

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Научная статья

УДК 620.172/.178.2/531.7.08(006.91)

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-1-53-71>



Разработка методик измерений характеристик пластичности сталей при испытании на статическое растяжение

И. Н. Матвеева  

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

Аннотация: Статья знакомит с разработкой методик измерений характеристик пластичности сталей при испытании на статическое растяжение – относительного удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва.

Работа имела масштабную цель. Проанализировать бюджеты неопределенности измерений относительного удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва, определяемых при испытании на статическое растяжение. Оптимизировать параметры измерений, связанных с подготовкой образцов, методическими факторами. Оценить вклады в бюджеты неопределенности измерений в процессе разработки методик измерений. Разработать методики измерений относительного удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва, предназначенных для оценки правильности результатов измерений, полученных с использованием стандартных методик измерений этих же величин по ГОСТ 1497–2023 «Металлы. Методы испытаний на растяжение».

При достижении цели проведены теоретические и экспериментальные исследования для составления бюджетов неопределенностей измерений относительного удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва с указанием выявленных источников неопределенности. Рассчитаны метрологические характеристики методик измерений.

В результате разработаны и аттестованы две предназначенные для проведения испытаний в целях утверждения типа стандартных образцов методики измерений характеристик пластичности сталей на микроскопе видеоизмерительном, обеспечивающие запас точности по сравнению со стандартизированной методикой измерений по ГОСТ 1497–2023.

Ключевые слова: пластичность, относительное удлинение после разрыва, относительное сужение после разрыва, статическое растяжение, неопределенность измерений

Ссылка при цитировании: *Матвеева И. Н.* Разработка методик измерений характеристик пластичности сталей при испытании на статическое растяжение // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 1. С. 53–71. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-1-53-71>.

Статья поступила в редакцию 12.12.2024; одобрена после рецензирования 26.02.2024; принята к публикации 25.03.2025.

Development of Methods for Measuring the Characteristics of Steel Ductility During Static Tensile Testing

Ilona N. Matveeva  

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

Abstract: The article is devoted to the development of methods for measuring the characteristics of the steel ductility during static tensile testing – relative elongation and relative contraction after rupture.

The objectives of the work were to analyze the uncertainty budgets of measurements of relative elongation and relative contraction after rupture determined during static tensile testing, optimize the measurement parameters associated with sample preparation using methodological factors, assess the contributions to the measurement uncertainty budgets during the development of measurement methods, and develop methods for measuring relative elongation and relative contraction after rupture intended to assess the accuracy of measurement results obtained using standard methods for measuring the same quantities according to GOST 1497–2023 «Metals. Tensile test methods».

In the course of the work, theoretical and experimental studies were carried out to compile uncertainty budgets for measurements of relative elongation and relative contraction after rupture, indicating the identified sources of uncertainty. Metrological characteristics of measurement methods were calculated.

As a result of the study, two methods for measuring the characteristics of steel ductility using a video measuring microscope were developed and certified, providing a margin of accuracy compared to the standardized measurement method according to GOST 1497–2023, intended for testing for the purpose of approving the type of reference materials.

Keywords: ductility, relative elongation after rupture, relative reduction after rupture, static tension, measurement uncertainty

For citation: Matveeva I. N. Development of methods for measuring the characteristics of steel ductility during static tensile testing. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025;21(1):53–71. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-1-53-71>.

The article was submitted 12.12.2024; approved after reviewing 26.02.2024; accepted for publication 25.03.2025.

Введение

Пластичность металла характеризует его способность подвергаться пластической деформации без разрушения при действии внешних сил. Чем выше пластичность металла, тем меньше необходимо усилий и затрат для придания ему необходимой конфигурации, что определяет его конкурентные преимущества при выборе материала для изготовления изделий различного назначения.

Характеристики пластичности металлов включают:

а) *относительное удлинение после разрыва* – относительное увеличение длины образца металла в процессе его растяжения, один из наиболее важных показателей пластичности, так как является мерой оценки растяжимости металла перед разрывом;

б) *относительное сужение после разрыва* – относительное изменение площади поперечного сечения образца металла, происходящее в процессе его растяжения. Чем меньше площадь поперечного сечения образца металла в месте разрыва, тем более пластичен металл.

Точность измерений относительного удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва может предопределить выбор металла в качестве сырья для решения конкретной задачи или при оценке качества изделий из металла. Обычно чем больше относительное сужение, тем более пластичен металл. Однако следует учитывать, что образцы, из которых было выполнено испытание на разрыв, могут не полностью отражать реальное поведение металла в условиях эксплуатации. Реальное поведение металла в условиях эксплуатации может отличаться от поведения металла в образцах, на которых было выполнено испытание на статическое растяжение, поэтому относительное сужение образцов не всегда полностью отражает пластические свойства металла. В реальных условиях эксплуатации на пластические свойства металла может влиять совокупность факторов, таких как условия нагружения, температура и скорость деформации. Однако измерение относительного удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва является важным методом определения пластичности металлов [1–15]. Эта характеристика пластичности часто приводится в технических спецификациях для металлов, используемых в качестве сырья для производства продукции.

Для правильной интерпретации результатов, полученных при измерении характеристик пластичности, и корректного сравнения работ целого ряда исследователей следует принимать во внимание неопределенность результата измерения – параметр, относящийся к результату измерения и характеризующий разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине согласно РМГ 29–2013¹.

На неопределенность результата измерения влияет многообразие факторов, в частности точность использованных средств измерений, неоднородность материала, из которого изготовлен образец, температура окружающей среды при испытании, калибровка оборудования, квалификация оператора и так далее, однако данные вопросы в работах [1–15] не рассматриваются.

¹ РМГ 29–2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.

Методические основы оценки неопределенности результатов испытаний металлов на статическое растяжение по ГОСТ 1497–2023² приведены в работах [16–18]. Представлены различные варианты и примеры расчета неопределенности результатов определения прочностных и пластических характеристик металлов при испытаниях цилиндрических образцов. Отмечено [17], что оценивание неопределенности измерений при испытании на статическое растяжение является достаточно трудоемкой работой, поэтому анализ влияющих факторов и составление бюджета неопределенности измерений является актуальной задачей.

Типичной ошибкой в [16–18] при оценивании неопределенностей входящих величин является использование только метрологических характеристик средств измерений без учета характеристик влияющих величин, определяющих условия измерений, в частности, условия применения средств измерений, а также без учета характеристик объекта измерений, влияющих на неопределенность измерений.

Целью работы является:

- а) анализ бюджетов неопределенности измерений относительного удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва, определяемых при испытании на статическое растяжение;
- б) оптимизация параметров измерений, связанных с подготовкой образцов и методическими факторами;
- в) оценка вкладов в бюджеты неопределенности измерений в процессе разработки методик измерений;
- г) разработка методик измерений относительного удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва.

