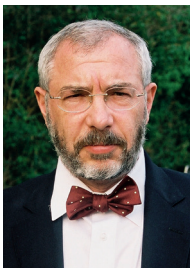

Шубочкин А.Е.


Зусман Г.В.


Кантер Б.М.


Прилуцкий М.А.

УДК 621.791.05: 620.179.1: 620.1.08

Шубочкин А.Е., д-р техн. наук,
Зусман Г.В., д-р техн. наук,
Кантер Б.М., д-р техн. наук
ЗАО «НИИИН МНПО «СПЕКТР»

Прилуцкий М.А., канд. техн. наук
МГТУ им. Н.Э. Баумана

sae@niiin.ru

О ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШАБЛОНОВ

В статье подробно рассмотрены технические возможности наиболее известных универсальных шаблонов импортной разработки типа WG-1 и BRIDGE CAM, применяемых при проведении визуального и измерительного контроля для определения геометрических параметров сварного соединения и обнаруженных поверхностных несплошностей.

Продемонстрировано, что упомянутые шаблоны не позволяют обеспечить требования действующих в РФ нормативных документов к допускаемой погрешности измерений. Применяемый же продавцами данных шаблонов термин «погрешность измерений» на самом деле является лишь частью инструментальной погрешности этих средств контроля.

В статье приводится пример необходимого расчета для определения расширенной неопределенности, обязательного при калибровке шаблонов.

Ключевые слова: визуальный и измерительный контроль, сварные соединения, универсальный шаблон, погрешность измерения, расширенная неопределенность

The article gives the detailed description of technical capabilities of the well-known universal gauges of foreign design such as WG-1 and BRIDGE CAM, used in visual and measuring control to determine the geometric parameters of the welded joint and detected surface discontinuities.

It is shown that the considered calibers can't ensure the requirements of the normative documents, which are in force in the Russian Federation, to the permissible measurement error. The term «measurement error» used by the sellers of these universal gauges is in fact only the part of instrumental error of these control means.

The article shows the example of necessary calculation to determine the expanded uncertainty required for calibration of universal gauges.

Keywords: visual and measuring control, welded joints, universal gauge, measurement error, expanded uncertainty

Введение. Сегодня, действующие нормативные документы ([1], [2], [3], [4]) в области визуального и измерительного неразрушающего контроля (ВИК) устанавливают требования к допускаемой погрешности измерений геометрических параметров сварного соединения и обнаруженных поверхностных несплошностей [5]. Например, согласно [2] при величине измеряемого параметра (глубина подреза, смещение кромок и пр.) до 10,0 мм погрешность измерения не должна превышать 0,1 мм.

В соответствии с [6] под погрешностью понимают разность между измеренным и опорнымзначением величины (в нашем случае истинное значение величины — значение, которое идеальным образом определяет величину при тех условиях, при которых эту величину рассматривают [7], [8]). Допускаемая погрешность измерения состоит из случайной и неучтенной систематических погрешностей измерения [9] и включает погрешности от средств измерений, установочных мер, температурных деформаций, измерительного усилия, базирования детали.

Размеры, по которым производится приемка изделий, следует, в соответствии с [10], устанавливать с учетом влияния допускаемой погрешности измерений. При назначении критериев отбраковки по результатам измерительного контроля учитываются нетолько влияние отклонений формы и величины поверхностных дефектов на функциональные свойства продукции и другие значимые для разработчика (конструктора, проектировщика) факторы, но и возможные погрешности измерений. Другими словами, предельно допускаемый размер включает в себя погрешность измерений. Применение средств контроля и методик, не позволяющих обеспечить регламентированную погрешность измерений является причиной для ужесточения норм отбраковки.

На практике принятые руководящие документы и стандарты, регулирующие нормы отбраковки, не допускают вариативность в данном вопросе, а значит и возможность применения таких средств контроля исключена!

В связи с изложенным, особую актуальность приобретает вопрос корректного выбора средств, применяемых при проведении визуального и измерительного контроля качества сварных соединений.

Применяемые на практике универсальные шаблоны сварщиков и специалистов неразрушающего контроля. В основном, измерения геометрических параметров сварного соединения и обнаруженных поверхностных несплошностей

выполняются при помощи многочисленных шаблонов, что объясняется универсальностью данных средств и простотой их применения. Стоит обратить внимание, что большинство шаблонов имеют импортное происхождение и изготовлены, в основном, в КНР. Далее приведем краткий обзор наиболее популярных шаблонов, их характеристик и особенностей.

