Procedia Engineering. 2017. Vol. 207. P. 1916–1921. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.961>
6. Effects of hot compression on the fracture toughness and tensile creep behaviors of a Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy / G. Zhao [et al.] // Materials Science and Engineering: A. 2022. Vol. 834. P. 142626. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142626>
7. Investigating deformation and work hardening behaviour of stacked sheet metal specimens in compression test: Influence of friction and interfacial shear resistance / Y. An [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. 2023. Vol. 321. P. 118145. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118145>
8. Радченко С. Ю., Дорохов Д. О. Новая форма представления меры линейной деформации // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. № 2. С. 446–457.
9. Rees D. Basic engineering plasticity: an introduction with engineering and manufacturing applications. Oxford : Elsevier Ltd, 2006. 528 p.

10. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации / Я. Е. Бейгельзимер [и др.]. Донецк : Фирма ТЕАН, 2003. 87 с.
11. Данилов М. Н., Бардаев П. П. Метод измерения деформаций структурно-неоднородных сред // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2019 : Материалы IX Всероссийской молодежной научной конференции, Томск, 18–20 ноября 2019 г. / Под редакцией М. Ю. Орлова. Томск : Издательство «Красное знамя», 2020. С. 84–88.
12. Motra H. B., Hildebrand J., Dimmig-Osburg A. Assessment of strain measurement techniques to characterise mechanical properties of structural steel // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2014. Vol. 17, Iss. 4. P. 260–269. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2014.07.006>
13. Advanced self-compensated, high-accuracy optical extensometer based on field-of-view splitting and dual-reflector imaging techniques / F. Zhu [et al.] // Measurement. 2021. Vol. 174. P. 109024. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109024>
14. The effects of the temperature in the testing system on the measurements of thermal rock strain with clip-on extensometers / L. Pei [et al.] // Measurement. 2022. Vol. 188. P. 110375. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110375>
15. Третьякова Т. В., Третьяков М. П., Вильдеман В. Э. Оценка точности измерений с использованием видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций // Вестник ПНИПУ. Механика. 2011. № 2. С. 92–100.
16. Метрологическая прослеживаемость результатов испытаний / В. Г. Кутяйкин [и др.] // Компетентность. 2020. № 7. С. 30–36.
17. Толмачев В. В., Матвеева И. Н. Современное состояние метрологического обеспечения испытаний на статическое растяжение // Эталоны. Стандартные образцы. 2022. Т. 18, № 1. С. 51–67. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-1-51-67>
18. Жагора Н. А., Астафьева Л. Е., Макаревич В. Б. Метрологическая прослеживаемость // Контроль качества продукции. 2016. № 4. С. 21–28.
19. Шимолин Ю. Р., Трибушевская Л. А. Современные тенденции развития метрологического обеспечения измерений деформации // Законодательная и прикладная метрология. 2018. № 6 (157). С. 23–25.
20. Calibration of a speckle interferometry full-field strain measurement system / M. Whelan [et al.] // Blackwell publishing. 2008. STRAIN44. P. 180–190. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC47650>
21. Дринке М. Выбор подходящих экстензометров для испытания любых материалов // Металлургическое производство и технология металлургических процессов. 2009. № 1. С. 42–47. https://rudmet.net/media/articles/Article_MPT_01_09_pp.42-47.pdf
22. Артемьев М. И., Тимов В. Н. Современное оборудование для испытаний материалов, работающих в условиях температурно-силового нагружения и в вакууме // ТестМат : Сборник докладов VI Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов, Москва, 12–13 февраля 2015 г. / М. : ФГУП ВИАМ, 2015. 50 с.
23. Tabin J. Strain measurement by means of clip-on extensometers during discontinuous plastic flow at 4 K // Cryogenics. 2022. Vol. 123. P. 103451. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2022.103451>
24. Gangwar V., K Acharyya S., Banerjee A. Calibration of tensile tests in drop-weight impact machine and implementation in simulation of Charpy impact tests // Procedia Structural Integrity. 2024. Vol. 60. P. 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.05.035>
25. Червяковская Н. Н., Соломахо В. Л. Методика разработки рабочих поверочных схем для средств измерений // Наука и техника. 2007. № 3. С. 29–33.

REFERENCES

1. Adamov A. A., Laptev M. Yu., Gorshkova E. G. Analysis of the international and russian federation national technical standards for mechanical tests of polymeric composite materials. *Konstrukcii iz kompozicionnyh materialov*. 2012;3:72–77. (In Russ.).
2. Mankhirov M. N., Nomoev A. V., Syzrantsev V. V., Ayurova O. Zh. Carbon plastic: technology of production and determination of mechanical characteristics. *Buryat state University Vestnik. Chemistry. Physics*. 2019;2–3:12–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.18101/2306-2363-2019-2-3-12-19>
3. Zhang X., Zhou R., Guo S., Li Ch., Yue H., Li D. A viscoplastic self-consistent analysis of tensile anisotropy and tension-compression asymmetry in rare-earth magnesium alloy. *Journal of Rare Earths*. 2024. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jre.2024.04.024> [Accessed 30 April 2024].
4. Scherer J.-M., Hure J., Madec R., Le Bourdais Fl., van Brutzel L., Sao-Joao S. et al. Tensile and micro-compression behaviour of AISI 316L austenitic stainless steel single crystals at 20 °C and 300 °C: Experiments, modelling and simulations. *Materials Science and Engineering: A*. 2024;900:146471. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146471>
5. Li Q., Jin M., Zou Z., Zhao Sh., Zhang Q., Li P. Experiment research on tensile and compression cyclic loading of sheet metal. *Procedia Engineering*. 2017;207:1916–1921. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.961>
6. Zhao G., Zhang Zh., Zhang Yu., Peng H., Yang Zh., Nagaumi H. et al. Effects of hot compression on the fracture toughness and tensile creep behaviors of a Mg-Gd-Y-Zn alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2022;834:142626. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142626>