Материалы и методы

Описание метода измерений и оборудования

В основу методик измерений был положен стандартный метод испытаний по ГОСТ 1497–2023 – одноосное статическое растяжение с нормированной скоростью

² ГОСТ 1497–2023 Металлы. Методы испытаний на растяжение.

нагружения в упругой области (метод Б по ГОСТ 1497–2023).

Сущность положенного в основу методик измерений метода измерений заключается в измерении с помощью микроскопа видеоизмерительного геометрических характеристик образцов сталей до и после разрыва при испытании на статическое растяжение и последующем вычислении относительного удлинения после разрыва, относительного сужения площади поперечного сечения после разрыва.

При проведении измерений использовался микроскоп видеоизмерительный – эталон 4-го разряда в соответствии с Государственной поверочной схемой³.

Вспомогательное оборудование для создания нагрузки до разрыва включало измерительный прецизионный комплекс ИПК 100/200.

Относительное удлинение после разрыва рассчитывается по формуле

$$\delta_s = \left(\frac{l_k - l_0}{l_0} \right) \cdot 100, \quad (1)$$

где l_0 – начальная расчетная длина образца, мм; l_k – конечная расчетная длина образца, мм.

Относительное сужение после разрыва рассчитывается по формуле

$$\psi = \frac{(F_0 - F_k)}{F_0} \cdot 100, \quad (2)$$

где F_0 – начальная площадь поперечного сечения образца, мм², вычисляемая по формуле

$$F_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}, \quad (3)$$

где d_0 – наименьшее из измеренных значение начального диаметра образца, мм; F_k – площадь поперечного сечения образца после разрыва, мм², вычисляемая по формуле

$$F_k = \frac{\pi d_k d_{\Pi}}{4}, \quad (4)$$

где d_k – минимальный диаметр в месте разрыва, мм; d_{Π} – диаметр в месте разрыва в перпендикулярном направлении, мм.

³ Государственная поверочная схема 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.

С учетом формул (3) и (4) формула (2) преобразуется к виду

$$\psi = \frac{(d_0^2 - d_k \cdot d_{\Pi})}{d_0^2} \cdot 100 = \left(1 - \frac{d_k \cdot d_{\Pi}}{d_0^2} \right) \cdot 100. \quad (5)$$

Порядок подготовки образцов

В качестве образцов для исследования при разработке методик измерений относительно удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва взяты:

- цилиндрические образцы диаметром 8,0 мм, начальной расчетной длиной 40,0 мм, изготовленные из коррозионно-стойкой стали;
- цилиндрические образцы диаметром 10,0 мм, начальной расчетной длиной 50,0 мм, изготовленные из конструкционной стали повышенной обрабатываемости.

В качестве источников неопределенности, связанных с подготовкой образцов, при определении относительного удлинения после разрыва выделены:

- отклонение от параллельности меток начальной расчетной длины, обусловленное качеством нанесения меток начальной расчетной длины;
- отклонение от прямолинейности меток начальной расчетной длины при измерении на микроскопе видеоизмерительном, обусловленное качеством нанесения меток начальной расчетной длины и разбросом точек края метки на микроскопе видеоизмерительном при построении линии края метки (рис. 1).

В качестве связанного с подготовкой образцов источника неопределенности при определении относительного сужения после разрыва выделено:

- отклонение от параллельности контуров теневого изображения при измерении начального диаметра на микроскопе видеоизмерительном, обусловленное качеством изготовления образца;
- отклонение от прямолинейности контура теневого изображения образца при измерении начального диаметра на микроскопе видеоизмерительном, обусловленное качеством подготовки поверхности образца.

Оценивание неопределенности измерений начальной расчетной длины, обусловленной отклонением от параллельности меток

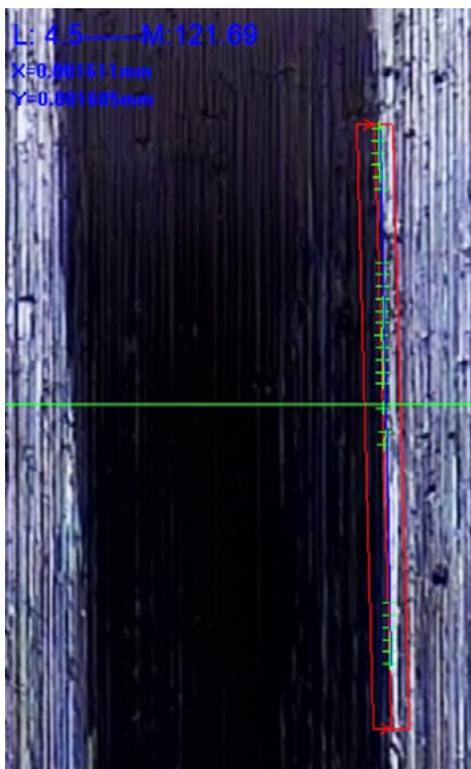


Рис. 1. Построение линии края метки

Fig. 1. Construction of the edge line of the mark

начальной расчетной длины, проводилось с помощью дисперсионного анализа (ANOVA) для двухфакторного плана с повторениями в соответствии с ГОСТ Р 50779.84–2018⁴ и обрабатывалось регрессионным анализом с помощью пакета анализа Microsoft Excel. В качестве факторов влияния рассматривались идентификация меток на микроскопе видеоизмерительном и нанесение меток начальной расчетной длины.

Оценивание неопределенности измерений начального диаметра, обусловленной отклонением от параллельности контуров теневого изображения при измерении начального диаметра на микроскопе видеоизмерительном, также проводилось с помощью ANOVA для двухфакторного плана, но с одним фиксированным фактором, с повторениями. В качестве факторов влияния рассматривались идентификация контуров теневого изображения на микроскопе видеоизмерительном и вариация

⁴ ГОСТ Р 50779.84–2018 Статистические методы. Оценка неопределенности результатов перекрестного двухфакторного эксперимента.

образцов. При этом принималось, что второй фактор (образцы) имеет фиксированный уровень, и при расчете неопределенности его вариация не учитывалась.

Допускаемые значения отклонения от прямолинейности меток начальной расчетной длины, отклонения от прямолинейности контура теневого изображения образца при измерении начального диаметра для их нормирования в методиках измерений и для оценки их вкладов в бюджеты неопределенности методик измерений были установлены по результатам экспериментальных исследований.

Выбор параметров испытаний

При выборе параметров измерений были учтены режимы измерений (скорость нагружения), установленные в ГОСТ 1497–2023.

Неопределенность измерений конечной расчетной длины при определении относительного удлинения после разрыва, обусловленная скоростью нагружения, оценена по результатам анализа влияния скорости нагружения на удлинение после разрыва.

