iPolytech Journal 2022. Т. 26. № 4. С. 601–611 ISSN 2782-4004 (print)
2022;26(4):601-611 ISSN 2782-6341 (online)

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья
УДК 658.56:621
https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-601-611

Оценивание неопределенности измерения при испытаниях на растяжение высокопрочных болтов

Дарима Нимбуевна Хамханова[1]✉, Михаил Томович Хадыков[2], Владимир Иванович Мосоров[3], Константин Константинович Бахрунов[4]
[1-4]Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ, Россия
[1]darima-1956@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-2432-212X
[2]khadykovmihail@yandex.ru
[3]vlmosorov@yandex.ru
[4]bkk1975@mail.ru

Резюме. Цель – разработка методики оценивания неопределенности измерения при испытаниях на растяжение металлов и сплавов. Для разработки данной методики проводились исследования источников неопределенности. Объектом исследований явились высокопрочные болты из стали марки 40Х «Селект», которые подвергали испытаниям на растяжение по методике согласно ГОСТ 1497-85 на универсальной разрывной машине УММ-100. Выявлены основные источники неопределенности измерения относительного удлинения и относительного сужения: повторные измерения относительного удлинения; погрешности измерения штангенциркулем конечной длины, нанесения начальной длины расчетного участка и силоизмерительного устройства машины. Также к ним относятся ошибка отсчета оператора, повторные измерения относительного сужения, погрешность измерения микрометром диаметра образца до начала и после испытаний. Показано, что при проведении измерений при температуре окружающей среды, отличной от значения нормальной температуры ((20±5)°С), появляется дополнительный источник неопределенности – отклонение температуры. Приписаны предполагаемые законы распределения входных величин. Показано, что при испытаниях на растяжение имеются две составляющие неопределенности, оцениваемые по типам А и В. Составлена математическая модель измерения относительного удлинения и относительного сужения при испытаниях на растяжение. Оценены стандартные неопределенности входных величин исходя из предполагаемых законов их распределения. Выявлено наличие корреляционной связи между конечной длиной расчетного участка, диаметром образца после испытания и прилагаемым усилием. Получены выражения для расчета коэффициентов чувствительности, характеризующие изменение выходной величины (относительного удлинения) от изменения входных величин. Оценены суммарная и расширенная неопределенности измерения. На основании проделанной работы прописана процедура оценивания неопределенности измерения при испытаниях высокопрочных болтов на растяжение. Показано, что оценивание неопределенности измерений при испытании продукции является достаточно трудоемкой работой, предлагается разработка методик оценивания неопределенности измерения при испытаниях и внесение их в нормативные документы на методы контроля.

Ключевые слова: измерение, испытание, метод, неопределенность измерения, стандартная неопределенность, растяжение

Для цитирования: Хамханова Д. Н., Хадыков М. Т., Мосоров В. И., Бахрунов К. К. Оценивание неопределенности измерения при испытаниях на растяжение высокопрочных болтов // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 601–611. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-601-611.

© Хамханова Д. Н., Хадыков М. Т., Мосоров В. И., Бахрунов К. К., 2022

iPolytech Journal 2022. Т. 26. № 4. С. 601–611 ISSN 2782-4004 (print)
2022;26(4):601-611 ISSN 2782-6341 (online)

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Evaluation of the measurement uncertainty during the tensile tests of high-strength bolts

Darima N. Khamkhanova[1]✉, Mikhail T. Khadykov[2], Vladimir I. Mosorov[3], Konstantin K. Bakhrunov[4]
[1-4]East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia
[1]darima-1956@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-2432-212X
[2]khadykovmihail@yandex.ru
[3]vlmosorov@yandex.ru
[4]bkk1975@mail.ru

Abstract. A developed methodology for evaluating measurement uncertainty during the tensile tests of metals and alloys is presented. In this connection, the various sources of uncertainty are considered. The object of studies included high-strength bolts made of 40Kh "Selekt" steel, which were subjected to tensile tests according to the GOST 1497-85 State Standard using a UMM-100 universal tensile testing machine. The basic sources of uncertainty in the measurement of relative elongation and reduction were shown to include repeated measurements of relative elongation; errors of measuring the finite length by a vernier calliper and marking the initial length of a calculated section, as well as the measurement error of the tensile testing machine. These also include operator reading error, repeated relative reduction measurements, as well as the error of measuring the sample diameter by a micrometer before and after the tests. During the measurements, temperature deviation was demonstrated to constitute an additional source of uncertainty when the ambient temperature is different from the standard temperature value ((20±5)°C). Assumptions underlying laws describing the distribution of input values were assigned. Tensile tests are shown to be characterised by two components of uncertainty evaluated as types A and B. A mathematical model constructed for measuring relative elongation and relative reduction during tensile tests is presented. The standard uncertainties of input values are evaluated based on the assumed laws of their distribution. A correlation between the final length of the calculated section, the diameter of the sample following the test, and the applied force, is revealed. Expressions for the calculation of sensitivity coefficients, which characterize variations in the output value (relative elongation) depending on variations of input values, were obtained. The total and extended measurement uncertainties were evaluated. Based on the performed studies, a procedure for evaluating measurement uncertainty when carrying out tensile tests of high-strength bolts was described. The evaluation of measurement uncertainty during the product testing was shown to be a rather labour-consuming work. In this regard, the authors propose the development of procedures for evaluating the measurement uncertainty during the tests with their inclusion into regulatory documents for control methods.

