



Обозначение: E92 – 16

---

**Стандартные методы испытаний металлических материалов на твердость по Виккерсу и Кнупу**

**Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials**

Перевод настоящего стандарта осуществлен ООО «Нормдокс» с официального разрешения Американского общества по материалам и их испытаниям (ASTM) 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428, USA.

ASTM не утверждает и не подтверждает данный перевод, и только английская версия, опубликованная со знаком копирайта ASTM, может рассматриваться как оригинальная версия.

Воспроизведение данного перевода возможно только с разрешения ASTM.

Translation of this standard has been made by Normdocs OOO under the official permission from the American Society for Testing and Materials (ASTM), 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428, USA.

ASTM does not confirm or approve this translation, and only the English version as published and copyrighted by ASTM can be considered as the original version.

Reproduction of this translation is possible by authority of ASTM only.



## Стандартные методы испытаний металлических материалов на твердость по Виккерсу и Кнупу<sup>1</sup>

Настоящий стандарт выпускается под неизменным обозначением E92; номер, следующий непосредственно за обозначением, указывает на год исходного выпуска или, в случае пересмотра, на год последнего пересмотра. Номер в скобках указывает на год последнего повторного утверждения. Надстрочный индекс с буквой эpsilon ( $\epsilon$ ) указывает на наличие редакторских правок с момента выпуска последнего пересмотра или повторного утверждения.

*Настоящий стандарт был утвержден к применению ведомствами Министерства обороны США.*

### 1. Область применения

1.1 Настоящие методы испытаний охватывают определение твердости по Виккерсу и Кнупу на металлических материалах согласно принципам определения твердости вдавливанием по Виккерсу и Кнупу. Настоящий стандарт предоставляет требования к твердомерам и процедурам по проведению испытаний на твердость по Виккерсу и Кнупу.

1.2 Настоящий стандарт включает дополнительные требования, изложенные в дополнениях:

Верификация твердомеров по Виккерсу и Кнупу	Дополнение A1
Твердомеры по Виккерсу и Кнупу для аттестации	Дополнение A2
Аттестация инденторов по Виккерсу и Кнупу	Дополнение A3
Аттестация мер твердости по Виккерсу и Кнупу	Дополнение A4
Поправочные коэффициенты для испытаний на твердость по Виккерсу, выполняемых на сферических и цилиндрических поверхностях	Дополнение A5

1.3 Настоящий стандарт включает необязательную информацию в приложении, которая относится к испытаниям на твердость по Виккерсу и Кнупу:

Примеры процедур для установления неопределенности определения твердости по Виккерсу и Кнупу	Приложение X1
--	---------------

1.4 Настоящий метод испытания охватывает испытания на твердость по Виккерсу, выполняемые с использованием испытательных нагрузок, изменяющихся от  $9,07 \times 10^{-3}$  Н до 1176,80 Н (от 1 гс до 120 кгс), и испытания на твердость по Кнупу, выполняемые с использованием испытательных нагрузок, изменяющихся от  $9,807 \times 10^{-3}$  Н до 19,613 Н (от 1 гс до 2 кгс).

1.5 Дополнительную информацию, касающуюся процедур и руководства для проведения испытаний в диапазоне нагрузки микровдавливания (нагрузки  $\leq 1$  кгс) можно найти в Методе испытания E384, Метод испытания материалов на микротвердость.

1.6 *Единицы измерения* — Когда были разработаны испытания на твердость по Виккерсу и Кнупу, уровни нагрузок рассчитывались в единицах измерения грамм-сила (гс) и килограмм-сила (кгс). Настоящий стандарт устанавливает единицы измерения силы и длины в Международной системе единиц (СИ); т.е., сила — в Ньютонах (Н), а длина — в мм или мкм. Однако в силу исторических причин и продолжительного общего употребления, для информации приводятся значения

силы в гс и кгс, а также в большей части исследования в настоящем стандарте и в методе внесения в отчет результатов испытания, применяются данные единицы измерения.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 — Числа твердости по Виккерсу и Кнупу изначально в отношении испытательной нагрузки были установлены в единицах измерения килограмм-сила (кгс), в отношении площади поверхности или площади проекции — в квадратных миллиметрах ( $\text{мм}^2$ ). В настоящее время числа твердости определены на международном уровне в единицах измерения СИ, т.е., испытательная нагрузка — в Ньютонах (Н). Однако на практике наиболее распространенными в употреблении единицами измерения силы являются килограмм-сила (кгс) и грамм-сила (гс). Если используются единица измерения Ньютон, то силу необходимо разделить на коэффициент пересчета 9,80665 Н/кгс.

1.7 Принципы проведения испытаний, процедуры проведения испытаний и процедуры верификации преимущественно являются идентичными для испытаний на твердость как по Виккерсу, так и по Кнупу. Значительными различиями между двумя испытаниями являются геометрические параметры соответствующих инденторов, метод расчета числа твердости, а также тот факт, что твердость по Виккерсу может использоваться при более высоких уровнях нагрузок, чем твердость по Кнупу.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 — Несмотря на то, что Комитет E28 изучает главным образом металлические материалы, описанные процедуры испытания применяются и к другим материалам. Другие материалы могут требовать соответствия особым примечаниям, например, см. C1326 и C1327 для испытаний керамики.

1.8 *Настоящий стандарт не ставит целью описание всех проблем безопасности, если они имеются, связанных с его использованием. В обязанности пользователя настоящего стандарта входит определение надлежащих методов техники безопасности и охраны труда, а также определение применимости нормативных ограничений перед его использованием.*

### 2. Ссылочные документы

#### 2.1 Стандарты ASTM:<sup>2</sup>

C1326 Метод испытания твердости на вдавливание по Кнупу для высококачественной керамики

C1327 Метод испытания твердости на вдавливание по Виккерсу для высококачественной керамики

E3 Руководство по подготовке металлографических образцов

E6 Терминология, касающаяся методов механических испытаний

E7 Терминология, касающаяся металлографии

<sup>1</sup> Настоящие методы испытания находятся в ведении Комитета ASTM E28, Механические испытания, а непосредственную ответственность за него несет Подкомитет E28.06 по испытаниям на твердость на вдавливание.

Настоящая редакция была утверждена 1 февраля 2016 г. Опубликована в апреле 2016 г. Первоначально утверждена в 1952 г. Предпоследняя редакция утверждена в 2003 г. под обозначением E92-82(2003) $\epsilon$ 2, которая была отменена

<sup>2</sup> Для ознакомления с упомянутыми стандартами ASTM посетите сайт ASTM, [www.astm.org](http://www.astm.org), или свяжитесь со Службой заказчиков ASTM по адресу [service@astm.org](mailto:service@astm.org). Для получения информации по *Ежегодному сборнику стандартов ASTM* обратитесь к сводной странице по стандартам на веб-сайте ASTM.

E29 Практическое руководство по использованию значащих цифр в данных по испытаниям для определения соответствия техническим условиям

E74 Практическое руководство по калибровке силоизмерительных приборов для верификации индикации нагрузки испытательных твердомеров

E140 Переводные таблицы между твердостью металлов по Бринеллю, по Виккерсу, по Роквеллу, по Кнупу, по склероскопу и поверхностной твердостью

E175 Терминология, касающаяся микроскопии

E177 Практическое руководство по использованию терминов прецизионность и смещение в Методах испытаний ASTM

E384 Метод испытаний материалов на твердость по Кнупу и Виккерсу

E691 Практическое руководство по проведению межлабораторных исследований для определения прецизионности результатов испытаний

### 2.2 Стандарты ISO.<sup>3</sup>

ISO 6507-1 Металлические материалы. Испытание на твердость по Виккерсу. Часть I: Метод испытания

ISO/IEC 17011 Оценка соответствия. Общие требования к органам по аккредитации, аккредитующим органы по оценке соответствия

ISO/IEC 17025 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий

## 3. Терминология и уравнения

3.1 *Определения и термины* — Для получения стандартных определений терминов, использованных в настоящем методе испытания, см. Терминологию E6 и Терминологию E7.

3.1.1 *твердость на вдавливание* — твердость, оцениваемая измерениями площади или глубины отпечатка, при внедрении определенного индентора в поверхность материала при определенных статических приложениях нагрузки.

3.1.2 *число твердости по Кнупу, НК* — результат, вычисленный из испытания на твердость по Кнупу, являющийся пропорциональным испытательной нагрузке, длительно прилагаемой на индентор по Кнупу, разделенной на площадь проекции отпечатка после снятия испытательной нагрузки.

3.1.2.1 *Пояснение* — Площадь отпечатка после длительного воздействия индентора по Кнупу, вычисляется частично на основе измеренной длины длинной диагонали площади отпечатка.

3.1.3 *Определение твердости по Кнупу* — испытание на твердость вдавливанием, в котором ромбический пирамидальный алмазный индентор по Кнупу, имеющий определенные углы между гранями, при определенных условиях вдавливается в поверхность испытываемого материала, и, после снятия испытательной нагрузки, измеряется длина длинной диагонали площади проекции отпечатка для вычисления числа твердости по Кнупу.

3.1.4 *Число твердости по Виккерсу, HV* — результат, вычисленный из испытания на твердость по Виккерсу, являющийся пропорциональным испытательной нагрузке, прилагаемой на индентор по Виккерсу, разделенной на площадь поверхности отпечатка после снятия испытательной нагрузки.

3.1.4.1 *Пояснение* — Площадь поверхности отпечатка, полученного при вдавливании индентора по Виккерсу, вычисляется частично на основе измеренной средней длины двух диагоналей площади проекции отпечатка.