Для исследования влияния скорости нагружения на результаты измерений дополнительно использовались образцы диаметром 6,0 мм, начальной расчетной длиной 30,0 мм из коррозионно-стойкой стали.

По результатам экспериментальных исследований с различными скоростями нагружения установлены линейные зависимости удлинения после разрыва от скорости нагружения (см. ниже):

рис. 2 – для образцов начальным диаметром 6,0 мм, начальной расчетной длиной 30,0 мм;

рис. 3 – для образцов начальным диаметром 8,0 мм, начальной расчетной длиной 40,0 мм;

рис. 4 – для образцов начальным диаметром 10,0 мм, начальной расчетной длиной 50,0 мм.

По результатам экспериментальных исследований для оценивания вклада в бюджет неопределенности, обусловленного скоростью нагружения, использована линейная зависимость, имеющая наибольший угловой коэффициент линии регрессии 0,0486 мм/(Н/(мм²·с)) (рис. 2).

Т. к. значение средней (оптимальной) скорости нагружения находится в интервале от $v_{min} = 3$ Н/(мм²·с) – минимального значения

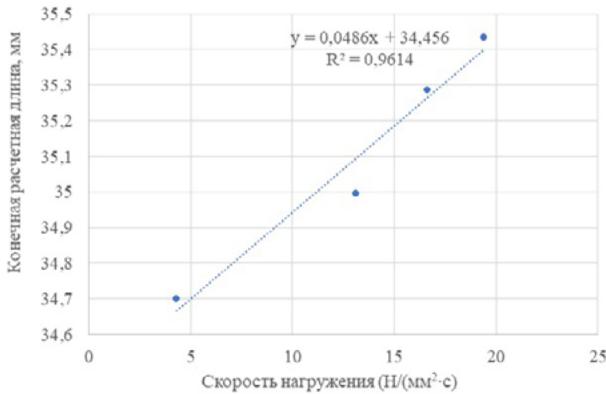


Рис. 2. Зависимость удлинения после разрыва (мм) от скорости нагружения (Н/(мм²·с)) (образцы начальным диаметром 6,0 мм, начальной расчетной длиной 30,0 мм)

Fig. 2. Dependence of elongation after rupture (mm) on loading rate (N/(mm²·s)) (samples with an initial diameter of 6.0 mm and an initial estimated length of 30.0 mm)

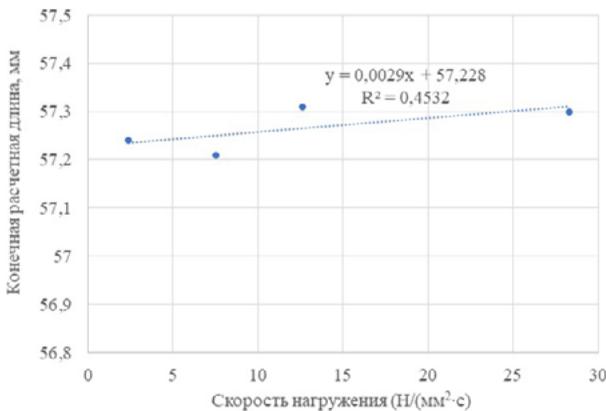


Рис. 4. Зависимость удлинения после разрыва (мм) от скорости нагружения (Н/(мм²·с)) (образцы начальным диаметром 10,0 мм, начальной расчетной длиной 50,0 мм)

Fig. 4. Dependence of elongation after rupture (mm) on loading rate (N/(mm²·s)) (samples with an initial diameter of 10.0 mm and an initial estimated length of 50.0 mm)

скорости нагружения в соответствии с методикой измерений до $v_{max} = 4 \text{ Н/(мм}^2 \cdot \text{с)}$ – максимального значения скорости нагружения в соответствии с методикой измерений, то вклад от неопределенности измерений конечной расчетной длины u_v , мм, обусловленной скоростью нагружения, оценен с учетом углового коэффициента линии регрессии $0,0486 \text{ мм/(Н/(мм}^2 \cdot \text{с))}$ (рис. 2) по формуле

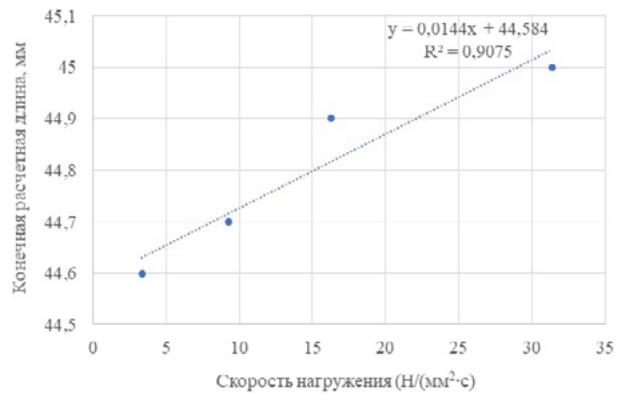


Рис. 3. Зависимость удлинения после разрыва (мм) от скорости нагружения (Н/(мм²·с)) (образцы начальным диаметром 8,0 мм, начальной расчетной длиной 40,0 мм)

Fig. 3. Dependence of elongation after rupture (mm) on loading rate (N/(mm²·s)) (samples with an initial diameter of 8.0 mm and an initial estimated length of 40.0 mm)

$$u_v = \frac{0,0486 \cdot (v_{max} - v_{min})}{\sqrt{12}} \quad (6)$$

Т. к. $v_{max} - v_{min} = 4 - 3 = 1 \text{ Н/(мм}^2 \cdot \text{с)}$, то формула (6) для оценки вклада от неопределенности измерений конечной расчетной длины u_v , мм, обусловленной скоростью нагружения, преобразована к виду

$$u_v = \frac{0,0486}{\sqrt{12}} \quad (7)$$

Относительное удлинение образца после разрыва δ , выражаемое в относительных единицах, и площадь его поперечного сечения F_k , соответствующая этому удлинению, связаны между собой формулой⁵

$$F_k = \frac{F_0}{(1 + \delta)} \quad (8)$$

Подставляя формулы (1), (3) и (4) в формулу (8) и учитывая, что диаметр образца в месте разрыва d есть среднее геометрическое значение d_k и d_p , получаем следующую зависимость диаметра образца в месте разрыва d от скорости нагружения:

⁵ Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. 2-е изд., перераб. и доп. Справочник. М.: Металлургия, 1983. 352 с.

$$d(v) = d_0 \cdot \sqrt{\frac{l_0}{l_k(v)}}, \quad (9)$$

где $l_k(v)$ – зависимость конечной расчетной длины образца от скорости нагружения (рис. 2).

Результаты расчета значений $d(v)$ приведены на рис. 5.