Keywords: measurement, test, method, measurement uncertainty, standard uncertainty, tensile stress

For citation: 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.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день выражение результатов измерений, контроля и испытаний в неопределенностях измерения стало нормой на международном уровне. Между тем у нас в стране не во всех нормативных документах на методы контроля и испытаний во многих областях промышленности, в том числе и в машиностроении, прописаны методики оценивания неопределенности измерения, хотя действует ГОСТ 34100.3-2017[5]. Обзор литературных источников, посвященных сравнительному анализу, исследованиям и испытаниям высокопрочных болтов показывает, что не во всех публикациях указываются значения неопределенности механических характеристик болтов [1–12]. В основном работы по оцениванию неопределенности измерений, контроля и испытаний высокопрочных болтов проводятся за рубежом [13–20]. Большинство отечественных работ по оцениванию неопределенности измерения посвящено оцениванию неопределенности измерений при поверке и калибровке средств измерений [21–24].

[5]ГОСТ 34100.3-2017. Неопределенность измерения. Ч. 3. Руководство по выражению неопределенности измерения (ISO/IEC Guide 98-3:2008, ЮТ). М.: Изд-во «Стандартинформ», 2018.

Оценивание неопределенности измерения представляет собой довольно трудоемкий процесс, требует исследования и выявления всех источников неопределенности, составления уравнения измерения, выявления корреляционной связи между входными величинами, выявления законов распределения входных величин, вычисления стандартной, суммарной и расширенной неопределенности, что представляет трудности на практике. Поэтому возникает актуальная задача разработки методик оценивания неопределенности измерения для конкретных методов контроля.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является разработка методики оценивания неопределенности измерения при испытаниях на растяжение (определение относительного удлинения и относительного сужения) высокопрочных болтов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом контроля являлись высокопрочные болты М22х80 из конструкционной легированной стали марки 40 Х «Селект». Испытания проводились по ГОСТ 1497[6] на универсальной разрывной машине УММ-100.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Описание порядка проведения испытания на определение относительного удлинения и оценивание неопределенности измерения. Температура окружающей среды – 23^0С. Измерение диагоналей проводилось с помощью штангенциркуля типа ШЦТ-I-150 0,05. Нанесение рисок осуществлялось с использованием металлической линейки до 300 мм, с допускаемым отклонением $\mp 0{,}10$ мм. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

При испытаниях на растяжение (относительного удлинения) имеем две составляющие неопределенности, определяемые по типу А (составляющие, оцениваемые путем обработки результатов многократных измерений), т.к. проводятся многократные измерения относительного удлинения и по типу В (составляющие, оцениваемые другими способами: по характеристикам, взятым из паспорта на прибор, методикам выполнения измерений, из предыдущих экспериментов, из справочников и т.д.).

Для составления математической модели измерений исследованы источники неопределенности при испытаниях на растяжение, где относительное удлинение $\bar{\delta_p}$ определяют по формуле: $\delta_p = \frac{(l_{\text{кр}} - l_{\text{нр}})\cdot 100}{l_{\text{нр}}}$, где $l_{\text{кр}}$ – конечная длина расчетного участка, мм; $l_{\text{нр}}$ – начальная длина расчетного участка равная 50 мм.

Следовательно, основными источниками неопределенности являются повторные измерения относительного удлинения (δ_i), погрешность измерения штангенциркулем конечной длины $(l_{\text{кр}})$, погрешность нанесения начальной длины расчетного участка $(l_{\text{нр}})$.

Кроме того, источниками неопределенности являются погрешность силоизмерительного устройства машины (ΔP), ошибка отсчета оператора начальной и конечной длин расчетного участка – Δx.

При проведении измерений при температуре окружающей среды от нормальной может возникать дополнительный источник неопределенности как отклонение температуры от нормального $(20 \mp 5)^0\text{С} - \Delta_t$.

В общем случае математическую модель измерения относительного удлинения при испытаниях на растяжение запишем следующим образом: $\delta_p = f\left(\Delta\delta_i, l_{\text{кр}}, l_{\text{нр}}, \Delta x, \Delta P, \Delta_t\right)$.

В нашем случае пренебрегаем дополнительным источником неопределенности, поскольку измерения проводились в нормальных условиях. В противном случае необходимо провести исследования по определению стандартных неопределенностей от изменения температуры.

Следовательно, уравнение измерения в нашем случае имеет вид (1):

$$\delta_p = f\left(\Delta\delta_i, l_{\text{кр}}, l_{\text{нр}}, \Delta P, \Delta x\right). \qquad (1)$$

[6]ГОСТ 1497. Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введ. 01.01.1986. М.: Изд-во «Стандартинформ», 1986.