3.1.5 *определение твердости по Виккерсу* — испытание на твердость вдавливанием, в котором пирамидальный алмазный прямоугольной формы индентор по Виккерсу, имеющий определенные плоские углы, при определенных условиях вдавливаются в поверхность испытываемого материала, и, после снятия испытательной нагрузки, измеряются длины двух диагоналей площади проекции отпечатка для вычисления числа твердости по Виккерсу.

3.2 *Определения терминов, характерных для настоящего стандарта:*

3.2.1 *аттестация* — приведение в соответствие с известным стандартом путем верификации и калибровки.

3.2.2 *испытание на микротвердость* — испытание твердости, как правило в шкалах по Виккерсу или Кнупу, с использованием испытательной нагрузки в пределах от 9,807 × 10<sup>-3</sup> до 9,807 Н (от 1 до 1000 гс).

3.2.3 *испытание на макротвердость* — испытание твердости с использованием испытательных нагрузок, как правило, выше 9,807 Н (1 кгс). Испытания на макротвердость включают испытания по Виккерсу, Роквеллу и Бринеллю.

Примечание 3 — Следует избегать использования термина микротвердость, поскольку он предполагает, что твердость, а не усилие или размер отпечатка, очень мала.

3.2.4 *шкала* — определенная комбинация индентора (по Кнупу или Виккерсу) и испытательной нагрузки (кгс).

3.2.4.1 *Пояснение* — Например, HV 10 — это шкала, определенная для использования индентора по Виккерсу и испытательной нагрузки, равной 10 кгс, а НК 0,1 — это шкала, определенная для использования индентора по Кнупу и испытательной нагрузки, равной 100 гс. См. п. 5.10 для получения информации по формированию отчета надлежащим образом по уровню твердости и шкале.

3.2.5 *текущее состояние* — состояние твердомера, как отражено при первичной проверке, выполненной перед проведением очистки, техническим обслуживанием, настройки или ремонта, связанных с косвенной верификацией.

3.2.6 *твердомер* — машина, способная проводить испытание на твердость по Виккерсу или Кнупу.

3.2.7 *испытательный твердомер* — твердомер по Виккерсу или Кнупу, используемый для общих испытательных целей.

3.2.8 *твердомер для аттестации* — твердомер по Виккерсу или Кнупу, используемый для аттестации мер твердости по Виккерсу или Кнупу.

3.2.8.1 *Пояснение* — Твердомер для аттестации отличается от испытательного твердомера допусками в более узких пределах по некоторым параметрам.

3.3 *Уравнения:*

3.3.1 Среднее  $\bar{d}$  ряда из  $n$  измерений длины диагонали  $d_1, d_2, \dots, d_n$  рассчитывается следующим образом:

$$\bar{d} = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_n}{n} \quad (1)$$

где каждое из отдельных измерений диагонали  $d_1, d_2, \dots, d_n$  представляет собой среднее значение двух измерений длины диагонали в случае отпечатка по Виккерсу, или значение измерения длинной диагонали в случае получения отпечатка по Кнупу.

3.3.2 Повторяемость  $R$  в рабочих характеристиках твердомера по Виккерсу или Кнупу на каждом уровне твердости в определенных условиях верификации определяется по  $n$  измерениям диагонали, выполненным на аттестованной мере твердости, что представляет собой часть верификации рабочих характеристик. Повторяемость оценивается как процентный диапазон  $n$  измерений диагонали относительно измеренного среднего значения твердости следующим образом:

<sup>3</sup> Можно получить в Американском национальном институте стандартов (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036, <http://www.ansi.org>.

$$R = 100 \times \left( \frac{d_{\max} - d_{\min}}{\bar{d}} \right) \quad (2)$$

где

$d_{\max}$  = измерение длины самой длинной диагонали, выполненное на аттестованной мере твердости,  
 $d_{\min}$  = измерение длины самой короткой диагонали, выполненное на аттестованной мере твердости, а также  
 $\bar{d}$  = среднее значение (см. п. 3.3.1)  $n$  измерений длины диагонали, выполненное на аттестованной мере твердости.

3.3.3 Погрешность  $E$  в рабочих характеристиках твердомера по Виккерсу или Кнупу на каждом уровне твердости относительно аттестованного эталонного значения рассчитывается как процентная погрешность следующим образом:

$$E = 100 \times \left( \frac{\bar{d} - d_{ref}}{d_{ref}} \right) \quad (3)$$

где:

$\bar{d}$  = среднее значение (см. п. 3.3.1)  $n$  измерений длины диагонали, выполненное на аттестованной мере твердости часть верификации рабочих характеристик, а также  
 $d_{ref}$  = аттестованная длина диагонали, сообщаемая для аттестованной меры твердости.

#### 4. Значение и применение

4.1 Было установлено, что испытания на твердость по Виккерсу и Кнупу являются очень эффективными для оценки материалов, контроля качества производственных процессов и научно-исследовательской и опытно-конструкторской разработки. Хотя твердость носит эмпирический характер, она может быть соотнесена с пределом прочности при растяжении для многих металлов, а также быть признаком износостойкости и вязкости.

4.2 Испытания на микротвердость материалов, являющихся слишком тонкими или недостаточно крупными для проведения испытаний на макротвердость. Испытания на микротвердость также позволяют оценивать определенные фазы или структурные составляющие и участки или градиенты, которые являются недостаточно крупными для испытаний на макротвердость. Рекомендации по проведению испытаний на микровдавливании можно найти в Методе испытаний E384.

4.3 Так как твердость по Виккерсу и Кнупу выявит вариации твердости, которые могут наблюдаться в материале, показатель одного испытания может не быть репрезентативным для среднемассовой твердости.

4.4 Индентор по Виккерсу обычно выводит преимущественно одинаковое число твердости при всех испытательных нагрузках при испытании однородного материала, за исключением испытаний с применением очень низких нагрузок (ниже 25 гс) или отпечатков с диагоналями меньше 25 мкм (см. Метод испытания E384). В изотропных материалах две диагонали отпечатков по Виккерсу имеют равную длину.

4.5 Индентор по Кнупу обычно выводит преимущественно схожие числа твердости в пределах широкого диапазона испытательных нагрузок, но, как правило, числа возрастают при увеличении испытательной нагрузки. Возрастание числа твердости при пониженных испытательных нагрузках часто является более значимым, чем испытание материалов более высокой твердости, и еще более значимым при испытаниях с использованием испытательных нагрузок ниже 50 гс (см. Метод испытания E384).

4.6 Индентор по Кнупу, имеющий удлиненную четырехстороннюю ромбоэдрическую форму, в котором длина

длинной диагонали в п. 7.114 раз превышает длину короткой диагонали, производит более узкие и поверхностные отпечатки, чем индентор по Виккерсу, имеющий прямоугольную пирамидальную форму, при идентичных условиях проведения испытания. Таким образом, испытание на твердость по Кнупу является очень эффективным для оценки градиентов твердости, т. к. отпечатки по Кнупу могут быть ближе друг к другу, чем отпечатки по Виккерсу, если соотнести отпечатки по Кнупу при коротких диагоналях в направлении градиента твердости.

#### 5. Принцип испытания и оборудование

5.1 *Принцип испытания на твердость по Виккерсу и Кнупу* — Основной принцип испытания на твердость по Виккерсу и Кнупу включает два этапа.

5.1.1 *Этап 1* — Применимый заданный индентор приводится в контакт с образцом для испытания в направлении нормали относительно поверхности, прикладывается испытательная нагрузка  $F$ . Испытательная нагрузка удерживается на протяжении определенного времени выдержки, а затем снимается.

5.1.2 *Этап 2* — При испытании на твердость по Виккерсу измеряются длины двух диагоналей, и рассчитывается среднее значение длины диагонали, которая используется для выведения значения твердости по Виккерсу. При испытании на твердость по Кнупу измеряется длина длинной диагонали, которая используется для выведения значения твердости по Кнупу.

5.1.3 Большинство материалов демонстрируют упругое восстановление после удаления индентора по завершении цикла нагружения. Однако в целях расчета показателей твердости из длин диагоналей отпечатка, принято считать, что отпечаток сохраняет форму индентора после снятия нагрузки. При испытаниях по Кнупу принято считать, что соотношение длинной диагонали и короткой диагонали отпечатка является таким же для индентора.

5.2 *Испытательный твердомер* — испытательный твердомер должен удерживать образец для испытания и контролировать движение индентора в образце под действием предварительно выбранной испытательной нагрузки, а также должна иметь светооптический микроскоп для выбора необходимого положения и измерения размера отпечатка, производимого при испытании. Плоскость поверхности образца для испытания должна быть перпендикулярна оси индентора, которая является направлением приложения нагрузки.

5.2.1 См. руководство изготовителя по эксплуатации оборудования для получения описания характеристик установки, ограничений и соответствующих эксплуатационных процедур.

#### 5.3 Инденторы:

5.3.1 Инденторы для общих испытаний на твердость по Виккерсу или Кнупу должны соответствовать или превосходить требования, предъявляемые к инденторам Класса В согласно Дополнению А3.

5.3.2 *Индентор по Виккерсу* — Идеальный индентор по Виккерсу (см. Рис. А3.1) представляет собой в значительной степени отполированный, остроконечный, прямоугольный пирамидальный алмаз, имеющий плоские углы  $136^\circ 0'$ .

5.3.3 *Индентор по Кнупу* — Идеальный индентор по Кнупу (см. Рис. А3.) представляет собой в значительной степени отполированный, остроконечный, ромбический пирамидальный алмаз. Внутренние углы продольной кромки составляют  $172^\circ 30'$  и  $130^\circ 0'$ .