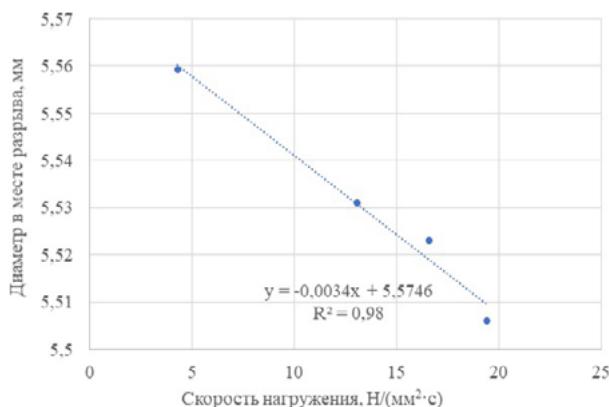


Рис. 5. Зависимость диаметра в месте разрыва (мм) от скорости нагружения (Н/(мм²·с))

Fig. 5. Dependence of the diameter at the rupture point (mm) on the loading rate (N/(mm²·s))

Для построения зависимости диаметра в месте разрыва от скорости нагружения выбраны результаты (рис. 2) как имеющие наибольшие значения коэффициента линии регрессии и, соответственно, значения стандартной неопределенности.

Вклад от неопределенности измерений диаметра в месте разрыва u_v , мм, обусловленной скоростью нагружения, оценен для значения средней (оптимальной) скорости нагружения, находящейся в интервале от $v_{min} = 3$ Н/(мм²·с) до $v_{max} = 4$ Н/(мм²·с), с учетом углового коэффициента линии регрессии 0,0034 мм/(Н/(мм²·с)) (рис. 5) по формуле

$$u_v = \frac{0,0034 \cdot (v_{max} - v_{min})}{\sqrt{12}}. \quad (10)$$

Т. к. $v_{max} - v_{min} = 4 - 3 = 1$ Н/(мм²·с), то формула (10) для оценки вклада от неопределенности измерений диаметра в месте разрыва u_v , мм, обусловленной скоростью нагружения, преобразована к виду

$$u_v = \frac{0,0034}{\sqrt{12}}. \quad (11)$$

Выбор условий проведения измерений

В соответствии со стандартным методом испытаний ГОСТ 1497–2023 температура окружающего воздуха при проведении измерений – от 10 до 35 °С.

Требования к температуре окружающего воздуха при проведении измерений по методикам измерений установлены на основании требований к условиям эксплуатации микроскопа видеоизмерительного – (20 ± 5) °С.

Исходя из требований к температуре окружающего воздуха при проведении измерений, оценены вклады в бюджеты неопределенности методик измерений, обусловленные температурным расширением металла вследствие вариации температуры окружающего воздуха при измерении начальной расчетной длины, конечной расчетной длины, начального диаметра, диаметра в месте разрыва.

Оценивание неопределенности измерений, обусловленной влиянием температуры ($u_{\Delta l}$, мм; $u_{\Delta d}$, мм), проведено на основании функциональной зависимости, описывающей взаимосвязь температуры и линейного размера (длины, диаметра) и описываемой уравнениями линейного расширения (Δl , мм; Δd , мм) соответственно:

$$\Delta l = \Delta T \cdot \alpha \cdot l, \quad (12)$$

$$\Delta d = \Delta T \cdot \alpha \cdot d, \quad (13)$$

где ΔT – отклонение фактической температуры от температуры 20 °С ($\Delta T = \pm 5$ °С); α – коэффициент температурного расширения стали (справочное значение $\alpha = 0,0000118$ °С⁻¹, значение вариации коэффициента температурного расширения принималось $\Delta\alpha = 8 \cdot 10^{-6}$ °С⁻¹); l – длина при температуре 20 °С, мм (начальная расчетная, конечная расчетная); d – диаметр при температуре 20 °С, мм (начальный диаметр, минимальный диаметр в месте разрыва, диаметр в месте разрыва в перпендикулярном направлении).

Оценивание вкладов от методических факторов

В качестве источников неопределенности, связанных с методическими факторами, при определении относительного удлинения после разрыва были выделены:

– плотность сложения разрушенных частей образца при измерении меток, ограничивающих конечную расчетную длину;

– отклонение от прямолинейности меток конечной расчетной длины при измерении на микроскопе видеоизмерительном, обусловленное разбросом точек края метки на микроскопе видеоизмерительном при построении линии края метки.

В качестве источников неопределенности, связанных с методическими факторами, при определении относительного сужения после разрыва были выделены:

– повторяемость построения контура шейки образца на микроскопе видеоизмерительном;

– отклонение от круглости контура шейки образца, обусловленное разбросом точек контура теневого изображения шейки образца на микроскопе видеоизмерительном.

Оценивание неопределенности измерений конечной расчетной длины, обусловленной плотностью сложения разрушенных частей образца, неопределенности измерений диаметра в месте разрыва, обусловленной повторяемостью построения контура шейки образца, проводилось с помощью дисперсионного анализа (ANOVA) для двухфакторного плана (с одним фиксированным фактором) с повторениями в соответствии с ГОСТ Р 50779.84–2018 и обрабатывалось регрессионным анализом с помощью пакета анализа Microsoft Excel. В качестве факторов влияния рассматривались сложение разрушенных частей образца – при измерении конечной расчетной длины, повторяемость построения контура шейки образца – при измерении диаметра в месте разрыва и вариация образцов. При этом принималось, что второй фактор (образцы) имеет фиксированный уровень и при расчете неопределенности его вариация не учитывалась.

Допускаемые значения отклонения от прямолинейности меток при измерении конечной расчетной длины, отклонения от круглости контура шейки образца при измерении диаметра в месте разрыва для их нормирования в методиках измерений и для оценки их вкладов в бюджеты неопределенности методик измерений были установлены по результатам экспериментальных исследований.

Оценивание показателей точности методик измерений

Оценивание неопределенности результатов измерений относительного удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва было выполнено с учетом источников неопределенности, представленных в виде диаграммы «причина – следствие» (рис. 6 и 7).

Бюджеты неопределенности результатов измерений относительного удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва представлены в табл. 1 и 2.

Коэффициенты чувствительности (табл. 1; 2) получены из уравнений измерения (1) и (2) соответственно, преобразованных к виду

$$\frac{l_k}{l_0} = \frac{\delta_s}{100} + 1, \quad (14)$$

$$\frac{d_k d_{\Pi}}{d_0^2} = 1 - \frac{\psi}{100}. \quad (15)$$

Вклады от различных источников в суммарную неопределенность результатов измерений представлены на рис. 8 и 9.