Таблица 1. Результаты испытаний высокопрочных болтов на растяжение
Table 1. Results of tensile tests of high-strength bolts

Типоразмер болта	Номер образца	Диаметр, d_0, мм	Диаметр, $d_к$, мм	Конечная длина, $l_{кр}$, мм	Относительное удлинение, δ_p, %	Относительное сужение, ψ, %
M22x80	1	10	6,6	56,6	13	57
–	2	10,2	6,4	56,9	14	61
–	3	9,9	6,1	57,7	15	63
–	4	10,1	6,8	56,8	13,5	55
–	5	10,2	6,2	56,8	13,5	63
Среднее значение		$\bar{d_0}$ = 10,08	$\bar{d_к}$ = 6,42	$\bar{l_{кр}}$ = 56,96	$\bar{\delta_p}$ = 13,8	59,8
Среднее квадратическое отклонение (СКО)					2,2360	3,6331
Стандартное отклонение					0,3391	1,6248

Неопределенность измерений, обусловленную повторными измерениями относительного удлинения, оцениваем по типу А, его стандартная неопределенность определятся по известной формуле (2) и составляет $u_A = u(\Delta\delta_i) = 0{,}3391$.

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{(n-1)n}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2}, \quad (2)$$

где в нашем случае $x_i = \delta_i$ – i-й результат измерения относительного удлинения; $\bar{x} = \bar{\delta_i}$ – среднее значение; n – число наблюдений.

Значение стандартного отклонения неопределенности измерения, обусловленной погрешностью измерения штангенциркулем конечной длины, $u(l_{кр})$, можно взять из протокола поверки. Необходимо иметь в виду, что в ГОСТ 8.113-85[7] прописывается методика поверки штангенциркулей, однако в нем нет методики оценивания неопределенности измерения при его поверке/калибровке. На практике в свидетельстве о поверке указывается только признание о годности данного штангенциркуля к применению. В этом случае, если штангенциркуль признан годным к применению, полагая, что все его метрологические характеристики находятся в допустимых пределах, обусловленную погрешностью штангенциркуля неопределенность измерения можно определить по выражению (3), допуская, что она может быть описана прямоугольным распределением:

$$u(l_{кр}) = \frac{\Delta_{шт}}{\sqrt{3}}, \quad (3)$$

где $\Delta_{шт}$ – полуширина доверительного интервала равная значению абсолютной погрешности штангенциркуля – $\mp 0{,}05$ мм.

Следовательно, обусловленная погрешностью измерения штангенциркулем конечной длины стандартная неопределенность равна $u(l_{кр}) = \frac{0{,}05}{\sqrt{3}} = 0{,}0288$. Безразмерная величина.

Обусловленная погрешностью нанесения начальной длины расчетного участка стандартная неопределенность $l_{нр}$ зависит от погрешности линейки. Однако в методике поверки металлических линеек МИ 2024-89 не прописана методика определения неопределенности измерения при поверке и калибровке. Следовательно, при условии наличия свидетельства о проверке, где указана годность к применению данной линейки, полагаем, что все его метрологические характеристики находятся в допустимых пределах, а стандартную неопределенность измерения, обусловленную погрешностью линейки, определяем по выражению (4), допуская, что она может быть описана прямоугольным распределением:

$$u(l_{нр}) = \frac{\Delta_{л}}{\sqrt{3}}, \quad (4)$$

где $\Delta_{л}$ – полуширина доверительного

[7]ГОСТ 8.113-85. Государственная система обеспечения единства измерений. Штангенциркули. Методика поверки. Введ. 01.01.1987. М.: Изд-во «Стандартинформ», 1987.

интервала, равная значению допускаемого отклонения линейки – ± 0,10 мм.

Следовательно, обусловленная погрешностью измерения штангенциркулем конечной длины стандартная неопределенность равна $u(l_{\text{нр}}) = \frac{0{,}10}{\sqrt{3}} = 0{,}0578$. Безразмерная величина.

Стандартную неопределенность, обусловленную погрешностью измерения разрывной машины, можно взять из протокола поверки УММ-100. Однако в методике поверки разрывных и универсальных машин для статистических испытаний РД 50-482-84[8] не прописана процедура оценивания погрешности силоизмерительного устройства машины. Поэтому, поскольку УММ-100 признан годным к эксплуатации по результатам поверки, полагая, что все его метрологические характеристики находятся в допустимых пределах, обусловленную погрешностью силоизмерительного устройства машины неопределенность измерения можно определить по выражению (5), допуская, что она может быть описана прямоугольным распределением:

$$u(\Delta P) = \frac{\Delta P}{\sqrt{3}}, \qquad (5)$$

где ΔP – полуширина доверительного интервала равная значению абсолютной погрешности нагружения.

Относительная погрешность измерения разрывной машины УММ-100 составляет 1% от создаваемой нагрузки. При нагрузке $P = 100$ кН максимальная абсолютная погрешность составляет 1 кН.

Следовательно, обусловленная погрешностью силоизмерительного устройства машины стандартная неопределенность $u(\Delta P) = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0{,}578$. Безразмерная величина.

Стандартную неопределенность, обусловленную погрешностью отсчета оператора начальной и конечной длин расчетного участка можно определить исходя из того, что оператор может ошибиться на одно деление нониуса штангенциркуля, и (по рекомендации Руководства) по выражению неопределенности измерения принимаем равной $u(\Delta x) = \frac{\text{цена деления шкалы нониуса}}{\sqrt{3}} = \frac{0{,}05}{\sqrt{3}} = 0{,}0288$. Безразмерная величина.