Примечание 4 — Пользователю следует проконсультироваться с производителем перед применением испытательных нагрузок при микровдавливании (выше 1 кгс) с помощью алмазных инденторов, предварительно использованных во время испытаний на микровдавливании. Держатель алмаза может быть недостаточно сильным, чтобы выдерживать большие испытательные нагрузки, а алмаз может быть недостаточно крупным для получения отпечатков больших

размеров.

5.4 *Измерительный прибор* — Диагонали отпечатка измеряются (см. п. 7.9.2) при помощи светового микроскопа, с филлярным окуляром (см. Терминологию E175) или измерительного прибора другого типа. Дополнительное руководство по измерительным приборам можно найти в Методе испытания E384.

5.4.1 Измерительный прибор испытательного твердомера должен быть способен представлять длины диагоналей в соответствии с требованиями п. 7.9.2.

5.4.2 Измерительный прибор может представлять собой составляющую часть испытательного прибора или независимый прибор, например, высококачественный измерительный микроскоп или измерительную систему. Для получения высококачественного изображения для измерения диагонали отпечатка, измерительный микроскоп должен обладать регулируемой интенсивностью освещения, настраиваемой юстировкой, апертурной диафрагмой и диафрагмой осветителя микроскопа.

5.4.3 Увеличения должны обеспечиваться таким образом, чтобы диагональ могла быть увеличена не менее, чем на 25 %, но не более, чем на 75 % ширины поля. В прибор может быть встроен один или несколько увеличительных объективов.

5.5 *Верификации* — Все установки для испытаний, измерительные приборы и инденторы, используемые для выполнения испытаний на твердость по Виккерсу и Кнупу, должны подвергаться периодической верификации в соответствии с Дополнением A1 перед проведением испытаний на твердость.

5.6 *Меры твердости* — Меры твердости, соответствующие требованиям, представленным в Дополнении A4, должны использоваться для верификации испытательного твердомера в соответствии с Дополнением A1.

5.7 *Испытательные нагрузки* — Стандартные значения нагрузок при испытаниях на твердость даны в Таблице 1. Другие нестандартные значения усилий при испытаниях могут использоваться по специальному соглашению.

**ТАБЛИЦА 1 Стандартные шкалы твердости и испытательные нагрузки**

Шкала твердости по Виккерсу	Шкала твердости по Кнупу <sup>А</sup>	Испытательная нагрузка (Н)	Приблизительная испытательная нагрузка (кгс)	Приблизительная испытательная нагрузка (гс)
HV 0,001	НК 0,001	0,009807	0,001	1
HV 0,01	НК 0,01	0,09807	0,01	10
HV 0,015	НК 0,015	0,1471	0,015	15
HV 0,02	НК 0,02	0,1961	0,02	20
HV 0,025	НК 0,025	0,2451	0,025	25
HV 0,05	НК 0,05	0,4903	0,05	50
HV 0,1	НК 0,1	0,9807	0,1	100
HV 0,2	НК 0,2	1,961	0,2	200
HV 0,3	НК 0,3	2,942	0,3	300
HV 0,5	НК 0,5	4,903	0,5	500
HV 1	НК 1	9,807	1	1000
HV 2	НК 2	19,61	2	2000
HV 3		29,41	3	
HV 5		49,03	5	
HV 10		98,07	10	
HV 20		196,1	20	
HV 30		294,1	30	
HV 50		490,3	50	
HV 100		980,7	100	
HV 120		1177	120	

<sup>А</sup> Пользователю следует проконсультироваться с производителем перед применением испытательных нагрузок при макродавлении (свыше 1 кгс) для проведения испытаний на твердость по Кнупу. Алмаз может быть недостаточно крупным для получения отпечатков больших размеров (см. Примечание 4).

5.8 *Расчет числа твердости по Виккерсу* — Число твердости по Виккерсу основывается на испытательной нагрузке  $F$  в кгс, разделенной на площадь поверхности отпечатка  $A_S$  в мм<sup>2</sup>.

$$HV = \frac{\text{Испытательная нагрузка}}{\text{Площадь поверхности}} = \frac{F_{(кгс)}}{A_S(\text{мм}^2)} \quad (4)$$

Площадь поверхности ( $A_S$ ) отпечатка рассчитывается следующим образом:

$$A_S = \frac{d_V^2}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{d_V^2}{1,8544} \quad (5)$$

где:

$\alpha$  = плоский угол алмазного индентора = 136°, а также  
 $d_V$  = средняя длина диагонали отпечатка по Виккерсу (мм).

Могут использоваться другие единицы силы или длины; однако, число твердости по Виккерсу, вносимое в отчет, необходимо преобразовать в единицы измерения кгс и мм, как представлено ниже и приведено в Таблице 2.

5.8.1 Микротвердость по Виккерсу обычно определяется по испытательным нагрузкам в грамм-силе (гс) и диагонали отпечатка, измеряемой в микрометрах (мкм). Число твердости по Виккерсу, выраженное в гс и мкм, рассчитывается следующим образом:

$$HV = 1000 \times 1,8544 \times \frac{F_{(гс)}}{d_{V(\text{мкм})}^2} = 1854,4 \times \frac{F_{(гс)}}{d_{V(\text{мкм})}^2} \quad (6)$$

5.8.2 Микротвердость по Виккерсу обычно определяется по испытательным нагрузкам в килограмм-силе (кгс) и диагонали отпечатка, измеряемой в миллиметрах (мм). Число твердости по Виккерсу, выраженное в кгс и мм, рассчитывается следующим образом:

$$HV = 1,8544 \times \frac{F_{(кгс)}}{d_{V(\text{мм})}^2} \quad (7)$$

5.8.3 Число твердости по Виккерсу, выраженное через испытательные нагрузки, измеряемые в Ньютонах (Н), и диагональ отпечатка, измеряемую в миллиметрах (мм), рассчитывается следующим образом:

$$HV = \frac{1,8544}{9,80665} \times \frac{F_{(Н)}}{d_{V(\text{мм})}^2} = 0,1892 \times \frac{F_{(Н)}}{d_{V(\text{мм})}^2} \quad (8)$$

5.9 *Расчет числа твердости по Кнупу* — Число твердости по Кнупу основывается на испытательной нагрузке  $F$  в кгс, разделенной на площадь проекции отпечатка  $A_P$  в мм<sup>2</sup>.

$$HK = \frac{\text{Испытательная нагрузка}}{\text{Площадь проекции}} = \frac{F_{(кгс)}}{A_P(\text{мм}^2)} \quad (9)$$

Площадь проекции ( $A_P$ ) отпечатка рассчитывается как:

**ТАБЛИЦА 2 Формулы по Виккерсу и Кнупу**

Число твердости по Виккерсу		
Единица измерения нагрузки (F)	Единица измерения диагонали (d)	Формула
кгс	мм	$HV = 1,8544 \times F/d^2$
гс	мкм	$HV = 1854,4 \times F/d^2$
Н	мм	$HV = 0,1891 \times F/d^2$
Число твердости по Кнупу		
Единица измерения нагрузки (F)	Единица измерения диагонали (d)	Формула
кгс	мм	$HK = 14,229 \times F/d^2$
гс	мкм	$HK = 14229 \times F/d^2$
Н	мм	$HK = 1,451 \times F/d^2$

$$A_p = d_K^2 \times c_p \quad (10)$$

где:

$d_K$  = длина длинной диагонали отпечатка по Кнупу (мм), а также

$c_p$  = постоянная индентора, представляющая собой отношение площади проекции отпечатка на квадрат длины длинной диагонали, в идеале 0,07028, где:

$$c_p = \frac{\tan \frac{\angle B}{2}}{2 \tan \frac{\angle A}{2}} = 0,07028 \quad (11)$$

где:

$\angle A$  = внутренний угол продольной кромки,  $172^\circ 30'$ , а также

$\angle B$  = внутренний угол поперечной кромки,  $130^\circ 0'$ .

Могут использоваться другие единицы силы или длины; однако число твердости по Кнупу должно быть преобразовано в единицы измерения кгс и мм, как представлено ниже и приведено в Таблице 2.

5.9.1 Твердость по Кнупу обычно определяется с помощью испытательных нагрузок, измеряемых в грамм-силе (гс), и длинной диагонали отпечатка, измеряемой в микрометрах (мкм). Число твердости по Кнупу, выраженное в гс и мкм, рассчитывается следующим образом:

$$HK = 1000 \times 14,229 \times \frac{F_{(гс)}}{d_{K(мкм)}^2} = 14229 \times \frac{F_{(гс)}}{d_{K(мкм)}^2} \quad (12)$$

5.9.2 Число твердости по Кнупу, выраженное через испытательные нагрузки в кгс, и длинную диагональ отпечатка в мм, рассчитывается следующим образом:

$$HK = 14,229 \times \frac{F_{(кгс)}}{d_{K(мм)}^2} \quad (13)$$

5.9.3 Число твердости по Кнупу, выраженное через испытательные нагрузки в Ньютонах (Н), и длинную диагональ отпечатка в миллиметрах (мм), рассчитывается следующим образом:

$$HK = \frac{14,229}{9,80665} \times \frac{F_{(Н)}}{d_{K(мм)}^2} = 1,451 \times \frac{F_{(Н)}}{d_{K(мм)}^2} \quad (8)$$

5.10 *Число твердости* — значения твердости по Виккерсу и Кнупу обозначаются не только числом, т. к. необходимо указывать какая нагрузка использовалась при проведении испытания. Числа твердости должны сопровождаться символом HV для твердости по Виккерсу или HK для твердости по Кнупу, и дополняться значением, представляющим испытательную нагрузку, выраженную в кгс.

5.10.1 При нестандартном времени выдержки, отличающемся от 10-15 с, необходимо дополнить твердость фактическим значением времени выдержки под нагрузкой, измеряемым в секундах, отделенным знаком “/”.