Качественная оценка источников неопределенности из диаграмм (рис. 8; 9) позволяет сделать следующие выводы:

1) наиболее значимые источники неопределенности при измерении относительного удлинения после разрыва связаны:

- с процессом испытаний (скоростью нагружения);
- пробоподготовкой (нанесением меток);
- процессом измерений длины образца после разрыва (плотностью сложения разрушенных частей образца);

2) наиболее значимые источники неопределенности при измерении относительного сужения после разрыва связаны:

- с пробоподготовкой (отклонением от прямолинейности контура теневого изображения образца при измерении начального диаметра, обусловленным качеством подготовки поверхности образца);

- процессом измерений минимального диаметра в месте разрыва и диаметра в месте разрыва в перпендикулярном направлении (отклонением от круглости контура шейки образца).

При оценивании суммарной стандартной неопределенности измерений для установления



Рис. 6. Источники неопределенности при определении относительного удлинения после разрыва
 Fig. 6. Sources of uncertainty in determining relative elongation after rupture



Рис. 7. Источники неопределенности при определении относительного сужения после разрыва
 Fig. 7. Sources of uncertainty in determining the relative contraction after rupture

Таблица 1. Бюджет неопределенности измерений относительного удлинения после разрыва δ_5 Table 1. Uncertainty budget for measurements of relative elongation after rupture δ_5

Источник неопределенности	Оценка неопределенности по типу А/В	Коэффициент чувствительности	Значение стандартной неопределенности	Число степеней свободы
Отклонение от параллельности меток начальной расчетной длины	A	$-\frac{\sqrt{\delta_5 + 1}}{l_0} \cdot 100$	0,013 5	29
Отклонение от прямолинейности края метки при измерении начальной расчетной длины	B		0,002 31	∞
Отклонение фактической температуры от температуры 20 °С при измерении начальной расчетной длины	B		0,001 37	∞
Коэффициент температурного расширения при измерении начальной расчетной длины	B		0,000 463	∞
Неопределенность измерений начальной расчетной длины, обусловленная погрешностью СИ	B		0,001 10	∞
Плотность сложения при измерении меток, ограничивающих конечную расчетную длину	A	$\frac{1}{l_0} \cdot 100$	0,033 6	1
Отклонение от прямолинейности края метки при измерении конечной расчетной длины	B		0,017 3	∞
Отклонение фактической температуры от температуры 20 °С при измерении конечной расчетной длины	B		0,002 38	∞
Коэффициент температурного расширения при измерении конечной расчетной длины	B		0,000 808	∞
Неопределенность измерений конечной расчетной длины, обусловленная погрешностью СИ	B		0,001 27	∞
Неопределенность измерений конечной расчетной длины, обусловленная скоростью нагружения	B		0,014 0	∞

Таблица 2. Бюджет неопределенности измерений относительного сужения после разрыва ψ Table 2. Uncertainty budget for measurements of relative contraction after rupture ψ

Источник неопределенности	Оценка неопределенности по типу А/В	Коэффициент чувствительности	Значение стандартной неопределенности	Число степеней свободы
Отклонение от параллельности контуров теневого изображения при измерении начального диаметра	А	$\frac{2\left(1-\frac{\psi}{100}\right)}{d_0} \cdot 100$	0,000 489	1
Отклонение от прямолинейности контура теневого изображения при измерении начального диаметра	В		0,011 5	∞
Отклонение фактической температуры от температуры 20 °С при измерении начального диаметра	В		0,000 274	∞
Коэффициент температурного расширения при измерении начального диаметра	В		0,000 092 8	∞
Неопределенность измерений начального диаметра, обусловленная погрешностью СИ	В		0,000 912	∞
Повторяемость построения контура шейки образца при измерении минимального диаметра в месте разрыва	А	$-\frac{\sqrt{\left(1-\frac{\psi}{100}\right)}}{d_0} \cdot 100$	0,000 724	1
Отклонение от круглости контура шейки образца при измерении минимального диаметра в месте разрыва	В		0,011 5	∞
Отклонение фактической температуры от температуры 20 °С при измерении минимального диаметра в месте разрыва	В		0,000 149	∞
Коэффициент температурного расширения при измерении минимального диаметра в месте разрыва	В		0,000 050 5	∞
Неопределенность измерений минимального диаметра в месте разрыва, обусловленная погрешностью СИ	В		0,000 891	∞
Неопределенность измерений минимального диаметра в месте разрыва, обусловленная скоростью нагружения	В		0,000 982	∞

Окончание табл. 2

End of Table 2

Источник неопределенности	Оценка неопределенности по типу А/В	Коэффициент чувствительности	Значение стандартной неопределенности	Число степеней свободы
Повторяемость построения контура шейки образца при измерении диаметра в месте разрыва в перпендикулярном направлении	А	$-\frac{\sqrt{\left(1-\frac{\psi}{100}\right)}}{d_0} \cdot 100$	0,000 727	1
Отклонение от круглости контура шейки образца при измерении диаметра в месте разрыва в перпендикулярном направлении	В		0,011 5	∞
Отклонение фактической температуры от температуры 20 °С при измерении диаметра в месте разрыва в перпендикулярном направлении	В		0,000 151	∞
Коэффициент температурного расширения при измерении диаметра в месте разрыва в перпендикулярном направлении	В		0,000 051 3	∞
Неопределенность измерений диаметра в месте разрыва в перпендикулярном направлении, обусловленная погрешностью СИ	В		0,000 892	∞
Неопределенность измерений диаметра в месте разрыва в перпендикулярном направлении, обусловленная скоростью нагружения	В		0,000 982	∞

показателей точности (расширенной неопределенности) методик измерений учтены наибольшие из полученных по результатам оценивания вклады от источников неопределенности для образцов:

– начальным диаметром 8,0 мм; начальной расчетной длиной 40,0 мм;

– начальным диаметром 10,0 мм; начальной расчетной длиной 50,0 мм.

Результаты и обсуждение

Обобщение расчетных данных

Показатели точности разработанных методик измерений относительного удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва представлены в табл. 3.

Для подтверждения высокой точности методик измерений был проведен сравнительный анализ показателей точности методик измерений и методики измерений по ГОСТ 1497–2023.

При расчете неопределенности измерений по стандартизированной методике был учтен вклад только от стандартной неопределенности смещения, оцененной по типу В на основании значений абсолютных допускаемых погрешностей измерений линейных размеров (длина, диаметр) по РД 50-98-86⁶ – 150 мкм при использовании штангенциркуля с отчетом по нониусу 0,1 мм, 5 мкм при использовании микрометра гладкого с величиной отсчета 0,01 мм.

⁶РД 50-98-86 Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм.