Для определения суммарной неопределенности выявляют наличие корреляционной связи между входными величинами. В нашем случае существует корреляционная связь между прилагаемой нагрузкой P и конечной длиной расчетного участка $l_{\text{кр}}$.

Учитывая, что две из входных величин коррелированы между собой, суммарная стандартная неопределенность определяется по выражению (6):

$$u_c^2(\delta_p) = c_1 u^2(\Delta\delta_i) + c_2 u^2(l_{\text{кр}}) + c_3 u^2(l_{\text{нр}}) + c_4 u^2(\Delta P) + c_5 u^2(\Delta x) + \\ + c_2 c_4 l_{\text{кр}} u(\Delta P) u(l_{\text{кр}})\, r(\Delta P, l_{\text{кр}}), \qquad (6)$$

где c_i – коэффициенты чувствительности; $r(\Delta P, l_{\text{кр}})$ – степень корреляции между ΔP и $l_{\text{кр}}$.

Коэффициенты чувствительности, определяемые как $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$, показывают, как изменяется выходная оценка y с изменением входных оценок $x_1, \dots, x_N$. Учитываем, что входные оценки $x_1, \dots, x_N$ в нашем случае обозначены через $\Delta\delta_i, l_{\text{кр}}, l_{\text{нр}}, \Delta x$.

Очевидно, что коэффициенты чувствительности, определяемые как первые производные от функции $f(\Delta\delta_i, l_{\text{кр}}, l_{\text{нр}}, \Delta P, \Delta x)$ (см. формулу (1)) по ее аргументам, будут равны:

$$c_1 = \frac{\partial f}{\partial \Delta\delta_i} = 1.\ c_4 = \frac{\partial f}{\partial \Delta P} = 1.\ c_5 = \frac{\partial f}{\partial \Delta x} = 1;$$

$$c_2 = \frac{\partial \delta_p}{\partial l_{\text{кр}}} = \frac{\partial \left[\frac{(l_{\text{кр}} - l_{\text{нр}}) \cdot 100}{l_{\text{нр}}}\right]}{\partial l_{\text{кр}}} = \frac{100}{l_{\text{нр}}} = 2;$$

[8]РД 50-482-84. Методические указания. Машины разрывные и универсальные для статических испытаний металлов и конструкционных пластмасс. Методика поверки. Введ. 01.01.1986.

$$c_3 = \frac{\partial \delta_p}{\partial l_{\text{нр}}} = \frac{\partial \left[\frac{(l_{\text{кр}} - l_{\text{нр}}) \cdot 100}{l_{\text{нр}}}\right]}{\partial l_{\text{нр}}} = \frac{100 \cdot (l_{\text{кр}} - l_{\text{нр}})}{{l_{\text{нр}}}^2} = 0{,}28.$$

Степень корреляции между ΔP и $l_{\text{кр}}$ характеризуется оценкой коэффициента корреляции, определяемой как (7)

$$r(\Delta P, l_{\text{кр}}) = \frac{u(l_{\text{кр}}, \Delta P)}{u(l_{\text{кр}}) u(\Delta P)}. \quad (7)$$

Оценку ковариации двух коррелированных входных величин $l_{\text{кр}}$ и ΔP с оценками $\bar{l}_{\text{кр}}$ и $\bar{P}$, полученных при повторных наблюдениях, рассчитывают по формуле (8):

$$u(l_{\text{кр}}, \Delta P) = s(\bar{l}_{\text{кр}}, \bar{P}), \quad (8)$$

где $s(\bar{l}_{\text{кр}}, \bar{P})$ находят по выражению (9).

$$s(\bar{l}_{\text{кр}}, \bar{P}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n} (l_{\text{кр}i} - \bar{l}_{\text{кр}})(P_i - \bar{P}), \quad (9)$$

где $l_{\text{кр}i}$ и P_i – результаты измерений величин $l_{\text{кр}}$ и P, соответственно, а $\bar{l}_{\text{кр}}$ и $\bar{P}$ – их средние значения.

Если значения $(l_{\text{кр}i} - \bar{l}_{\text{кр}})$ можем найти по результатам измерения, то $(P_i - \bar{P})$ может принять любое значение в пределах допускаемой абсолютной погрешности от ± 1,0 кН. Поэтому, применяя равномерный закон распределения вероятности погрешности нагружения, можно принять, что ее среднее значение равно нулю.

Следовательно, $u(l_{\text{кр}}, \Delta P) = s(\bar{l}_{\text{кр}}, \bar{P}) - 0$.

Тогда формула (4) примет такой вид:

$$\mathrm{u_c^2(\delta_p)} = \mathrm{c_1 u^2(\Delta \delta_i) + c_2 u^2(l_{кр}) + c_3 u^2(l_{нр}) + c_4 u^2(\Delta P) + c_5 u^2(\Delta x)}.$$

Итак, суммарная стандартная неопределенность измерения при испытании на растяжение составляет:

$$u_c(\Delta\delta_i)^2 = 0{,}3391^2 + 2 \cdot 0{,}0288^2 + 0{,}28 \cdot 0{,}0578^2 + 0{,}578^2 + 0{,}0288^2 = 0{,}4525.$$
$$u_c(\delta_p) = 0{,}6226.$$

Расширенная неопределенность измерения определяется по формуле (10):

$$U = k \cdot u_c, \quad (10)$$

где k – коэффициент охвата.