5.10.2 Вносимое в отчет число твердости по Виккерсу и Кнупу должно быть округлено до трех значащих цифр в соответствии с Практическим руководством E29.

5.10.3 *Примеры:*

400 HK 0,5 = твердость по Кнупу 400, определенная при испытательной нагрузке 500 гс (0,5 кгс).

99,2 HV 0,1 = твердость по Виккерсу 99,2, определенная при испытательной нагрузке 100 гс (0,1 кгс).

725 HV 10 = твердость по Виккерсу 725, определенная при испытательной нагрузке 10 кгс.

400 HK 0,1 / 22. = твердость по Кнупу 400, определенная при испытательной нагрузке 100 гс (0,1 кгс) и общем времени выдержки под нагрузкой 22 с.

## 6. Заготовка для испытаний

6.1 Для образца для испытаний по Виккерсу или Кнупу не имеется стандартной формы или размера. Следует, чтобы образец для получения отпечатка соответствовал следующим условиям:

6.2 *Подготовка* — Для достижения оптимально точного измерения испытание следует проводить на плоском образце, имеющем отполированную или подготовленную иным соответствующим способом поверхность. Качество требуемой обработки поверхности может варьироваться в зависимости от используемых нагрузок и увеличения. Чем ниже испытательная нагрузка и меньше размер отпечатка, тем критичнее требования к подготовке поверхности. Во всех испытаниях подготовку следует проводить так, чтобы периметр отпечатка и, в особенности, режущие кромки отпечатка могли четко определяться при анализе, проводимом измерительной системой. Рекомендации по подготовке поверхности для проведения испытаний микровдавливанием с низкой нагрузкой можно найти в Методе испытания E384.

6.2.1 На рабочей поверхности не должно быть дефектов, которые могут повлиять на отпечаток или последующее измерение диагоналей. Хорошо известно, что несоответствующие методы шлифования и полировки могут исказить результаты испытания либо вследствие чрезмерного нагревания, либо холодной обработки. Некоторые материалы являются более чувствительными к повреждениям, наносимым при подготовке, чем другие; в связи с этим необходимо принять специальные меры во время проведения подготовки образца и устранить любое повреждение, нанесенное во время его подготовки.

6.2.2 Не следует проводить травление поверхности образца перед получением отпечатка. Протравленные поверхности могут затемнять кромку отпечатка, препятствуя проведению точного измерения размера отпечатка. Существуют практические руководства по проведению испытаний на микровдавливание, где может применяться легкое протравливание (см. Метод испытания E384).

6.3 *Выравнивание* — для получения пригодной для использования информации с помощью испытания, необходимо подготовить или закрепить образец таким образом, чтобы рабочая поверхность располагалась перпендикулярно оси индентора. Такое условие может быть легко выполнено с помощью шлифования поверхности (или другого вида машинной обработки) противоположной стороны образца, параллельной испытываемой стороне. Непараллельные образцы могут испытываться с использованием фиксирующих и выравнивающих зажимов, спроектированных для выравнивания рабочей поверхности соответствующего индентора.

6.4 *Закрепленные образцы для испытания* — Во многих случаях, особенно при проведении испытаний на микровдавливание, необходимо закрепить образец для обеспечения удобства при его подготовке и удерживать острый край, если на образце для испытания будут проводиться испытания поверхностного градиента. Если требуется закрепление, то образец должен соответствующим образом удерживаться с помощью гистологической среды так, чтобы образец не двигался во время применения нагрузки, т. е., чтобы избежать использования полимерной закрепляющей пасты, которая скользит под воздействием нагрузки индентора (см. Метод испытания E384).

6.5 *Толщина* — Толщина испытываемого образца должна быть такой, чтобы не происходило вздутий или других отметок, демонстрирующих воздействие испытательной нагрузки на сторону образца, противоположную отпечатку. Толщина испытываемого материала должна по меньшей мере в десять раз превышать глубину отпечатка (см. Примечание 5). Аналогично, при испытании покрытия на материале, минимальная толщина покрытия должна по меньшей мере в десять раз превышать глубину отпечатка.

ПРИМЕЧАНИЕ 5 — Глубина отпечатка по Виккерсу  $h_V$  приблизительно составляет

$$h_V = 0,143 \times d_V \quad (15)$$

или приблизительно 1/7 средней длины диагонали  $d_j$ . Глубина отпечатка по Кнупу  $h_k$  приблизительно составляет

$$h_k = 0,33 \times d_k \quad (16)$$

или приблизительно 1/30 длины длинной диагонали  $d_k$ .

**6.6 Радиус кривизны** — Следует с должной осторожностью интерпретировать или утверждать результаты испытаний, выполненных на сферических или цилиндрических поверхностях, в особенности при использовании низкой испытательной нагрузки. Результаты повергнутся воздействию даже в случае испытания по Кнупу, где радиус кривизны находится в направлении короткой диагонали. Дополнение A5 предоставляет коэффициенты поправок, которые можно применить к значениям твердости по Виккерсу, полученных при испытаниях, выполненных на сферических или цилиндрических поверхностях.

## 7. Процедура испытания

**7.1 Верификация** — Периодическая процедура верификации должна проводиться в соответствии с A1.5 в течение одной недели перед проведением испытания на твердость. Периодическую верификацию следует выполнять на ежедневной основе.

**7.2 Температура** — Испытания твердости по Виккерсу и Кнупу следует проводить при температуре в пределах от 10° до 35° C (от 50° до 95° F). Поскольку изменения внутри данного диапазона температуры могут повлиять на результаты, пользователи могут регулировать температуру в пределах более узкого диапазона.

**7.3 Индентор** — Выберите индентор по Кнупу или Виккерсу, удовлетворяющий требованиям необходимого для проведения испытания. Обратитесь к инструкции завода-изготовителя для получения сведений по соответствующей процедуре, если необходимо ввести изменения в инденторы.

**7.3.1** После каждого изменения или удаления и замены индентора рекомендуется провести периодическую верификацию согласно п. A1.5.

**7.3.2** По мере необходимости проводите очистку индентора с помощью ватного аппликатора и спирта. Избегайте образования статических зарядов во время очистки. При получении отпечатка листа бумаги, расположенного в верхней части образца для испытания, с индентора часто удаляется масло. Не прикасайтесь к алмазному острию пальцами.

**7.3.3** Инденторы следует периодически осматривать и заменять в случаях, если они истерлись, притупились, потрескались или отделились от крепежного материала. Пользователь может проводить проверки индентора с помощью визуального контроля полученных отпечатков, выполненных на мерах твердости.

**7.4 Величина испытательной нагрузки** — Установите необходимую испытательную нагрузку на испытательном приборе, следуя инструкциям изготовителя.

**7.4.1** После каждого изменения испытательной нагрузки рекомендуется проверять функционирование установки путем проведения периодической верификации согласно п. A1.5, в особенности это относится к твердомерам, в которых сила тяжести, создающая испытательную нагрузку, изменяется вручную, или если имеется вероятность перебоев в работе, обусловленных изменением силы тяжести.

**7.5 Расположение образца для испытания** — Поместите образец для испытания в соответствующее зажимное приспособление или на столик испытательного прибора таким образом, чтобы рабочая поверхность находилась перпендикулярно относительно оси индентора.

**7.6 Определение положения контрольной точки** — Установите фокус измерительного микроскопа с объективом малого разрешения таким образом, чтобы под наблюдением находилась поверхность образца. Отрегулируйте интенсивность

светового излучения и отрегулируйте диафрагмы на оптимальное разрешение и контрастность. Отрегулируйте положение образца для испытания так, чтобы отпечаток был сделан на нужном месте на рабочей поверхности. До применения нагрузки установите окончательный фокус с помощью измерительного объектива (см. п. 7.9 и Таблицу 3).

**7.7 Приложение нагрузки** — Приложите выбранное испытательное усилие, как описано ниже, таким образом и в такой окружающей обстановке, чтобы избежать ударного воздействия или вибрации во время процесса вдавливания.

**7.7.1** При испытаниях на микровдавливании индентор должен соприкасаться с образцом при скорости от 15 до 70 мкм/с. При испытаниях на макротвердость скорость вдавливания в момент соприкосновения не должна превышать 0,2 мм/с.

**7.7.2** Время с момента начального приложения нагрузки до достижения полной испытательной нагрузки не должно составлять более 10 с.

**7.7.3** Полная испытательная нагрузка должна быть приложена на время от 10 до 15 с, если не указано иное.

**7.7.4** Для некоторых применений может потребоваться приложение испытательной нагрузки на более продолжительное время. В таких случаях допуск на время приложения нагрузки должен составлять  $\pm 2$  с. Время приложения нагрузки должно быть указано в отчете.

**7.7.5** Снять испытательное усилие, избегая ударного воздействия или вибрации.

**7.7.6** Во время всего цикла испытания с приложением и снятием нагрузки испытательный твердомер должен быть защищен от ударного воздействия или вибрации. Для того, чтобы свести к минимуму вибрации, оператору следует избегать любого соприкосновения с установкой во время всего цикла испытания.

**7.8 Место проведения испытания** — После снятия нагрузки, смените режим на измерительный и выберите соответствующую линзу объектива. Установите на фокус изображение, при необходимости отрегулируйте интенсивность светового излучения и отрегулируйте диафрагмы на максимальное разрешение и контрастность.

**7.8.1** Убедитесь в положении отпечатка на нужном месте и в его симметричности.

**7.8.2** Если отпечаток появился не в нужном месте, то испытательный прибор не выровнен. Обратитесь к инструкции завода-изготовителя для получения сведений по надлежащему проведению процедуры выравнивания. Сделайте другой отпечаток и повторно проверьте его местоположение. Повторно отрегулируйте и повторите необходимые действия.