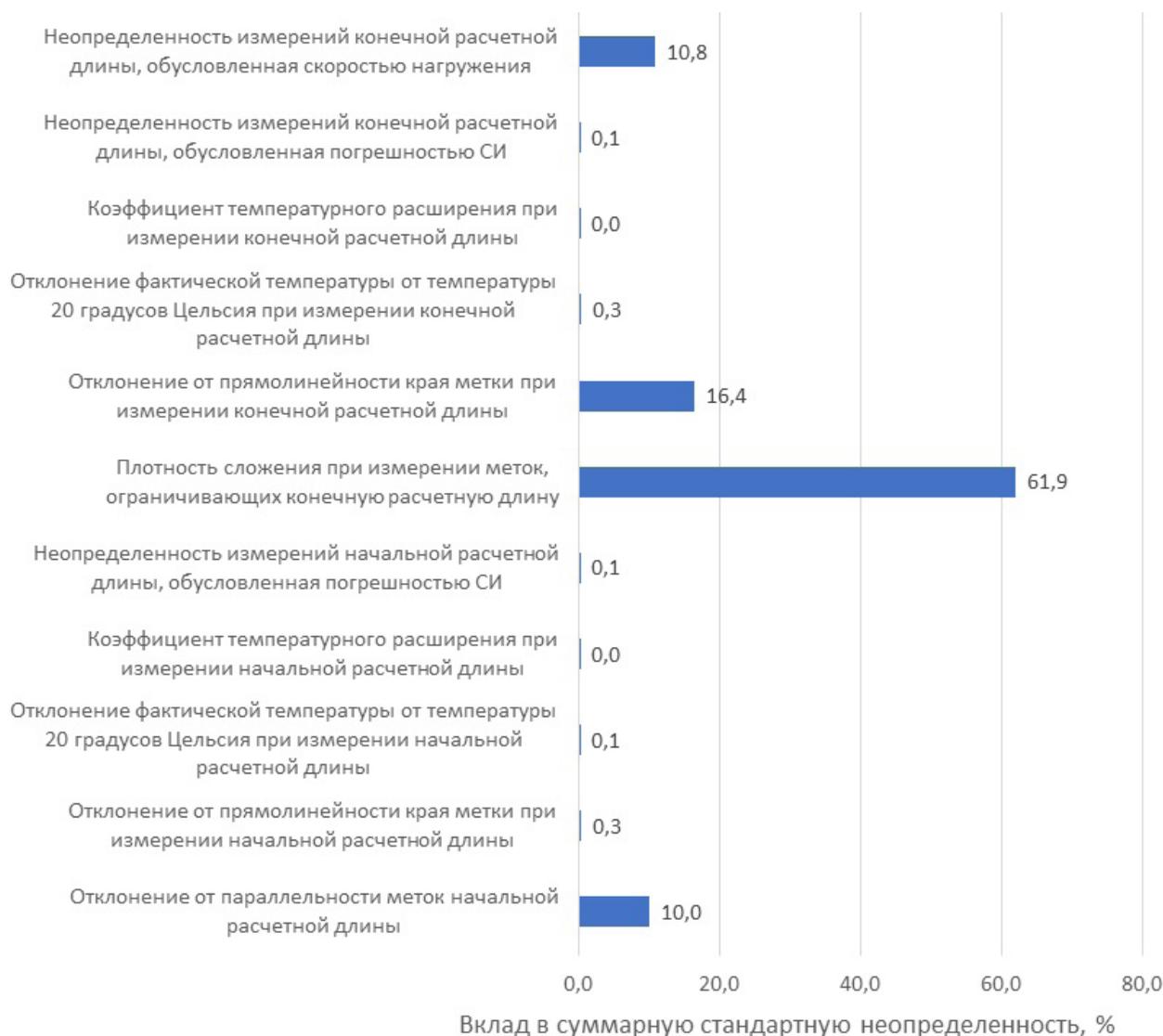


Рис. 8. Вклады от различных источников в суммарную стандартную неопределенность результатов измерений относительного удлинения после разрыва

Fig. 8. Contributions from different sources to the total standard uncertainty of the measurement results of relative elongation after rupture

Значения расширенной неопределенности измерений относительного удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва в зависимости от значения относительного удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва в диапазонах измерений методик измерений, рассчитанные для разработанных методик измерений и стандартизированной методики, представлены в табл. 4 и 5.

Графическое представление результатов расчета неопределенностей измерений относительного

удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва в установленных диапазонах измерений по методикам измерений и стандартизированной методике приведено на рис. 10 и 11.

Из табл. 4 и 5, рис. 10 и 11 видно, что запас по точности разработанных методик измерений по отношению к стандартизированной методике измерений составляет не менее 2,5 при определении относительного удлинения и не менее 5 при определении относительного сужения после разрыва.



Рис. 9. Вклады от различных источников в суммарную стандартную неопределенность результатов измерений относительного сужения после разрыва

Fig. 9. Contributions from different sources to the total standard uncertainty of the measurement results of the relative contraction after rupture

Таблица 3. Диапазоны измерений, значения показателей точности результатов измерений относительного удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва
 Table 3. Measurement ranges, values of the accuracy indicators of the measurement results of relative elongation after rupture, relative contraction after rupture

Характеристика	Единица величины	Диапазон измерений	Расширенная неопределенность при уровне доверия $p=95\%$ при коэффициенте охвата $k=2$, (показатель точности), $U(\delta_5)$
Относительное удлинение после разрыва δ_5	%	От 10,0 до 75,0 включ.	$0,0008x + 0,22$
Относительное сужение после разрыва ψ	%	От 40,0 до 85,0 включ.	$-0,0064x + 0,73$

Примечание. x – результат измерений относительного удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва, полученный в соответствии с методикой измерений, %.

Таблица 4. Значения расширенной неопределенности измерений относительного удлинения после разрыва по методике измерений и стандартизованной методике
 Table 4. Values of the extended uncertainty of measurements of elongation after fracture according to the measurement method and standardized methodology

Относительное удлинение после разрыва, %								
	10	20	30	40	50	60	70	75
Обозначение документа на методику измерений								
Методика измерений	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28
ГОСТ 1497–2023	0,63	0,64	0,66	0,67	0,68	0,70	0,71	0,72

Таблица 5. Значения расширенной неопределенности измерений относительного сужения после разрыва по методике измерений и стандартизованной методике
 Table 5. Values of expanded uncertainty of measurements of relative contraction after rupture according to the measurement method and standardized procedure

Относительное удлинение после разрыва, %						
	40	50	60	70	80	85
Обозначение документа на методику измерений						
Методика измерений	0,47	0,41	0,35	0,28	0,22	0,18
ГОСТ 1497–2023	2,37	2,17	1,94	1,68	1,37	1,19