В руководстве по выражению неопределенности измерения рекомендуется в качестве коэффициента охвата при доверительной вероятности 0,95 принимать значения от 2 до 3. При $k = 2{,}5$ расширенная неопределенность, будет следующая:

$$U = k \cdot u_c = 2{,}5 \cdot 0{,}6226 = 1{,}6816 \approx 1{,}68.$$

Результат измерения будет равен $13{,}8 \pm 1{,}68$ при доверительной вероятности P = 0,95. То есть неопределенность измерения при испытании на растяжение составила 1,68 мм.

Описание порядка проведения испытания на определение относительного сужения и оценивание неопределенности измерения. Температура окружающей среды – 23°С. Измерение диаметра образца проводились с помощью микрометра типа МК25-1, с пределом допускаемой погрешности ± 2 мкм, с ценой деления шкалы барабана 0,001 мм.

При испытаниях на растяжение (относительного сужения) также имеем две составляющие неопределенности, определяемые по типам А и В.

Для составления математической модели измерений исследованы источники неопределенности при испытаниях на растяжение (относительного сужения), где относительное сужение определяют по формуле: $\psi = \frac{(F_0 - F_k) \cdot 100}{F_k}$, где F_0 – площадь поперечного сечения конечного образца до начала испытаний равная $\pi \left(\frac{d_0}{2}\right)^2$; F_k – площадь поперечного сечения конечного образца после испытаний равная $\pi \left(\frac{d_к}{2}\right)^2$, см^2.

Рассуждая аналогичным образом, имеем следующие источники неопределенности и их стандартные неопределенности, приведенные в табл. 2.

Следовательно, уравнение измерения в нашем случае имеет такой вид:

$$\psi = f(\Delta\psi_i, d_0, d_к, \Delta P, \Delta x).$$

Входные величины также не коррелированы между собой, суммарная стандартная неопределенность определяется по следующему выражению:

$$u_c^2(\psi) = c_1 u^2(\Delta\psi_i) + c_2 u^2(d_0) + c_3 u^2(d_к) + c_4 u^2(\Delta P) + c_5 u^2(\Delta x).$$

Очевидно, что коэффициенты чувствительности следующие:

$$c_1 = \frac{\partial f}{\partial \Delta\psi_i} = 1;$$

$$c_2 = \frac{\partial\psi}{\partial d_0} = \frac{\partial\left[\frac{\left(\pi\cdot\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 - \pi\cdot\left(\frac{d_к}{2}\right)^2\right)\cdot 100}{\pi\cdot\left(\frac{d_к}{2}\right)^2}\right]}{\partial d_0} = \frac{\partial\left[\frac{(d_0^2 - d_к^2)\cdot 100}{d_к^2}\right]}{\partial d_0} = -\frac{200\cdot d_0}{d_к^2};$$

$$c_3 = \frac{\partial\psi}{\partial d_к} = \frac{\partial\left[\frac{\left(\pi\cdot\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 - \pi\cdot\left(\frac{d_к}{2}\right)^2\right)\cdot 100}{\pi\cdot\left(\frac{d_к}{2}\right)^2}\right]}{\partial d_к} = \frac{\partial\left[\frac{(d_0^2 - d_к^2)\cdot 100}{d_к^2}\right]}{\partial d_к} = \frac{200\cdot d_0}{d_к^2};$$

$$c_4 = \frac{\partial f}{\partial \Delta P} = 1.\ c_5 = \frac{\partial f}{\partial \Delta x} = 1.$$

Итак, $c_2 = \frac{\partial\psi}{\partial d_к} = 293{,}03$; $c_3 = \frac{\partial\psi}{\partial d_0} = -293{,}03$.

Суммарная стандартная неопределенность измерения при испытании на растяжение, в результате которого происходит сужение образца, составляет:

$$u_c(\delta_p) = \sqrt{1{,}6248^2 - 293{,}03\cdot 1{,}1547^2 + 293{,}03\cdot 1{,}1547^2 + 0{,}5774^2} = 1{,}72.$$

Таблица 2. Исходные данные для расчета неопределенности измерения относительного сужения при испытаниях высокопрочных болтов
Table 2. Initial data for calculating measurement uncertainty of the relative contraction when testing high-strength bolts

Источник неопределенности	Значение	Стандартная неопределенность
Среднее значение измерения относительного сужения, %	59,8	0,3391
Повторные измерения относительного сужения – $\Delta\psi_i$, %	13; 14; 15; 13,5; 13,5	1,6248
Погрешность измерения микрометром диаметра образца до начала испытаний – d_0, мкм	∓2	1,1547
Погрешность измерения микрометром диаметра образца после испытаний – $d_к$, мкм	∓2	1,1547
Погрешность силоизмерительного устройства машины – ΔP, кН	∓1,0	0
Ошибка отсчета оператора – Δx, мкм, принятая равной 1 делению шкалы барабана мкм	1	0,5774