**7.9 Измерение отпечатка** — Измерьте обе диагонали отпечатка по Виккерсу или длинную диагональ отпечатка по Кнупу, используя измерительный прибор в соответствии с инструкцией завода-изготовителя.

**7.9.1** Если измерительным прибором отпечатка является световой микроскоп, который требует, чтобы просматривался полный отпечаток и измерялся в поле обзора, то необходимо использовать самое сильное увеличение, при котором будет представлено полное изображение отпечатка. Для того, чтобы не выходить за пределы плоского поля объектива, длина отпечатка не должна превышать 75 % ширины поля. Объектив, выбранный для измерения отпечатка, должен иметь разрешение объектива ( $r_{obj}$ )  $< 2$  % измеряемой длины диагонали. Разрешение объектива ( $r_{obj}$ ) является функцией числовой апертуры (NA) объектива, см. Примечание 6. Минимальные рекомендуемые показатели длины диагоналей, измеряемых обычными объективами, представлены в Таблице 3.

ПРИМЕЧАНИЕ 6 — Разрешение объектива ( $r_{obj}$ ) определяется следующим образом:

$$r_{obj} = \lambda / (2 \times NA) \quad (17)$$

**Таблица 3 Рекомендуемые длины диагонали отпечатка для широко используемых объективов и NA**

Увеличения широко используемых объективов <sup>A</sup>	Обычный NA (меняется в зависимости от типа объектива)	Разрешение объектива ( $r_{obj}$ ) мкм	Рекомендуемые длины диагонали мкм
2,5x	0,07	3,93	196,5 или длиннее
5x	0,10	2,75	137,5 или длиннее
10x	0,25	1,10	55 или длиннее
20x	0,40	0,69	34,5 или длиннее
20x	0,45	0,61	30,5 или длиннее
40x	0,55	0,50	25 или длиннее
40x	0,65	0,42	21 или длиннее
50x	0,65	0,42	21 или длиннее
60x	0,70	0,39	19,5 или длиннее
100x	0,80	0,34	17 или длиннее
100x	0,95	0,29	14,5 или длиннее

<sup>A</sup> Это является увеличением объектива, и может не представлять собой полное увеличение системы. Многие системы обладают окуляром 10x, который усиливает общее увеличение на коэффициент 10 от глаза оператора. При таком дополнительном увеличении не изменяется оптическое разрешение ( $r_{obj}$ ) или рекомендуемые длины диагонали.

где:  
 $\lambda$  = длина волны света, мкм (прибл. 0,55 мкм для зеленого света), а также  
 $NA$  = числовая апертура объектива, установленная изготовителем. ( $NA$  часто маркируется на стороне каждого объектива.) Пример: Для объектива 50x с  $NA$  0,65 с зеленым светом,  $r_{obj} = 0,55$  мкм / (2 x 0,65) = 0,42 мкм.

7.9.2 Определите длину диагоналей с точностью до 0,5 мкм или менее. Для отпечатков менее 40 мкм, определите длину диагоналей с точностью до 0,25 мкм или менее. Для отпечатков менее 20 мкм, длина диагоналей должна быть определена с точностью до 0,1 мкм или менее. Во всех случаях могут быть внесены в отчет меньшие интервалы измерений, если оборудование способно демонстрировать меньшие интервалы измерений.

7.10 Исследование отпечатка:

7.10.1 *По Виккерсу* — В случае получения отпечатка по Виккерсу, когда одна половина какой-либо диагонали более чем на 5 % длиннее другой половины этой диагонали, или когда четыре угла отпечатка не находятся в четком фокусе, рабочая поверхность может не быть перпендикулярной относительно оси индентора. Проверьте выравнивание согласно п. 7.10.3.

7.10.2 *По Кнупу* — В случае получения отпечатка по Кнупу, когда одна половина длинной диагонали более, чем на 10 % длиннее другой, или когда оба конца отпечатка не находятся в четком фокусе, поверхность образца для испытания может не быть перпендикулярной относительно оси индентора.

Проверьте выравнивание согласно п. 7.10.3.

7.10.3 Если отрезки диагонали различаются на число, превышающее пределы, обозначенные в пп. 7.10.1 или 7.10.2, поверните образец на 90° и сделайте другой отпечаток на участке, где не проводилось испытание. Если несимметричная часть отпечатка повернута на 90°, то поверхность образца может не быть перпендикулярной относительно оси индентора и может привести к недостоверным показателям твердости. Если несимметричный характер отпечатка сохраняет прежнюю ориентацию, проверьте индентор на наличие повреждений или непрямолинейность согласно п. 7.10.4.

7.10.4 Выравнивание индентора можно проверить, используя образец для испытания, например, аттестованную меру твердости, при помощи которой получают отпечатки равномерной формы. Убедитесь, что поверхность меры твердости является перпендикулярной относительно оси индентора согласно п. 7.10.3. Сделайте отпечаток. Если отпечаток несимметричен, то это означает, что индентор непрямолинейен, и не нужно использовать испытательный прибор, пока он не будет соответствовать требованиям, изложенным в пп. 7.10.1 или 7.10.2.

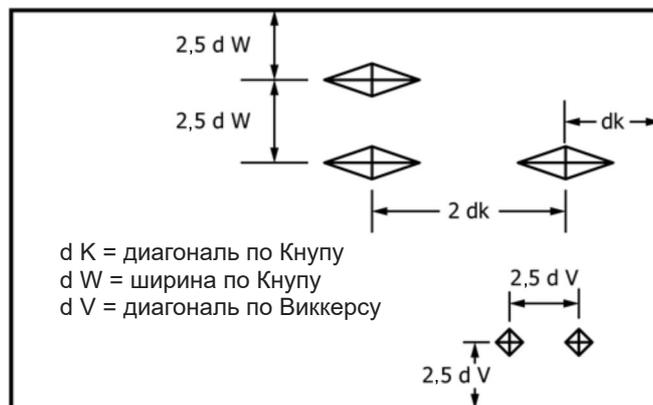
7.10.5 На некоторых материалах могут быть несимметричные отпечатки, даже если индентор и поверхность образца были точно выровнены. Испытания на отдельных кристаллах или на текстурированных материалах могут производить такие же результаты. Если испытания, проводимые на таких типах материалов, создают несимметричные вдавливания, превышающие пределы, обозначенные в пп. 7.10.1 или 7.10.2, следует отметить это в отчете .

7.10.6 Хрупкий материал, например, керамика, может потрескаться в результате вдавливания. Специфические детали проведения испытания керамики содержатся в Методах испытаний C1326 и C1327.

7.11 *Интервалы между отпечатками* — Как правило, на образце для испытания производится более одного отпечатка. Необходимо, чтобы интервал между отпечатками был достаточно большим, чтобы последовательно идущие испытания не оказывали влияния друг на друга.

7.11.1 Для большинства целей испытаний минимальный рекомендуемый интервал между отдельными испытаниями и минимальное расстояние между отпечатками и краем образца проиллюстрированы на Рис. 1.

7.11.2 Для некоторых применений более близкий интервал между отпечатками, чем представлено на Рис. 1, может быть желательным. Если используется более близкий интервал между отпечатками, то испытательная лаборатория обязана проверить точность процедуры испытания.



**Рис. 1 Минимальный рекомендуемый интервал для получения отпечатков по Виккерсу и Кнупу**

## 8. Преобразование в другие шкалы твердости или значения предела прочности при растяжении

8.1 Не существует общего метода точного преобразования чисел твердости по Виккерсу или Кнупу при использовании одного испытательного нагружения на числа твердости при использовании разных испытательных усилий, или на другие типы чисел твердости, или на значения предела прочности при растяжении. Такие преобразования представляют собой, в лучшем случае, приближенные выражения и, вследствие чего, их следует избегать, за исключением особых случаев, когда получена надежная база для преобразования приближением путем проведения сравнительных испытаний. При однородных материалах и испытательных нагрузках  $\geq 100$  гс, числа твердости микровдавливания по Виккерсу удовлетворительно согласуются с числами твердости макровдавливания по Виккерсу. Обратитесь к E140 для ознакомления с Таблицами преобразования твердости для металлов.

ПРИМЕЧАНИЕ 7 — E140 предоставляет приблизительные значения преобразования твердости для определенных материалов, например, сталь, никель и высоконикелевые сплавы, патронная латунь, медные сплавы, легированные белые чугуны и кованные алюминиевые изделия.

## 9. Отчет

9.1 Внесите в отчет следующие сведения:

9.1.1 Результаты (см. п. 5.10), число испытаний и, в соответствующих случаях, среднее и стандартное отклонение результатов.

9.1.2 Испытательную нагрузку,

9.1.3 Общее время приложения нагрузки, если оно выходит за пределы от 10 до 15 с согласно п. 7.7.3,

9.1.4 Любые нетипичные условия, наблюдаемые во время испытания, а также

9.1.5 Температуру при проведении испытаний, если она выходит за рекомендуемый допустимый предел от 10° C до 35° C (от 50° F до 95° F).

## 10. Прецизионность и смещение

10.1 Были проведены четыре отдельных межлабораторных исследования в соответствии с Практическим руководством E691 для определения прецизионности, повторяемости и воспроизводимости настоящего метода испытания. Установлены следующие четыре испытания:

(1) Испытания по Виккерсу и Кнупу, шесть испытательных усилий в пределах микровдавливания, двенадцать лабораторий, измерения, проводимые вручную, семь образцов для испытания различного уровня твердости. См. Метод испытания E384.

(2) Испытания по Виккерсу и Кнупу, две испытательных нагрузки в пределах микровдавливания, семь лабораторий, анализ изображения и измерения, проводимые вручную, четыре образца для испытания различного уровня твердости. См.

Метод испытания E384.