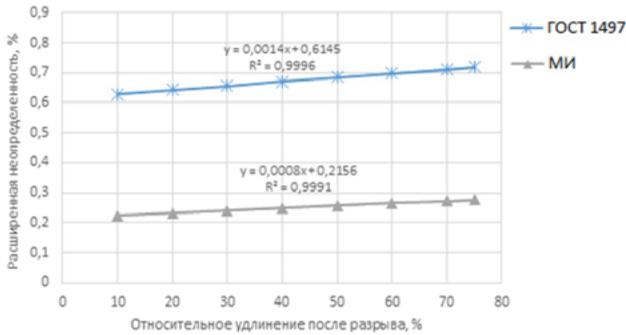


Рис. 10. Результаты расчета неопределенности измерений относительного удлинения после разрыва по методике измерений (МИ) и стандартизированной методике

Fig. 10. Results of calculating the uncertainty of measurements of relative elongation after rupture according to the measurement method and standardized procedure

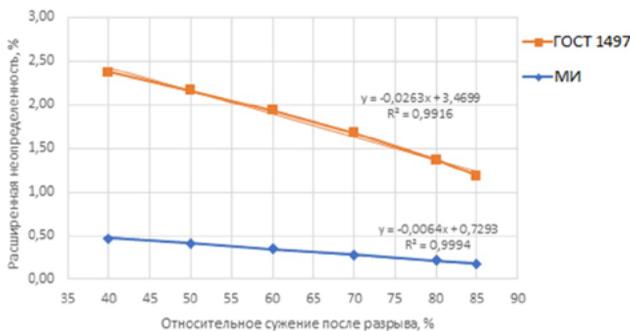


Рис. 11. Результаты расчета неопределенности измерений относительного сужения после разрыва по методике измерений (МИ) и стандартизированной методике

Fig. 11. Results of calculating the uncertainty of measurements of the relative contraction after rupture according to the measurement method and standardized procedure

Экспериментальное опробование процедуры применения методик измерений

Экспериментальное опробование процедуры применения методик измерений проведено путем сличения результатов испытаний стандартных образцов зарубежного выпуска (reference material, далее – RM) по разработанным методикам измерений с аттестованными значениями.

Для определения правильности методик измерений было проведено сравнение результатов X , полученных по методикам измерений, с опорными значениями RM, X_{RM} , по критерию

$$|X - X_{RM}| \leq \sqrt{U^2 + U_{RM}^2}, \quad (16)$$

где U – расширенная неопределенность при уровне доверия $p = 95\%$ при коэффициенте охвата $k = 2$, методики измерений; U_{RM} – расширенная неопределенность соответствующей характеристики RM.

Измерениям был подвергнут RM IfEP-RL-05, имеющий аттестованное значение относительного удлинения после разрыва $(15,1 \pm 0,4)\%$, аттестованное значение относительного сужения после разрыва $(50,4 \pm 0,9)\%$.

По результатам измерений по разработанным методикам для RM установлено значение относительного удлинения после разрыва $(15,0 \pm 0,23)\%$, значение относительного сужения после разрыва $(49,7 \pm 0,41)\%$.

При проверке правильности методик измерений по критерию (16) получено:

- для относительного удлинения после разрыва $0,1 < 0,46$;
- для относительного сужения после разрыва $0,7 < 0,99$.

Следовательно, разработанные методики не дают смещения по сравнению с опорными значениями RM.

Заключение

1. Разработаны методики измерений относительного удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва, реализованные на одном комплекте оборудования и имеющие запас по точности по отношению к стандартизированной методике измерений не менее 2,5 при определении относительного удлинения после разрыва и не менее 5 при определении относительного сужения после разрыва.

2. При разработке методик измерений установлены оптимальные значения параметров измерений, связанных с подготовкой образцов и методическими факторами, и оценены их вклады в бюджеты неопределенности измерений.

3. Разработанные методики измерений относительного удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва не дают смещения по результатам испытаний стандартных образцов зарубежного выпуска и могут быть использованы в качестве референтных методик измерений для оценки правильности

результатов измерений, полученных с использованием других методик (методов) измерений в соответствии с 102-ФЗ⁷.

Благодарности: Автор выражает признательность заведующему отделом метрологии механических и геометрических величин и характеристик УНИИМ – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» В. В. Толмачеву за поддержку исследований в ходе аттестации методик измерений, валидацию полученных данных, 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. Mendeleev Institute for Metrology, for supporting the research during the certification of measurement methods and the validation of the obtained data, as well as the reviewers for valuable comments regarding the presentation of methodological approaches to assessing contributions to measurement uncertainty.

Вклад автора: Автор подтверждает единичную ответственность за сбор данных, анализ и интерпретацию результатов, 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

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фетисов В. П. Исследование локализации пластической деформации при растяжении низкоуглеродистой стали // *Литье и металлургия*. 2023. № 1. С. 85–87. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-85-87>.
2. Андрианов И. К., Лин Х., Феоктистов С. И. Определение относительной деформации, соответствующей началу образования шейки при испытании алюминиевых сплавов на разрыв // *Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года. Том Часть 2 / Комсомольск-на-Амуре : Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. С. 157–160.*

«Разработка и внедрение первичной референтной методики измерений механических напряжений и модуля упругости при статическом растяжении металлов». 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 «Development and implementation of a primary reference method for measuring mechanical stresses and elastic modulus during static tension of metals». 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. Mendeleev Institute for Metrology.

Финансирование: Статья выполнена в рамках опытно-конструкторской работы «Разработка референтных методик и стандартных образцов утвержденных типов, необходимых для метрологического обеспечения измерений механических свойств, характеризующих пластичность металлов» (шифр «Пластичность»), УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

Funding: The article was carried out as part of the development work «Development of reference methods and certified reference materials for metrological support of measurements of mechanical properties of the plasticity of metals», cipher «Ductility», UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology.