Расширенная неопределенность измерения равна:

$$U = 2{,}5 \cdot 1{,}72 = 4{,}3.$$

Следовательно, результат измерения будет $59{,}8 \mp 4{,}3$ при доверительной вероятности P = 0,95.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проделанной работы прописана процедура оценивания неопределенности измерения при испытаниях высокопрочных болтов на растяжение. Вышепроведенное оценивание неопределенности измерения при испытании высокопрочных болтов на растяжение показывает, что оценивание неопределенности измерений при испытании продукции является достаточно трудоемкой работой, предполагает выявление источников неопределенности, наличие корреляционной зависимости между входными величинами, определение законов распределения входных величин, коэффициентов чувствительности, стандартной, суммарной и расширенной неопределенностей и требует разработки методики оценивания неопределенности измерения при испытаниях и описания их в нормативных документах на методы контроля.

Список источников

1. Парышев Д. Н., Герасимов В. Я. Влияние длины болтов на прочность при растяжении // Транспортное строительство. 2009. № 6. С. 14–15.
2. Шаповалов В. В. Анализ применения болтов различного класса прочности в стальных каркасах промышленных зданий // Дни науки студентов Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых: матер. науч.-практ. конф. (г. Владимир, 22 марта – 9 апреля 2021). Владимир: Изд-во ВлГУ, 2021. С. 594–602.
3. Гуль Ю. П., Ивченко А. В., Кондратенко П. В., Перчун Г. И. Сравнительный анализ комплекса механических свойств, полученных при испытаниях готовых болтов и обточенных образцов // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2015. № 4. С. 132–141. https://doi.org/10.15802/STP2015/50121.
4. Гладштейн Л. И., Бабушкин В. М. Высокопрочные болты класса прочности 12.9 в монтажных соединениях строительных металлоконструкции // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 6. С. 37–39.
5. Кутяйкин В. Г., Горбачев П. А. Оценивание неопределенности при определении прочностных характеристик материалов // Компетентность. 2021. № 7. С. 16–20. https://doi.org/10.24412/1993-8780-2021-7-16-20.
6. Одесский П. Д. Перспективные требования к высокопрочным болтам для монтажных соединений металлических конструкции в северном исполнении // Вестник НИЦ «Строительство». 2017. № 3. С. 155–162.
7. Горицкий В. М., Гусева И. А., Сотсков Н. И., Гук В. О. Сравнение качества высокопрочных болтов класса прочности 12,9, изготовленных различными производителями // Крепеж, клеи, инструмент и… 2013. № 2 С. 26–29.
8. Kodur V. R., Khaliq W., Kand S. Effect of temperature on thermal and mechanical properties of steel bolts // Journal of Materials in Civil Engineering. 2012. Vol. 24. No. 6. P. 765–774. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000445.
9. Sun Xiao-ming, Zhang Yong, Wang Dong, Yang Jun, Xu Hui-chen, He Man-chao. Mechanical properties and supporting effect of CRLD bolts under static pull test conditions // International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. 2017. Vol. 24. 1–9. https://doi.org/10.1007/s12613-017-1372-y.
10. Li Guangde, Zhang Changrui, Hu Haifeng, Zhang Yudi. Preparation and mechanical properties of C/SiC nuts and bolts // Materials Science and Engineering: A. 2012. Vol. 547. P. 1–5. https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.03.045.
11. Yahyai M., Kodur V. R., Residual mechanical properties of high-strength steel bolts after exposure to elevated temperature // Journal of Materials in Civil Engineering. 2018. Vol. 30. Iss. 10. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002416.
12. Daryan A. S., Ketabdari H. Mechanical properties of steel bolts with different diameters after exposure to high temperatures // Journal of Materials in Civil Engineering. 2019. Vol. 31. Iss. 10. P. 04019221. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002865.
13. Ibrahim R. A., Pettit C. L. Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners // Journal of Sound and Vibration. 2005. Vol. 279. Iss. 3-5. P. 857–936. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.11.064.
14. Imamovic N., Hanafi M. Assessment of uncertainty quantification of bolted joint performance // Model Validation and Uncertainty Quantification: Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series / eds. R. Barthorpe, R. Platz, I. Lopez, B. Moaveni, C. Papadimitriou. Cham: Springer, 2017. Vol. 3. P. 145–157. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54858-6_15.
15. Shah V. N. Uncertainty of preloads in closure bolts for transportation casks for hazardous and radioactive materials // ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference (Chicago, Illinois, 27–31 July 2008). Chicago, Illinois, 2008. Vol. 7. P. 215–223. https://doi.org/10.1115/PVP2008-61360.
16. Lin Qingyuan, Zhao Yong, Sun Qingchao, Chen Kunyong. Reliability evaluation method of anti-loosening