7. An Yu., Spanjer W., Chezan T., Heijne J. Investigating deformation and work hardening behaviour of stacked sheet metal specimens in compression test: Influence of friction and interfacial shear resistance. *Journal of Materials Processing Technology*. 2023;321:118145. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118145>
8. Radchenko S. J., Dorokhov D. O. The new form representation of the measure of linear deformation. *Izvestiya Tula State University*. 2011;2:446–457. (In Russ.).
9. Rees D. Basic Engineering Plasticity: An Introduction with Engineering and Manufacturing Applications. Oxford: Elsevier Ltd; 2006. 528 p.
10. Beygelzimer Y., Varyukhin V., Orlov D., Synkov S. Twist extrusion – process for deformation accumulation. Doneczk : Firma TEAN; 2003. 87 p. (In Russ.).
11. Danilov M., Bardaev P. Strain measurement method of heterogeneous materials. In: *Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics – 2019 : The conference proceedings IXth International Youth Scientific Conference*, 18–20 November 2019, Tomsk, Russia. Ed. M. Yu. Orlov. Tomsk: Izdatelstvo «Krasnoe znamya»; 2020. 340 p. (In Russ.).
12. Motra H. B., Hildebrand J., Dimmig-Osburg A. Assessment of strain measurement techniques to characterise mechanical properties of structural steel. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2014;17(4):260–269. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2014.07.006>
13. Zhu F., Tao J., Lu R., Bai P., Lei D. Advanced self-compensated, high-accuracy optical extensometer based on field-of-view splitting and dual-reflector imaging techniques. *Measurement*. 2021;174:109024. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109024>
14. Pei L., Blöcher G., Wang Y. J., Milsch H., Zimmermann G., Huenges E. et al. The effects of the temperature in the testing system on the measurements of thermal rock strain with clip-on extensometers. *Measurement*. 2022;188:110375. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110375>
15. Tretyakova T. V., Tretyakov M. P., Vildeman V. E. Assessment of measurement accuracy using video system for analysis of displacement and deformation fields. *Perm State Technical University. Mechanics*. 2011;2:92–100. (In Russ.).
16. Kutayaykin V. G., Gorbachev P. A., Geyger E. Yu., Savrovskiy K. K. Metrological traceability of test results. *Competency (Russia)*. 2020;7:30–36. (In Russ.).
17. Tolmachev V. V., Matveeva I. N. The current state of metrological support for static tension. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2022;18(1):51–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-1-51-67>
18. Zhagora N. A., Astafyeva L. E., Makarevich V. B. Metrologicheskaya proslezhivaemost'. *Kontrol' kachestva produkcii*. 2016;4:21–28. (In Russ.).
19. Shimolin Yu. R., Tribushevskaya L. A. Modern trends in the development of metrological support of deformation measurements. *Legal and applied metrology*. 2018;6(157):23–25. (In Russ.).
20. Whelan M., Albrecht D., Hack E., Patterson E. Calibration of a speckle interferometry full-field strain measurement system. *Blackwell publishing*. 2008;44:180–190. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC47650>
21. Dripke M. Selection of suitable extensometers for testing all materials. *Metallurgicheskoe proizvodstvo i texnologiya metallurgicheskix processov*. 2009;1:42–47. (In Russ.). https://rudmet.net/media/articles/Article_MPT_01_09_pp.42-47.pdf
22. Artemyev M. I., Titov V. N. Modern equipment for testing materials working under temperature-force loading and in vacuum conditions. In: *TestMat: Proceedings of the VI All-Russian conference on testing and research of material properties*, 12–13 February 2015, Moscow. Moscow: The national research center «kurchatov institute» federal state unitary enterprise all-russian scientific research institute of aviation materials; 2015. 50 p. (In Russ.).
23. Tabin J. Strain measurement by means of clip-on extensometers during discontinuous plastic flow at 4 K. *Cryogenics*. 2022;123:103451. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2022.103451>
24. Gangwar V., K Acharyya S., Banerjee A. Calibration of tensile tests in drop-weight impact machine and implementation in simulation of Charpy impact tests. *Procedia Structural Integrity*. 2024;60:123–135. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.05.035>
25. Chervyakovskaya N. N., Solomakho V. L. Methodology for elaboration of working verifying schemes for measuring tools. *Science and technique*. 2007;3:29–33. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Lydia A. Tribushevskaya – Acting Head of the Laboratory of Metrology of Force, Mass and Linear-Angular Magnitudes, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology
4 Krasnoarmeyskaya st., Yekaterinburg, 620075, Russia
e-mail: form233@uniim.ru
Researcher ID: ABI-7037–2020