3. Хамханова Д. Н., Хадыков М. Т., Грешилов А. Д. Контроль качества высокопрочных болтов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 5. С. 9–13. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-5-9-14>.
4. Логинов Ю. Н., Еремин А. В. Формоизменение медных прямоугольных профилей при растяжении // Производство проката. 2019. № 12. С. 15–18. <https://doi.org/10.31044/1814-4632-2019-0-12-15-18>
5. Влияние режима температурно-деформационной обработки специальных легированных сталей на структурное состояние и свойства проката / А. В. Колдаев [и др.] // Металлург. 2017. № 10. С. 30–34.
6. Густов Ю. И., Катанина А. Г. Оценка энергоёмкости разрушения металлических материалов посредством показателей относительного поперечного сужения // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2017. № 25. С. 16–19.
7. Оценка характеристик поврежденности малоуглеродистой стали физическими методами / Л. Р. Ботвина [и др.] // Металлы. 2016. № 1. С. 27–39.
8. Голи-Оглу Е. А., Бокачев Ю. А. Повышение уровня пластичности в Z-направлении проката толщиной до 150 мм из низкоуглеродистых сталей для ответственных сварных конструкций // Металлург. 2014. № 9. С. 71–76.
9. Остсемин А. А. Напряженное состояние и прочность наклонной мягкой прослойки механически неоднородных сварных соединений с непроваром в центре шва // Сварочное производство. 2014. № 6. С. 3–9.
10. Федотов П. В., Лошманов Л. П., Костюхина А. В. Влияние кратковременной термообработки на механические свойства сплава Э110 // Физика и химия обработки материалов. 2014. № 5. С. 67–73.
11. Чжан Ю. Ц., Ху В. Т., Хань Ц. Т. Горячая пластичность азотсодержащей мартенситной нержавеющей стали 3Cr13N // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. № 3. С. 61–64.
12. Логинов Ю. Н., Осминин А. С., Копылова Т. П. Исследование изменения относительного сужения кислородсодержащей медной проволоки по маршруту волочения // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 5. С. 29–32.
13. Зависимость относительного сужения металла рельсов от технологических параметров производства и химического состава, установленная статистическими методами / А. И. Троцан [и др.] // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2012. № 24. С. 135–143.
14. Статистический анализ и прогнозирование механических свойств катанки на новом мелкосортно-проволочном стане / А. А. Пономарев [и др.] // Производство проката. 2011. № 1. С. 32–36.
15. О возможностях усовершенствования технологии выдавливания полуфабрикатов авиационных и автомобильных колес и прогнозной оценки их ресурса / С. Т. Басюк [и др.] // Технология легких сплавов. 2011. № 2. С. 72–76.
16. Кутяйкин В. Г., Горбачев П. А. Оценивание неопределенности при определении прочностных характеристик материалов // Компетентность. 2021. № 7. С. 16–20. <https://doi.org/10.24412/199387802021-7-16-20>
17. Оценивание неопределенности измерения при испытаниях на растяжение высокопрочных болтов / Д. Н. Хамханова [и др.] // iPolytech Journal. 2022. Т. 26, № 4. С. 601–611. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-601-611>
18. Машенцева М. С. Оценивание неопределенности измерений // Контроль качества продукции. 2022. № 6. С. 50–54.

REFERENCES

1. Fetisov V. P. Investigation of localization of plastic deformation during stretching of low-carbon steel. *Foundry production and metallurgy*. 2023;1:85–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-85-87>.
2. Andrianov I. K., Lin H., Feoktistov S. I. Determination of relative strain, corresponding to the beginning of neck formation when testing aluminum alloys for rupture. In: *Youth and science: current problems of fundamental and applied research: Proceedings of the V All-Russian National Scientific Conference of Young Scientists*, 11–15 April 2022, Komsomolsk-on-Amur, Russia. Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur State University; 2022. P. 157–160. (In Russ.).
3. Khamkhanova D. N., Khadykov M. T., Greshilov A. D. Quality control of high-strength bolts. *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*. 2022;5:9–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-5-9-14>
4. Loginov Yu. N., Eremin A. V. Forming of rectangular copper shapes during extension. *Rolled products production*. 2019;12:15–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1814-4632-2019-0-12-15-18>
5. Koldayev A. V., Amezhnov A. V., Zaitsev A. I., Stepanov A. B. Influence of the temperature-deformation treatment mode of special alloy steels on the structural state and properties of rolled products. *Metallurgist*. 2017;10:30–34. (In Russ.).
6. Gustov Yu. I., Katanina A. G. Evaluation of the intensity of destruction of metallic materials by means of indicators of relative transverse contraction. *New materials and technologies in mechanical engineering*. 2017;25:16–19. (In Russ.).

7. Botvina L. R., Soldatenkov A. P., Levin V. P., Tyutin M. R., Demina Y. A., Petersen T. B. et al. Assessment of damage characteristics of low-carbon steel by physical methods. *Metally*. 2016;1:23–33. (In Russ.).
8. Goli-Oglu E. A., Bokachev Yu. A. Increasing the level of ductility in the Z-direction of rolled products up to 150 mm thick made of low-carbon steels for critical welded structures. *Metallurgist*. 2014;9:71–76. (In Russ.).
9. Ostsemin A. A. Stress state and strength of an inclined soft interlayer of mechanically heterogeneous welded joints with incomplete fusion in the center of the seam. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2014;6:3–9. (In Russ.).
10. Fedotov P. V., Loshmanov L. P., Kostyukhina A. V. Effect of short-term heat treatment on the mechanical properties of E110 alloy. *Physics and chemistry of materials processing*. 2014;5:67–73. (In Russ.).
11. Zhang Yu. C., Hu W. T., Han C. T. Hot plasticity of nitrogen-containing martensitic stainless steel 3Cr13N. *Problems of ferrous metallurgy and materials science*. 2013;3:61–64. (In Russ.).
12. Loginov Yu. N., Osminin A. S., Kopylova T. P. Study of change in relative narrowing of oxygen-containing copper wire along the drawing route. *Blank production in mechanical engineering*. 2012;5:29–32. (In Russ.).
13. Trotsan A. I., Kaverinskiy V. V., Levchenko V. I., Kashule I. M., Nosochenko O. O. Dependence of the relative narrowing of the rail metal on the technological parameters of production and chemical composition, established by statistical methods. *Bulletin of the Priazov State Technical University. Series: Technical Sciences*. 2012;24:135–143. (In Russ.).
14. Ponomarev A. A., Pyatkova A. Yu., Parshakov S. I., Shilov V. A. Statistical analysis and forecasting of mechanical properties of wire rod on a new small-section wire mill. *Proizvodstvo prokata*. 2011;1:32–36. (In Russ.).
15. Basyuk S. T., Mozalev V. V., Lisin A. N., Levochkin S. B. On the possibilities of improving the technology of extruding semi-finished aircraft and automobile wheels and predictive assessment of their service life. *Technology of Light Alloys*. 2011;2:72–76. (In Russ.).
16. Kutuyaykin V. G., Gorbachev P. A. Uncertainty assessment in determining the strength characteristics of materials. *Competence (Russia)*. 2021;7:16–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/199387802021-7-16-20>
17. Khamkhanova D. N., Khadykov M. T., Mosorov V. I., Bakhrunov K. K. Evaluation of the measurement uncertainty during the tensile tests of high-strength bolts. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):601–611. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-601-611>
18. Mashenzeva M. S. Evaluation of measurement uncertainty. *Production quality control*. 2022;6:50–54. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Матвеева Илона Николаевна – научный сотрудник лаборатории менеджмента риска и метрологического обеспечения безопасности технологических систем, УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
620075, Россия, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4
e-mail: MatveevaIN@uniim.ru
<https://orcid.org/0009-0002-2864-4409>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Iona N. Matveeva – Researcher, Laboratory for Risk Management and Metrological Safety Assurance of Technological Systems, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology
4 Krasnoarmeyskaya st., Yekaterinburg, 620075, Russia
e-mail: MatveevaIN@uniim.ru
<https://orcid.org/0009-0002-2864-4409>