performance of bolted joints // Mechanical Systems and Signal Processing. 2022. Vol. 162. P. 108067. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108067.
17. Zhao Yongsheng, Fu Huirong, Wang Lixia, Wu Hongchao, Li Shunlei. Research on design method of time-varying uncertainty of bolted connections // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 612. Iss. 3. P. 032077. https://doi.org/10.1088/1757-899X/612/3/032077.
18. Zhang Lin, Wang Meng, Zhao Hongbo, Chang Xu. Uncertainty quantification for the mechanical behavior of fully grouted rockbolts subjected to pull-out tests // Computers and Geotechnics. 2022. Vol. 145. P. 104665. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104665.
19. Ruan M. The variability of strains in bolts and the effect on preload in jointed structure. Houston, Texas, 2019.
20. Benmokrane B., Xu Haixue, Bellavance E. Bond strength of cement grouted glass fibre reinforced plastic (GFRP) anchor bolts // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1996. Vol. 33. Iss. 5. P. 455–465. https://doi.org/10.1016/0148-9062(96)00006-X.
21. Петров В. А., Хамханова Д. Н. Оценивание неопределенности измерений при поверке вольтметра Э8030-М1 // Образование и наука. Секция: Обеспечение и контроль качества продукции и услуг: матер. Национальной науч.-практ. конф. (г. Улан-Удэ, 15 апреля 2021 г.). Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2021. С. 33–38.
22. Петров В. А., Хамханова Д. Н. Оценивание неопределенности измерений при поверке вольтметра Д5081 // Образование и наука. Секция: Обеспечение и контроль качества продукции и услуг: матер. Национальной науч.-практ. конф. (г. Улан-Удэ, 15 апреля 2021 г.). Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2021. С. 4–10.
23. Хамханова Д. Н., Сундарон Э. М. Источники неопределенности при поверке мерной стеклянной колбы // Advances in Science and Technology: сб. ст. XXVI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 31 января 2020 г). Москва: ООО «Актуальность.РФ», 2020. Т. I. С. 157–159.
24. Зандраев А. Б., Хамханова Д. Н. Оценивание неопределенности измерений при поверке весов электронных ЕТ-1200-Е // Качество как условие повышения конкурентоспособности и путь к устойчивому развитию: материалы Региональной науч.-практ. конф. (г. Улан-Удэ, 26–28 ноября 2018 г.). Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2018. С. 68–74.

References

1. Paryshev D. N., Gerasimov V. Ja. Influence of length of bolts on durability at a stretching. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2009;6:14-15. (In Russ.).
2. Shapovalov V. V. Analysis of the use of bolts of various strength classes in industrial building steel frames. *Dni nauki studentov Vladimirskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Aleksandra Grigor'evicha i Nikolaya Grigor'evicha Stoletovyh: materialy nauchno-prakticheskih konferencij = Days of science of students of Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs*. 22 March – 9 April 2021, Vladimir. Vladimir: Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs; 2021, p. 594-602. (In Russ.).
3. Gul Yu. P., Ivchenko A. V., Kondratenko P. V., Perchun G. I. Comparative analysis of complex mechanical properties obtained in tests on finished bolts and turned samples. *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu*. 2015;4:132-141. https://doi.org/10.15802/STP2015/50121.
4. Gladshteyn L. I., Babushkin V. M. High-strength bolts of 12.9 strength class in assembly joints of building metal structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2011;6:37-39. (In Russ.).
5. Kutyaykin V. G., Gorbachev P. A. Estimation of uncertainty in determining the strength of materials' characteristics. *Kompetentnost' = Competency*. 2021;7:16-20. (In Russ.). https://doi.org/10.24412/1993-8780-2021-7-16-20.
6. Odesskij P. D. Advanced requirements for the northern version of high-strength bolts for assembly joints of metal structures. *Vestnik NIC "Stroitel'stvo" = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2017;3:155-162. (In Russ.).
7. Gorickij V. M., Guseva I. A., Sotskov N. I., Guk V. O. Quality comparison of high-strength bolts of 12.9 strength class produced by various manufacturers. *Krepezh, klei, instrument i… = Fasteners, Adhesives, Tools and...* 2013;2:26-29. (In Russ.).
8. Kodur V. R., Khaliq W., Kand S. Effect of temperature on thermal and mechanical properties of steel bolts. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2012;24(6):765-774. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000445.
9. Sun Xiao-ming, Zhang Yong, Wang Dong, Yang Jun, Xu Hui-chen, He Man-chao. Mechanical properties and supporting effect of CRLD bolts under static pull test conditions. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials.* 2017;24:1-9. https://doi.org/10.1007/s12613-017-1372-y.
10. Li Guangde, Zhang Changrui, Hu Haifeng, Zhang Yudi. Preparation and mechanical properties of C/SiC nuts and bolts. *Materials Science and Engineering: A.* 2012;547:1-5. https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.03.045.
11. Yahyai M., Kodur V. R., Residual mechanical properties of high-strength steel bolts after exposure to elevated temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2018;30(10). https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002416.
12. Daryan A. S., Ketabdari H. Mechanical properties of steel bolts with different diameters after exposure to high temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2019;31(10):04019221.
https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002865.
13. Ibrahim R. A., Pettit C. L. Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners. *Journal of Sound and Vibration*. 2005;279(3-5):857-936. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.11.064.
14. Imamovic N., Hanafi M. Assessment of uncertainty