(3) Испытания по Виккерсу и Кнупу, шесть испытательных нагрузок в микродиапазоне, двадцать пять лабораторий, измерения, проводимые вручную, шесть образцов для испытания различного уровня твердости. См. Метод испытания E384.

(4) Испытания по Виккерсу, четыре испытательные нагрузки в макродиапазоне, семь лабораторий, измерения, проводимые вручную, три образца для испытания различного уровня твердости. См. п. 10.3.

10.2 *Исследования с 1 по 3* — Результаты и пояснение исследований с 1 по 3 представлены в Методе испытания E384.

10.3 *Исследование 4* — Формулировка прецизионности макровдавливания по Виккерсу основана на межлабораторном исследовании методов испытаний E92, Стандартного метода испытания металлических материалов на твердость по Виккерсу, проведенном в 2001. В семи лабораториях провели испытания трех различных мер твердости с использованием макродиапазона испытательных нагрузок, равных 1, 5, 10 и 20 кгс. Только четыре лаборатории смогли предоставить результаты при испытательной нагрузке 50 кгс. Каждый «результат испытания» представляет отдельное определение твердости материала по Виккерсу. Каждой лаборатории было предложено предоставить отчет в трех экземплярах по результатам испытания для предоставления возможности дать оценку межлабораторной прецизионности. Практическое руководство E691 использовалось для проектирования и анализа данных; детали предоставлены в Отчете об исследованиях ASTM № RR: E04-1007<sup>4</sup>.

10.3.1 Формулировка прецизионности была определена путем проведения статистического анализа 288 результатов, полученных из семи лабораторий по трем мерам твердости. Материалы были описаны следующим образом:

Материал 1: 200 HV  
Материал 2: 400 HV  
Материал 3: 800 HV

10.3.2 Пределы повторяемости и воспроизводимости приведены в Таблицах 4-8.

10.3.3 Вышеупомянутые термины (предел повторяемости и предел воспроизводимости) использованы в соответствии с Практическим руководством E177.

10.4 *Смещение* — Нет общепризнанного стандарта, согласно которому можно было бы дать оценку прецизионности настоящего метода испытания.

## 11. Ключевые слова

11.1 твердость; отпечаток; Кнуп; макровдавливание; микровдавливание; Виккерс

<sup>4</sup> Подтверждающие данные хранятся в штаб-квартире ASTM International и могут быть получены в ответ на запрос Отчета об исследованиях RR:E04-1007. Свяжитесь со Службой заказчиков ASTM по адресу [service@astm.org](mailto:service@astm.org).

**ТАБЛИЦА 4 Твердость по Виккерсу при испытательной нагрузке 1 кгс (HV 1)**

Номинальная твердость меры твердости (HV)	Среднее значение (HV) $\bar{X}$	Смещение %	Стандартное отклонение повторяемости (HV) $s_r$	Стандартное отклонение воспроизводимости (HV) $s_R$	Предел повторяемости (HV) $r$	Предел воспроизводимости (HV) $R$
200	209,2	N/A	4,1	7,1	11,5	19,9
400	413,8	N/A	8,1	15,6	22,8	43,7
800	812,9	N/A	21,8	21,8	61,1	61,1

**ТАБЛИЦА 5 Твердость по Виккерсу при испытательной нагрузке 5 кгс (HV 5)**

Номинальная твердость меры твердости (HV)	Среднее значение (HV) $\bar{X}$	Смещение %	Стандартное отклонение повторяемости (HV) $s_r$	Стандартное отклонение воспроизводимости (HV) $s_R$	Предел повторяемости (HV) $r$	Предел воспроизводимости (HV) $R$
200	199	N/A	1,7	5,2	4,7	14,5
400	421,8	N/A	4,8	7,3	13,3	20,5
800	828,0	N/A	8,9	19,5	25,0	54,6

**ТАБЛИЦА 6 Твердость по Виккерсу при испытательной нагрузке 10 кгс (HV 10)**

Номинальная твердость меры твердости (HV)	Среднее значение (HV) $\bar{X}$	Смещение %	Стандартное отклонение повторяемости (HV) $s_r$	Стандартное отклонение воспроизводимости (HV) $s_R$	Предел повторяемости (HV) $r$	Предел воспроизводимости (HV) $R$
200	198,1	N/A	2,1	3	6,0	8,5
400	398,5	N/A	2,9	9,1	8,2	25,4
800	800,2	N/A	2,3	11,7	6,6	32,7

**ТАБЛИЦА 7 Твердость по Виккерсу при испытательной нагрузке 20 кгс (HV 20)**

Номинальная твердость меры твердости (HV)	Среднее значение (HV) $\bar{X}$	Смещение %	Стандартное отклонение повторяемости (HV) $s_r$	Стандартное отклонение воспроизводимости (HV) $s_R$	Предел повторяемости (HV) $r$	Предел воспроизводимости (HV) $R$
200	197,1	N/A	1,8	3,5	4,9	9,9
400	415,7	N/A	2,5	5,1	7,0	14,2
800	811,5	N/A	8,3	16,6	23,3	46,6

**ТАБЛИЦА 8 Твердость по Виккерсу при испытательной нагрузке 50 кгс (HV 50)**

Номинальная твердость меры твердости (HV)	Среднее значение (HV) $\bar{X}$	Смещение %	Стандартное отклонение повторяемости (HV) $s_r$	Стандартное отклонение воспроизводимости (HV) $s_R$	Предел повторяемости (HV) $r$	Предел воспроизводимости (HV) $R$
200	191,3	N/A	0,5	1,5	1,4	4,3
400	399,9	N/A	1,1	2,0	3,1	5,7
800	814,4	N/A	2,8	12,0	7,7	33,6

## ДОПОЛНЕНИЯ

### (Обязательная информация)

#### A1. ВЕРИФИКАЦИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ТВЕРДОМЕРОВ ПО ВИККЕРСУ И КНУПУ

##### A1.1 Область применения

A1.1.1 Настоящее Дополнение определяет три типа процедур верификации испытательных твердомеров по Виккерсу и Кнупу: прямая верификация, косвенная верификация и периодическая верификация.

A1.1.2 Прямая верификация представляет собой процесс подтверждения того, что критически важные комплектующие испытательного твердомера находятся в пределах допустимых допусков, путем непосредственного измерения испытательных усилий, системы измерения отпечатка и испытательного цикла.

A1.1.3 Косвенная верификация представляет собой процесс периодического подтверждения эффективности общих эксплуатационных характеристик установки для испытаний с помощью аттестованных мер твердости.

A1.1.4 Периодическая верификация представляет собой процесс проверки и мониторинга эксплуатационных параметров установки для испытаний между косвенными верификациями с помощью аттестованных мер твердости.

##### A1.2 Общие требования

A1.2.1 Верификация установки для испытаний должна проводиться при определенных случаях и с соблюдением периодических интервалов времени согласно Таблице A1.1, а также в случаях, когда возникают обстоятельства, которые могут повлиять на эксплуатационные параметры установки для испытаний.

A1.2.2 Все приборы, используемые для проведения измерений, требуемых настоящим Дополнением, должны быть откалиброваны в соответствии с национальными стандартами при наличии системы прослеживаемости, если не указано иное.

A1.2.3 Прямая верификация установок для испытаний нового производства может проводиться на месте производства или на месте использования. Прямая верификация восстановленных установок для испытаний может проводиться на месте проведения восстановительного ремонта или на месте использования.

A1.2.4 Температура места, подлежащего верификации, должна измеряться прибором, точность которого составляет по меньшей мере  $\pm 2,0^\circ \text{C}$  или  $\pm 3,6^\circ \text{F}$ .

**ТАБЛИЦА A1.1 График проведения верификации испытательного твердомера по Виккерсу и Кнупу**

Процедура верификации	График
Прямая верификация	В случае, если испытательный твердомер является новым, или в случае проведения настроек, модификаций или ремонтных работ, которые могли повлиять на применение испытательных нагрузок или измерительной системы. В случае, если испытательный твердомер не прошел косвенную верификацию.
Косвенная верификация	Рекомендуется проводить каждые 12 месяцев или чаще при необходимости. Не должна проводиться реже, чем в 18 месяцев. При монтаже или перемещении установки для испытаний [выполняется только косвенная верификация в соответствии с процедурой, представленной в A1.4.5 для верификации текущего состояния]. После проведения прямой верификации. Для аттестации индентора, который не был верифицирован при последней косвенной верификации, Таблица A1.1 График проведения верификации испытательного твердомера по Виккерсу и Кнупу (была проведена только частичная косвенная верификация, см. A1.4.8).
Периодическая верификация	Требуется проводить в течение недели до начала использования твердомера. Рекомендуется проводить каждый день при использовании твердомера. Требуется проводить каждый раз при перемещении твердомера. Рекомендуется проводить при смене индентора или испытательной нагрузки.

Рекомендуется, чтобы температура контролировалась на протяжении всего периода верификации, а также чтобы были зарегистрированы и внесены в отчет значительные вариации температуры. Не нужно измерять температуру на месте верификации для целей периодической верификации или аттестации дополнительных инденторов пользователя в соответствии с A1.4.8.

**ПРИМЕЧАНИЕ A1.1** — Рекомендуется, чтобы орган, осуществляющий калибровку и проводящий верификацию испытательных твердомеров по Виккерсу или Кнупу в соответствии с настоящим стандартом, был аккредитован в соответствии с ISO/IEC 17025 (или эквивалентным документом) аккредитующим органом, признанным Международной ассоциацией по аккредитации лабораторий (ILAC) действующим согласно требованиям ISO/IEC 17011.