Группа шаблонов, представленных на рынке под названиями WG01, WG1, WG2, WG2+, HJC40 и так далее. У разных производителей один и тот же шаблон может иметь различное название, но принцип работы и основные параметры у них идентичны. Конструктивно шаблон состоит из основания с нанесенной сбоку линейкой; двунаправленной шкалой в центре и нониуса, на оборотной стороне нанесены угловые шкалы в мм и в градусах; оси с угломером с нанесенной шкалой зазора (рис. 1).

Метрологические характеристики данных шаблонов, заявленные производителями/поставщиками [10, 12, 13] приведены в табл. 1.

Представленные характеристики вызывают ряд вопросов, особенно в отношении погрешности измерений. Например, из табл. 1 следует, что при помощи линейки можно обеспечить погрешность ±0,1 мм. Очевидно, что речь идет вовсе не о погрешности измерения по [9]. Что же имеется в виду? В ГОСТ Р ИСО 17637-2014 «Контроль неразрушающий. Визуальный контроль соединений, выполненных сваркой плавлением» [14] перечислены применяемые измерительные устройства и шаблоны, в том числе и шаблон WG. В графе «Точность» таблицы А.1 приводятся значения величин, соответствующие значениям столбца «Погрешность» в табл. 1. Согласно [15] термин точность (accuracy) — это «степень близости результата измерений к принятому опорному значению». Но миллиметровая линейка не может обеспечить точность ±0,1 мм. При рассмотрении первоисточника, международного стандарта ISO 17637 [16], на основе которого разработан [14], данный параметр называется «reading accuracy» и переводится он всеми техническими англо-русскими словарями, как: 1) точность считывания (данных); 2) точность отсчета (прибора).

Действительно, для шкал, выполненных, к примеру, по ГОСТ 5365-83 [17] предполагается возможность интерполяционной оценки измеряемой величины вплоть до одной десятой от шага отметок шкалы. Однако достижима такая точность, обычно лишь в лабораторных условиях и, зачастую, при использовании увеличительных линз или дополнительных эталонных шкал [18]. Точность считывания данных по шкале определяет лишь часть инструментальной погрешности измерения [19, 20] и зависит от:

– погрешности интерполяции (отсчитывания) — составная часть погрешности отсчитывания, происходящая от недостаточного точного отсчитывания на глаз доли деления шкалы, соответствующей положению указателя;

– погрешность от параллакса — составная часть погрешности отсчитывания, обусловлена в том, что взгляд наблюдателя, линия визирования не являются нормалью к поверхности.

Инструментальные погрешности — это погрешности, вызываемые особенностями свойств средств измерений и индивидуальна для каждого из них. Они возникают вследствие недостаточно высокого качества элементов. К этим погрешностям можно отнести изготовление и сборку элементов средств измерений; погрешности из-за недостаточной жесткости его элементов и деталей и др.

Таким образом, в паспортах рассматриваемых шаблонов приводится лишь часть инструментальной погрешности, достижимой только в лабораторных условиях! Для сравнения следует привести ГОСТ Р 50.05.08-2018 [21] в «приложении Б» которого для шаблонов WG1, WG2, MG8 в графе «Погрешность измерения» заявляется лишь цена деления их шкал равная 1 мм.

В комплект к шаблонам, приобретаемым из-за рубежа, прикладывается оригинальный паспорт либо инструкция. В этих документах рассматриваемая графа может называться «Indicating allowance» или «Tolerance», что переводится, как допуск отображения, а в отечественных ГОСТ, к примеру [22], именуется «допустимым отклонением» — максимально допустимое отклонение от номинальных значений длины шкалы и расстояний между любым штрихом (отметкой) и началом или концом шкалы.