quantification of bolted joint performance. In: Barthorpe R., Platz R., Lopez I., Moaveni B., Papadimitriou C. (eds.). *Model Validation and Uncertainty Quantification: Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Cham: Springer; 2017, vol. 3, p. 145-157. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54858-6_15.
15. Shah V. N. Uncertainty of preloads in closure bolts for transportation casks for hazardous and radio-active materials. In: *ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference*. 27–31 July 2008, Chicago, Illinois. Chicago, Illinois; 2008, vol. 7, p. 215-223. https://doi.org/10.1115/PVP2008-61360.
16. Lin Qingyuan, Zhao Yong, Sun Qingchao, Chen Kunyong. Reliability evaluation method of anti-loosening performance of bolted joints. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022;162:108067. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108067.
17. Zhao Yongsheng, Fu Huirong, Wang Lixia, Wu Hongchao, Li Shunlei. Research on design method of time-varying uncertainty of bolted connections. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;612(3):032077. https://doi.org/10.1088/1757-899X/612/3/032077.
18. Zhang Lin, Wang Meng, Zhao Hongbo, Chang Xu. Uncertainty quantification for the mechanical behavior of fully grouted rockbolts subjected to pull-out tests. *Computers and Geotechnics*. 2022;145:104665. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104665.
19. Ruan M. *The variability of strains in bolts and the effect on preload in jointed structure*. Houston, Texas; 2019.
20. Benmokrane B., Xu Haixue, Bellavance E. Bond strength of cement grouted glass fibre reinforced plastic (GFRP) anchor bolts. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1996;33(5):455-465. https://doi.org/10.1016/0148-9062(96)00006-X.
21. Petrov V. A., Khamkhanova D. N. Estimation of measurement uncertainty when checking the E8030-M1 voltmeter. In: *Obrazovanie i nauka. Sekciya: Obespechenie i kontrol' kachestva produkcii i uslug: materialy Nacional'noj nauchno-prakticheskoj konferencii = Education and Science*. Section: Quality management of products and services: materials of the National scientific and practical conference. 15 April 2021, Ulan-Ude. Ulan-Ude: Siberia State University of Technology and Management; 2021, p. 33-38. (In Russ.).
22. Petrov V. A., Khamkhanova D. N. Estimation of measurement uncertainty when checking the D5081 voltmeter. In: *Obrazovanie i nauka. Sekciya: Obespechenie i kontrol' kachestva produkcii i uslug: materialy Nacional'noj nauchno-prakticheskoj konferencii = Education and Science. Section: Quality management of products and services: materials of the National scientific and practical conference.* 15 April 2021, Ulan-Ude. Ulan-Ude: Siberia State University of Technology and Management; 2021, p. 4-10. (In Russ.).
23. Khamkhanova D. N., Sundaron E. M. Sources of uncertainty when verifying a volumetric glass bulb. In: *Advances in Science and Technology: sbornik statej XXVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii = Collected articles of the 26th International scientific and practical conference*. 31 January 2020, Moscow. Moscow: OOO “Aktual'nost'. RF”; 2020, vol. 1, p. 157-159. (In Russ.).
24. Zandraev A. B., Khamkhanova D.N. Estimation of measurement uncertainty when verifying ET-1200-E electronic scales. In: *Kachestvo kak uslovie povysheniya konkurentosposobnosti i put' k ustojchivomu razvitiyu: materialy Regional'noj nauchno-prakticheskoj konferencii = Quality as a condition for increasing competitiveness and the path to sustainable development: materials of the regional scientific and practical conference.* 26–28 November 2021, Ulan-Ude. Ulan-Ude: Siberia State University of Technology and Management; 2018, p. 68-74. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хамханова Дарима Нимбуевна,
доктор технических наук, доцент,
доцент кафедры «Стандартизация, метрология и управление качеством»,
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
670033, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В, стр. 1,
Россия

Хадыков Михаил Томович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Стандартизация, метрология и управление качеством»,
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
670033, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В, стр. 1,
Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Darima N. Khamkhanova,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Standardization, Metrology and Quality Management,
East Siberia State University of Technology and Management,
40B, Klyuchevskaya St., bldg.1, Ulan-Ude 670033,
Russia

Mikhail T. Khadykov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Standardization, Metrology and Quality Management,
East Siberia State University of Technology and Management,
40B, Klyuchevskaya St., bldg.1, Ulan-Ude 670033,
Russia

Мосоров Владимир Иванович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Металловедение и технологии обработки материалов»,
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
670033, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В, стр. 1,
Россия

Бахрунов Константин Константинович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Металловедение и технологии обработки материалов»,
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
670033, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В, стр. 1,
Россия

Vladimir I. Mosorov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Metallurgical Science and Material Processing Technologies,
East Siberia State University of Technology and Management,
40B, Klyuchevskaya St., bldg.1, Ulan-Ude 670033,
Russia

Konstantin K. Bakhrunov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Metallurgical Science and Material Processing Technologies,
East Siberia State University of Technology and Management,
40B, Klyuchevskaya St., bldg.1, Ulan-Ude 670033,
Russia

Вклад авторов
Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors
The authors contributed equally to the preparation of the article.

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests
The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье
Статья поступила в редакцию 07.11.2022; одобрена после рецензирования 30.11.2022; принята к публикации 21.11.2022.

Information about the article
The article was submitted 07.11.2022; approved after reviewing 30.11.2022; accepted for publication 21.11.2022.