**ПРИМЕЧАНИЕ A1.2** — Действующий и актуальный сертификат/область аккредитации для проведения верификаций испытательных твердомеров по Виккерсу или Кнупу в соответствии с Методом испытания E384 считается эквивалентным сертификату/области аккредитации для проведения верификаций испытательных твердомеров по Виккерсу или Кнупу в соответствии с настоящим стандартом для уровней твердости, перечисленных в сертификате/области аккредитации.

### A1.3 Прямая верификация

A1.3.1 Прямая верификация установок для испытаний должна выполняться в конкретных случаях в соответствии с Таблицей A1.1. Испытательные нагрузки, система измерения отпечатка, испытательный цикл и инденторы должны проходить верификацию следующим образом.

**ПРИМЕЧАНИЕ A1.3** — Прямая верификация является эффективным способом определения источников погрешности в испытательной установке для проведения испытаний на твердость по Кнупу или Виккерсу.

A1.3.2 *Верификация испытательных нагрузок* — необходимо измерять каждую испытательную нагрузку по Кнупу и/или Виккерсу, которая будет использоваться. Необходимо измерять испытательные нагрузки при помощи измерительного прибора силы упругости класса A, согласно описанию в Практическом руководстве E74 или эквивалентном документе.

A1.3.2.1 Проведите по три измерения каждой нагрузки. Нагрузки должны измеряться в таком состоянии, как они применяются во время проведения испытания; однако допускается более продолжительное время выдержки в случаях, когда необходимо обеспечить условия для того, чтобы измерительный прибор произвел точные измерения.

**ТАБЛИЦА A1.2 Точность приложенных нагрузок**

Приложенная нагрузка, гс	Точность, %
$F < 200$	1,5
$F \geq 200$	1,0

A1.3.2.2 Каждая испытательная нагрузка  $F$  должна соответствовать требованиям, указанным в Таблице A1.2.

A1.3.3 *Верификация системы измерения отпечатка* — Каждое увеличение измерительного прибора, используемое для определения диагонали отпечатка, должно проходить верификацию на пяти равноотстоящих интервалах в пределах рабочего диапазона путем сравнения с помощью точного измерительного устройства, например, многоступенчатого микрометра. Точность сертифицированного интервала между линиями многоступенчатого микрометра должна составлять 0,1 мкм или 0,05 % наиболее продолжительного интервала. Через весь рассматриваемый диапазон разница между показателем устройства и ступенью не должна превышать 0,4 мкм или 0,5 %, но не менее.

A1.3.4 Верификация испытательного цикла — испытательный твердомер должен проходить верификацию для соответствия допускам испытательного цикла, обозначенных в 7.7. Прямая верификация испытательного цикла должна проходить верификацию производителем установки для испытаний в момент производства или когда испытательный твердомер возвращается к производителю для проведения ремонта, либо когда допускается наличие проблемы с испытательным циклом. В других случаях проведение верификации испытательного цикла рекомендуется, но не требуется в виде части прямой верификации.

A1.3.4.1 Приборы, имеющие отсчет временного интервала, который контролируется программным обеспечением или другими нерегулируемыми комплектующими, не должны проходить верификацию, при условии, что было утверждено, что проектирование прибора обеспечивает корректный испытательный цикл.

A1.3.5 *Ошибка прямой верификации* — Если какая-либо из прямых верификаций не соответствует заявленным требованиям, то установку для испытаний нельзя использовать, пока она не будет отрегулирована или отремонтирована. Если на испытательные нагрузки, систему измерения отпечатка или испытательный цикл может повлиять такая регулировка или ремонт, то подвергшиеся влиянию комплектующие должны быть повторно верифицированы с помощью проведения прямой верификации.

A1.3.6 *Косвенная верификация* — После успешного проведения прямой верификации следует косвенная верификация, которая выполняется согласно п. A1.4.

### A1.4 Косвенная верификация

A1.4.1 Косвенная верификация установки для испытаний должна быть выполнена в соответствии с графиком, представленным в Таблице A1.1. Может требоваться более частое проведение косвенной верификации, чем указано в Таблице A1.1, и она должна основываться на использовании установки для испытаний.

A1.4.2 Перед следующей косвенной верификацией испытательный твердомер должен верифицироваться для каждой испытательной нагрузки и для каждого индентора, которые будут применяться. Испытания на твердость, проведенные с использованием комбинаций испытательной нагрузки и индентора, которые проходили верификацию не в соответствии с графиком, установленным в Таблице A1.1, не отвечают требованиям настоящего стандарта.

A1.4.3 Аттестованные меры твердости, используемые для косвенной верификации, должны соответствовать требованиям Дополнения A4.

**ПРИМЕЧАНИЕ A1.4** — Было признано, что соответствующие аттестованные меры твердости не предусмотрены для всех

геометрических форм, материалов или пределов твердости.

A1.4.4 Индентор(ы) для использования при косвенной верификации, должен соответствовать требованиям Дополнения А3.

A1.4.5 *Текущее состояние* — Рекомендуется, чтобы текущее состояние установки для испытаний оценивалось в рамках косвенной верификации. Это важно для документального подтверждения динамики эксплуатационных показателей твердомера. Данная процедура должна проводиться органом по верификации перед процедурами очистки, техническим обслуживанием, настройкой или ремонтными работами.

A1.4.5.1 Текущее состояние установки для испытаний необходимо определять с помощью индентора пользователя, который обычно используется с установкой для испытаний. Следует использовать один или несколько аттестованных мер твердости в пределах типичных испытаний для каждой шкалы твердости по Виккерсу или Кнупу, которые будут подвергнуты косвенной верификации.

A1.4.5.2 На каждой аттестованной мере твердости выполните по меньшей мере три измерения при равномерном распределении на рабочей поверхности. Пусть  $d_1, d_2, \dots, d_n$  будут представлять собой значения измерений диагоналей, а  $\bar{d}$  — средним значением измерений, см. Уравнение 1.

ПРИМЕЧАНИЕ A1.5 — При проведении испытаний с использованием малых нагрузок может потребоваться увеличение количества испытаний для того, чтобы получить более достоверные результаты.

A1.4.5.3 Определите повторяемость  $R$  и погрешность  $E$  рабочих характеристик установки для испытаний для каждой аттестованной меры твердости, которая измеряется с использованием Уравнений 2 и 3. Повторяемость  $R$  и погрешность  $E$  должны находиться в пределах допусков, обозначенных в подлежащих к применению Таблице A1.3 или Таблице A1.4.

A1.4.5.4 Если рассчитанные значения повторяемости  $R$  или погрешность  $E$  выходят за пределы установленных допусков, это является указанием на то, что испытания твердости, выполненные с момента последней косвенной верификации или периодической верификации могут быть недостоверными.

A1.4.6 *Очистка и техническое обслуживание* — Проводите очистку и плановое техническое обслуживание установки для испытаний в случаях, когда это требуется согласно техническим условиям и инструкциям производителя.

A1.4.7 *Процедура косвенной верификации* — Процедура косвенной верификации предназначена для подтверждения того, что для каждой используемой шкалы твердости по Виккерсу и Кнупу точно применяется испытательная нагрузка, каждый индентор является корректным и что измерительный прибор правильно откалиброван в отношении диапазона размеров отпечатка, получаемого при данных комбинациях испытательной нагрузки и индентора. Это осуществляется путем проведения измерений твердости мер твердости, которые были откалиброваны с использованием одинаковых шкал твердости по Виккерсу и Кнупу.

**ТАБЛИЦА A1.3 Повторяемость и погрешность установок для испытаний — Испытательные нагрузки  $\leq 1$  кгс<sup>A</sup>**

Диапазон твердости аттестованных мер твердости		Нагрузка, кгс	$R$ Максимальная повторяемость (%)	$E$ Максимальная погрешность (%) <sup>B</sup>
По Кнупу	По Виккерсу			
HK > 0 HK < 100	HV > 0 HV < 100	$1 \leq F < 100$	13	3
$100 \leq HK \leq 250$ $250 < HK \leq 650$ HK > 650	$100 \leq HV \leq 240$ $240 < HV \leq 600$ HV > 600	$100 \leq F < 500$	13 5 4	2 2 2
$100 \leq HK \leq 250$ $250 < HK \leq 650$ HK > 650	$100 \leq HV \leq 240$ $240 < HV \leq 600$ HV > 600	$500 \leq F \leq 1000$	8 4 3	2 2 2

<sup>A</sup> Во всех случаях повторяемость является удовлетворительной, если  $(d_{\max} - d_{\min})$  равен 1 мкм или менее.

<sup>B</sup> Во всех случаях погрешность является удовлетворительной, если  $E$  из Уравнения 3 равно 0,5 мкм или менее.

**ТАБЛИЦА A1.4 Повторяемость и погрешность установок для испытаний — Испытательные нагрузки > 1 кгс<sup>A</sup>**

Диапазон твердости аттестованных мер твердости	Нагрузка, кгс	$R$ Максимальная повторяемость (%)	$E$ Максимальная погрешность (%) <sup>B</sup>
от $\geq 100$ до < 240	>1	4	2
от > 240 до $\leq 600$	>1	3	2
> 600	>1	2	2

<sup>A</sup> Во всех случаях повторяемость является удовлетворительной, если  $(d_{\max} - d_{\min})$  равна 1 мкм или меньше.

<sup>B</sup> Во всех случаях погрешность является удовлетворительной, если  $E$  из

Уравнения 3 равно 0,5 мкм или меньше.

A1.4.7.1 испытательный твердомер должен быть верифицирован с помощью индентора(-ов) пользователя, который обычно используется для проведения испытаний.

A1.4.7.2 Минимум две аттестованные меры твердости должны использоваться для верификации испытательного твердомера. Меры твердости необходимо выбирать так, чтобы они соответствовали следующим критериям:

(1) По меньшей мере одна мера для испытания твердости должен использоваться для каждой верифицируемой шкалы твердости по Виккерсу и Кнупу.