Более того, допустимое отклонение нониуса шкалы WG с диапазоном измерения [0…6 мм] по этим документам соот-

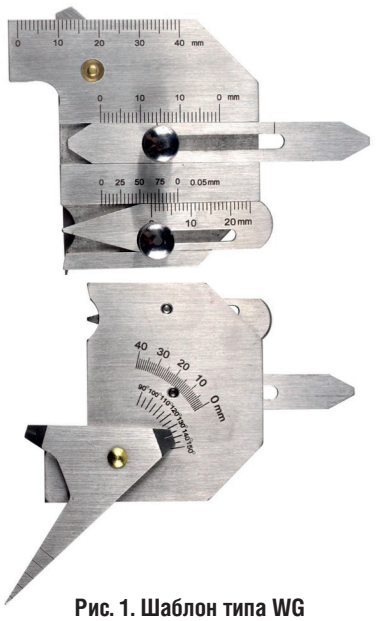


Рис. 1. Шаблон типа WG

Таблица 1

Технические характеристики шаблона WG1

Функция	Диапазон, мм	Разрешение, мм	Погрешность, мм
Использование как линейки	0…50	1	±0,1
Измерение смещения	0…15 0…5	1 0,05	±0,2 ±0,1
Измерение угла кромки	80°…60°	5°	±0,3′
Измерение величины зазора	0…6	1	±0,2
Измерение угла раскрытия Х-шва 60°	60°	5°	±0,3′
Измерение угла раскрытия Х-шва 70°	70°	5	±0,3′
Измерение высоты стыкового шва	0…15	1	±0,2
Измерение углового шва			
Измерение высоты углового шва (катет)	0…15	1	±0,2
Измерение ширины шва	0…40	1	±0,1
Измерение глубины подреза	0…5	0,05	±0,1

ветствует допуску изготовления обычной 30 сантиметровой металлической линейки. Такой значительный допуск на изготовление шкал шаблона объясняется следующим. Он нужен их производителю, вероятно, для того, чтоб шаблон, не обеспечивающий требуемую точность измерения, проходил калибровку и соответствовал техническим условиям на их изготовление. Таким образом, в документации к шаблонам типа WG, приводятся не погрешность измерений при измерительном контроле, регламентированная в [1], [2], [3], [4], а лишь части инструментальной погрешности шаблона. Данный факт можно связать с попыткой «выполнить» нормативные требования.

Также следует обратить внимание на то, что применение шаблонов для измерения геометрических параметров сварных соединений и поверхностных несплошностей метрологически не обосновано по причине отсутствия методик выполнения измерения. Более того, в отдельных инструкциях для шаблонов типа WG приведены схемы измерений, производимые с использованием шкалы нониуса, для следующих параметров:

– чешуйчатость шва;
– высота усиления стыкового шва;
– выпуклость корня шва;
– западание между валиками;
– смещение кромок (при установке шаблона со стороны поверхности, расположенной ниже).

Рассмотрим шкалу с нониусом шаблонов WG подробнее (рис. 2).

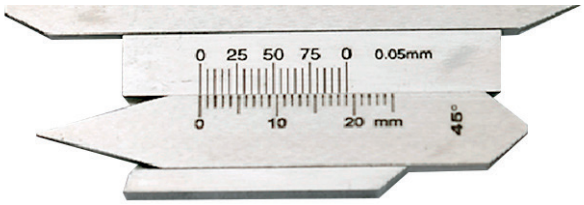


Рис. 2. Шкала с нониусом шаблона типа WG

На щупе нанесена линейка с миллиметровым шагом между отметками. На основании нанесена шкала нониуса, двадцать делений которой соответствует 19 мм.

На представленной фотографии 20-я отметка нониуса и 19-я линейки не совпадают, что и является примером части инструментальной погрешности шаблона, описанной выше, однако, согласно паспорта на шаблон, «соответствует» заявленной точности ее изготовления ±0,1 мм.

Тем не менее шаг измерения такой шкалы равен 1мм/20 = 0,05мм. Диапазон измерения такой шкалы равен при смещении линейки влево: от 0 до 6 мм с шагом 0,05 мм, после этого нониус выходит за границу линейки и от 6 мм измерения проводятся с шагом 1 мм. Данная шкала с нониусом является однонаправленной, т.е. измерения с ее помощью проводятся только при смещении подвижной линейки влево. При смещении вправо считывание показаний затруднительно, так как требует нетривиального пересчета, который не приведен ни в одном из документов шаблонов типа WG.

А ведь все измерения параметров, перечисленных выше, предполагают смещение измерительной линейки вверх (на рис. 2 вправо) и не осуществимы шаблоном (рис. 3).

По мнению авторов статьи, следует обратить внимание на характерные недостатки изготовления шаблонов типа WG напрямую влияющих на погрешность измерения и не проверяемых при проведении калибровки.

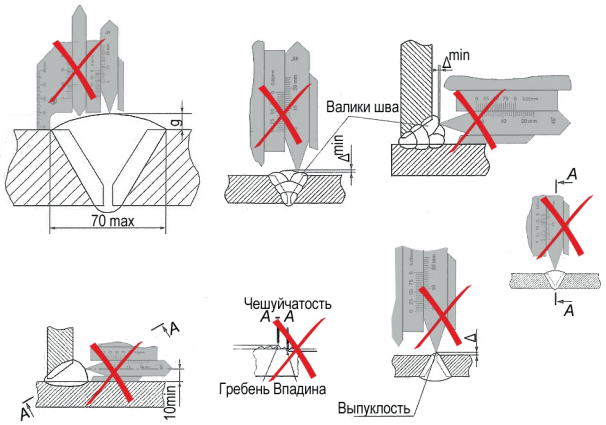


Рис. 3. Ложные (нереализуемые) схемы измерений шаблонов типа WG1

1. При измерении ширины с применением универсального измерителя следует проверить нулевую точку, совместив острие иглы с углом шаблона (рис. 4, *а*). При их несовпадении использование шкалы теряет смысл (рис. 4, *б*). Дефект возникает, в частности, из-за погрешности изготовления отверстий шаблона, и вносит максимальную погрешность при измерении малых величин.

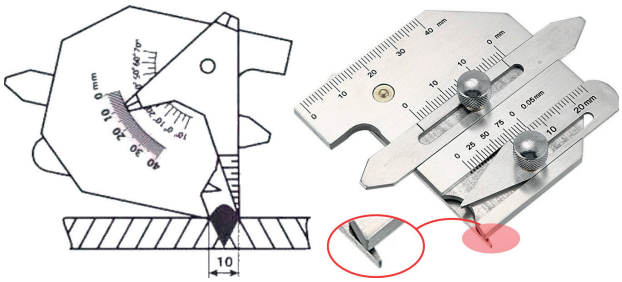


Рис. 4. Предлагаемая схема измерения ширины шва (*а*) и дефект изготовления универсального измерителя (*б*), исключающий возможность ее реализации

2. Для того что бы добиться совпадения нуля у шкалы с нониусом при изготовлении шаблона часто применяется шлифовка ряда поверхностей шаблона. При этом возникают неплоскостность и/или овальность, что так же увеличивает систематическую ошибку измерения, и не проверяется при калибровке шаблона (рис. 5).

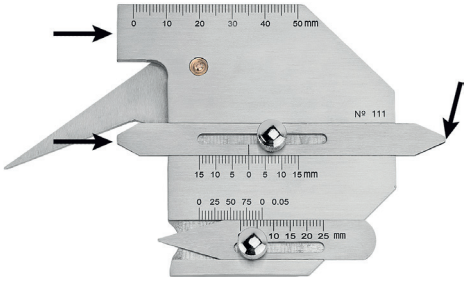


Рис. 5. Плоскости, подвергаемые шлифованию (показаны стрелками)

3. Зазоры между измерительными подвижными элементами и основанием должны быть минимальными, для исключения перекоса и минимизации инструментальной погрешности шаблона.

4. Качество изготовления шкалы с нониусом. Для определения ее максимальной погрешности следует проверить измерения величин на конце шкалы, т.е. произвести измерение объекта с известным габаритом около 5,9 мм.

На основании изложенного, можно сделать вывод, что шаблоны типа WG не соответствуют требованиям действующих стандартов при ВИК сварных соединений.

Другой многофункциональный шаблон, реализуемый под названиями «Измеритель «BridgeCam» или «Cambridgegauge» нескольких модификаций, не имеет шкал с нониусом и также не может обеспечить требований стандартов [1], [2], [3], [4]. Появившиеся в последнее время на рынке шаблоны данного типа от различных производителей с двусторонними шкалами воспринимаются потребителями, как имеющие нониусы (встречаются шкалы, у которых 25 отметок шкалы подвижного элемента соответствуют 24 либо 26 отметкам основания (рис. 6), однако отсчет по этим шкалам производится относительно треугольных отметок, и, соответственно, имеют шаг в один мм.

В описании к шаблону типа «Bridgecam» также производится подмена понятия измерительной погрешности. Вместо нее приводятся допуски на изготовления шкал шаблона, либо точность отсчета по шкалам в лабораторных условиях. Следует и упомянуть значительные люфты деталей шаблонов данного типа, вызванные их конструктивными недостатками.

Другие шаблоны, представленные на рынке, такие как универсальный шаблон для стыковых швов УШС-3, УШС-4; шаблоны Ушерова-Маршака, Красовского, V-Wac, INOX, HI-LO имеют узкую область применения либо только миллиметровые шкалы и не могут в достаточной мере удовлетворить требованиям, предъявляемым к визуальному и измерительному контролю сварных конструкций и соединений. Многие схемы измерений нереализуемы вышеприведенными шаблонами и калибрами в принципе.

Таблица 2

Расширенная неопределенность

Расчет неопределенности	
Входные и расчетные данные	Обозначение
Среднее арифметическое результатов измерений	$\bar{l}_c$, мм
Оценка выходной величины	$\Delta = l_c - l_s + \Delta_o + \Delta_M + l_s \cdot \alpha \cdot \Delta_t$ мм, где Δ — основные источники неопределенности измерения (выходная величина); l_c, l_s — показания по шкале и номинальная длина используемой концевой меры; Δ_o — поправка на конечное разрешение; Δ_M — поправка на механические эффекты, такие как измерительное усилие, ошибки Аббе, отклонения от плоскостности и параллельности измерительных поверхностей; α — средний коэффициент теплового расширения материалов шаблона и концевой меры; Δ_t — разница температур между штангенциркулем и концевой мерой.
Средний коэффициент теплового расширения	α, $К^{-1}$
Цена деления шкалы	мм
Область отклонений механических эффектов	Δ_M, мм
Расширенная неопределенность эталона	u_S, мм
Неопределенность измерения типа А	$u_A(\bar{l}_c)$, мм
Стандартная неопределенность на конечное разрешение	$u(\Delta_o)$, мм
Стандартная неопределенность на механические эффекты	$u(\Delta_M)$, мм
Стандартная неопределенностьконцевой меры	$u(l_S)$, мм
Стандартная неопределенность разницы температур	$u(\Delta_t)$, мм
Коэффициент чувствительности	c_t, мм·$К^{-1}$
Суммарная стандартная неопределенность	$u(y)$, мм, где y — измеряемая величина
Эффективное число степеней свободы	ν_{eff}, определяется по формуле Велча-Саттерсвейта $\nu_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^{m} \frac{u_i^4}{\nu_i}}$
Коэффициент охвата	k
Расширенная неопределенность	$U = k \cdot xu(y)$, мм

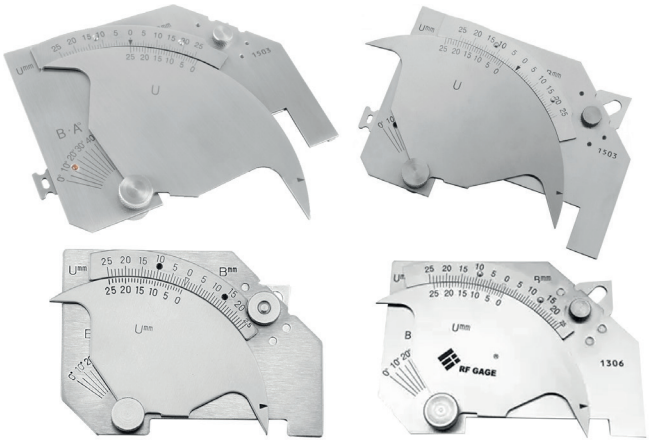


Рис. 6. Шаблоны типа BridgeCam с двумя шкалами

Метрологическое обеспечение средств измерения. После рассмотрения примеров заявленных характеристик представленных универсальных шаблонов следует привести и требуемые стандартами расчеты по определению метрологических характеристик.

На сегодняшний день основной характеристикой, по которой должна проводиться калибровка средств измерения является расширенная неопределенность [23, 24]. Рассчитывается расширенная неопределенность для нескольких точек таким образом, чтобы точки измерения лежали приблизительно на равном расстоянии друг от друга по шкале (например, 1 мм, 3 мм, 5 мм), а при использовании нониуса эти точки должны составлять различные значения шкалы нониуса (например, 0,3 мм, 0,6 мм, 0,9 мм). Таким образом, обеспечивается проверка не только основной линейки, но и качество изготовления шкалы нониуса.

Параметры необходимые для расчета расширенной неопределенности приведены в таблице 2.

Для примера можно привести рассчитанные значения для штангенциркуля с разрешением 0,05 мм составляет: U = 0,076 мм, а для миллиметровой линейки расширенная неопределенность составляет уже 1,48 мм.

Заключение. Рассмотренные в данной статье шаблоны и методики контроля с их использованием не удовлетворяют требованиям [1], [2], [3], [4] к погрешности измерения геометрических параметров сварного соединения и обнаруженных поверхностных несплошностей.

В большинстве случаев низкое качество изготовления шаблонов, (в основном импортного производства) значительно влияет на их инструментальную погрешность. Однако заявленная в паспортах этих шаблонов погрешность изготовления позволяет им проходить калибровку. Калибровка на эти шаблоны лишь подтверждает их соответствие заниженным требованиям на точность изготовления и не выполняет требований метрологии по определению погрешности измерения, включающую расширенную неопределенность.

В документации производителей и на сайтах поставщиков производится подмена погрешности измерения шаблонов серий «WG-1», «BridgeCam» и др. на часть их инструментальной погрешности, а именно точности считывания шкал в лабораторных условиях или на допустимое отклонение шкал. Именно это позволяет предлагать потребителю шаблоны серий «WG-1», «BridgeCam» и другие, для решения задач контроля качества сварных соединений в соответствии с [1], [2], [3], [4].

Список литературы

1. *РД* 03-606-03. Инструкция по визуальному и измерительному контролю.
2. *РД*-25.160.10-КТН-016-15 (с изм. №1 от 21.12.2017). Неразрушающий контроль сварных соединений при строительстве и ремонте магистральных трубопроводов.
3. *СТО* Газпром 2-2.4-083-2006. Инструкция по неразрушающим методам контроля качества сварных соединений при строительстве и ремонте промысловых и магистральных газопроводов.
4. *РБ* 089-14. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Визуальный и измерительный контроль».
5. *Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф., Быстрова Н.А., Галкин Д.И.* Основы диагностики технических устройств и сооружений: монография / Г.А. Бигус, Ю.Ф. Даниев, Н.А. Быстрова, Д.И. Галкин. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 448 с.
6. *РМГ* 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.
7. *ГОСТ* Р 50779.10-2000 (ИСО 3534.1-93) Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения.
8. *ISO* 3534-1:1993 Statistics-Vocabulary and symbols. Part 1: Statistical methods. Terms and definitions.
9. *ГОСТ* 8.051-81 (СТ СЭВ 303-76) Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм.
10. *РД* 50-98-86 Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм (По применению ГОСТ 8.051-81)
11. *Сайт* «Комплекс средств неразрушающего контроля NDTrade», Универсальный измеритель для сварных соединений WG1, URL: http://www.ndtrade.ru/page194.html (дата обращения 07.10.2019).
12. *Сайт* «Приборы и средства НК ЭкспертНК», WG1 — универсальный измеритель для сварных соединений, URL: https://www.expertnk.ru/catalog/visual-optical-control/sets/wg1.html (дата обращения 07.10.2019).
13. *Сайт* «NDTesting. Приборы для неразрушающего контроля», https://ndtesting.ru/wg1/ (дата обращения 13.10.2019).
14. *ГОСТ* Р ИСО 17637-2014 Контроль неразрушающий. Визуальный контроль соединений, выполненных сваркой плавлением.
15. *ГОСТ* Р ИСО 5725-1-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения.
16. *Non-destructive* testing of welds — Visual testing of fusion-welded joints (ISO 17637:2016(03)).
17. *ГОСТ* 5365-83. Приборы электроизмерительные. Циферблаты и шкалы. Общие технические требования (с Изменениями № 1, 2)
18. *Данилов А.А.* Об отсчете показаний стрелочных приборов. М: Главный метролог, 2010. № 2.

19. *ГОСТ* 16263-70 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Метрология. Термины и определения.
20. *ГОСТ* 8.009-84 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
21. *ГОСТ* Р 50.05.08-2018 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Унифицированные методики. Визуальный и измерительный контроль.
22. *ГОСТ* 427-75 Линейки измерительные металлические. Технические условия (с Изменениями № 1, 2, 3)
23. *ГОСТ* Р 54500.1-2011 Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководства по неопределенности измерения.
24. *ГОСТ* Р 54500.3-2011 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.
25. *РМГ* 43-2001 ГСИ. Применение Руководства по выражению неопределенности измерений.