(2) По меньшей мере две меры должны представлять разные диапазоны твердости: низкая, средняя или высокая твердость согласно Таблице A1.5. Различие твердости между двумя мерами, представляющими разные диапазоны твердости, должно составлять минимум 100 единиц. Например, если верифицируется только одна шкала твердости по Виккерсу и Кнупу, и используется только одна мера с твердостью 220 для верификации низкого диапазона, то мера, имеющая минимальную твердость 320, должна использоваться для верификации среднего диапазона твердости или высокого диапазона твердости. См. больше примеров ниже при описании мер твердости, необходимых при выполнении многомасштабных верификаций.

(3) Самая высокая испытательная нагрузка должна верифицироваться на мере, представляющей самый низкий из выбранных диапазонов твердости, для получения большего размера отпечатка, а самая низкая испытательная нагрузка на мере, представляющей самый высокий из выбранных диапазонов твердости, должна использоваться для получения меньшего размера отпечатка. Два отпечатка предельного размера будут верифицировать способность производительность измерительного прибора.

*Пример 1* — испытательный твердомер должен верифицироваться для шкал HV 0,5 и HK 1. Выбираются две меры твердости для верификации: 450 HV 0,5 (средний диапазон) и 200 HK 1 (низкий диапазон). В таком случае самая высокая испытательная нагрузка (1000 гс) используется на мере, имеющей твердость низкого диапазона, а самая высокая испытательная нагрузка (500 гс) используется на мере, имеющей твердость среднего диапазона, которая является более высокой из двух диапазонов твердости.

**ТАБЛИЦА A1.5 Диапазоны твердости, используемые для косвенной верификации**

Диапазон	По Кнупу	По Виккерсу
Низкий	< 250	< 240
Средний	От 250 до 650	От 240 до 600
Высокий	> 650	> 600

*Пример 2* — Испытательный твердомер должен верифицироваться для шкал НК 0,1, HV 0,3 и HV 1. Выбираются три меры твердости для верификации: 720 НК 0,1 (высокий диапазон), 480 HV 0,3 (средний диапазон) и 180 HV 1 (низкий диапазон). В данном случае используется самая высокая испытательная нагрузка (1000 гс) на мере с низким диапазоном твердости, и самая низкая испытательная нагрузка (100 гс) используется на мере твердости с самым высоким диапазоном. Мера среднего диапазона была выбрана для испытательной нагрузки 300 гс, несмотря на то, что любая мера из трех диапазонов твердости соответствовала бы требованиям.

*Пример 3* — Испытательный твердомер должен верифицироваться для шкал HV 0,5 и HV 1. Выбираются две меры твердости для верификации: 150 HV 1 (низкий диапазон) и 450 HV 0,5 (средний диапазон). В данном случае используется самая высокая испытательная нагрузка (1000 гс) на мере с низким диапазоном твердости, и самая низкая испытательная нагрузка (500 гс) используется на мере твердости со средним диапазоном, который является более высоким из двух диапазонов твердости.

*Пример 4* — Испытательный твердомер должен верифицироваться для шкал HV 1, HV 3 и HV 5. Выбираются три меры твердости для верификации: 180 HV 5 (низкий диапазон), 480 HV 3 (средний диапазон) и 720 HV 1 (высокий диапазон). В данном случае используется самая высокая испытательная нагрузка (5 кгс) на мере с низким диапазоном твердости, и самая низкая испытательная нагрузка (1 кгс) используется на мере твердости с самым высоким диапазоном. Мера среднего диапазона была выбрана для испытательной нагрузки 3 кгс, несмотря на то, что любая мера из трех диапазонов твердости соответствовала бы требованиям.

A1.4.7.3 На каждой аттестованной мере твердости выполните по меньшей мере пять измерений при равномерном распределении на рабочей поверхности. Пусть  $d_1, d_2, \dots, d_5$  будут представлять собой пять значений измерений диагоналей, а  $\bar{d}$  — средним значением по пяти измерениям, рассчитанным с помощью Уравнения 1. Измерения твердости необходимо проводить только на откалиброванной поверхности меры твердости. Определите повторяемость  $R$  и погрешность  $E$  эксплуатационных характеристик испытательного твердомера, используя Уравнения 2 и 3 для каждого уровня твердости по каждой верифицируемой шкале твердости по Виккерсу и Кнупу. Повторяемость  $R$  и погрешность  $E$  должны находиться в пределах, обозначенных в подлежащих к применению Таблице A1.3 или Таблице A1.4.

*Пример: Расчет повторяемости  $R$*  — Предполагается, что были сделаны пять отпечатков по Кнупу на мере твердости с номинальной твердостью 420 НК при аттестованной испытательной нагрузке на меру 300 гс, и пять измерений диагонали составляют 103,9, 104,8, 102,3, 102,8 и 100,2 мкм. Таким образом,  $d_{\max} - d_{\min} = 104,8 - 100,2 = 4,6$  мкм и  $R = 100(4,6)/102,8 = 4,47\%$ . В соответствии с Таблицей A1.3, повторяемость для меры твердости, имеющей твердость от >250 до 650 НК, должна составлять  $\leq 5\%$ . В данном примере испытательный твердомер соответствует требованию повторяемости для данной меры для испытания твердости и силы. Однако если эти диагонали были получены с использованием испытательной меры, имеющей номинальную твердость 700 НК, и аттестованной испытательной нагрузки 300 гс, то повторяемость будет несоответствующей, т. к. Таблица A1.3 требует  $R \leq 4\%$  для твердости >650 НК.

*Пример: Расчет погрешности  $E$*  — Следующий пример расчета погрешности основан на данных измерений, представленных в примере повторяемости, приведенном выше, и аттестованном среднем значении длины диагонали меры твердости  $d_{\text{этал}} = 100,8$  мкм (420 НК 0,3). Поскольку  $\bar{d} = 102,8$  мкм,  $(\bar{d} - d_{\text{этал}}) = 102,8 - 100,8 = 2,0$  мкм. Отсюда следует, что  $E = 1,98\%$ . В данном случае процентная погрешность соответствует максимуму  $\pm 2\%$ , который составляет больше 0,5 мкм. Для данного примера  $\bar{d} - d_{\text{этал}}$  должен быть > 2,016 мкм для того, чтобы погрешность была выше предела 2%.

A1.4.7.4 Если измерения повторяемости  $R$  или погрешности  $E$  при использовании индентора пользователя выходят за пределы установленных допусков, то измерения при косвенной верификации могут быть проведены повторно, используя другой индентор.

A1.4.7.5 Косвенная верификация должна подтверждаться только в случае, если измерения повторяемости и погрешности установки для испытаний соответствуют установленным допускам относительно индентора пользователя.

A1.4.8 В случаях, когда необходимо заменить индентор в течение периода между проведениями косвенной верификации, новый индентор должен верифицироваться для использования с помощью определенного испытательного твердомера. Пользователь может выполнить верификацию следуя процедурам, установленным в п. A1.4.5. Если значения повторяемости  $R$  и погрешности  $E$  соответствуют допускам, представленным в подлежащих к применению Таблице A1.3 или Таблице A1.4, то индентор может использоваться.

A1.4.9 Если при комбинации твердости меры и испытательной нагрузки получаются отпечатки с диагоналями длиной менее 20 мкм, то не рекомендуется проводить косвенную верификацию с помощью аттестованных мер твердости. В таких ситуациях погрешность измерения отпечатка представляет значительную пропорциональную часть длины диагонали. Это может привести к существенным отклонениям твердости от установленного значения. При возможности следует использовать твердость меры, при которой получаются отпечатки с диагоналями длиной по меньшей мере 20 мкм. Дополнительное руководство по проведению испытаний в диапазоне нагрузки микровдавливания (нагрузки < 1 кгс) можно найти в Методе испытания E384.

## A1.5 Периодическая верификация

A1.5.1 Периодическая верификация предназначена для использования в качестве пользовательского инструмента мониторинга рабочих характеристик испытательного твердомера между проведениями косвенной верификации. Как минимум, периодическая верификация должна проводиться в соответствии с графиком, представленным в Таблице A1.1 для каждой используемой шкалы твердости по Виккерсу и Кнупу.

A1.5.2 *Процедуры периодической верификации* — Процедуры, используемые для проведения периодической верификации, являются следующими:

A1.5.2.1 Периодическая верификация должна проводиться для каждой используемой шкалы твердости по Виккерсу и Кнупу. По меньшей мере одна аттестованная мера твердости, соответствующая требованиям Дополнения A4, должна использоваться для каждой верифицируемой шкалы твердости по Виккерсу и Кнупу. Если меры твердости являются коммерчески доступными, то уровень твердости мер твердости должен быть выбран приблизительно при таком же значении твердости, что и материал, по которому проводятся измерения.

A1.5.2.2 Индентор, используемый для проведения периодической верификации, должен представлять собой индентор, который обычно используется для испытаний.

A1.5.2.3 Перед проведением испытаний по периодической верификации, убедитесь, что испытательный твердомер работает без ограничений, предметный столик и мера твердости

являются чистыми, а измерительный прибор надлежащим образом настроен и установлен на нуль.

**A1.5.2.4** Проведите по меньшей мере два испытания твердости на каждом из мер твердости, подлежащих периодической верификации, соблюдая требования к интервалу, приведенные в п. 7.11.1. Измерения твердости должны быть выполнены только на откалиброванной поверхности меры твердости.

**A1.5.2.5** Пусть  $\bar{d}$  будет средним значением измерений диагонали. Определите погрешность  $E$  эксплуатационных характеристик испытательного твердомера, используя Уравнение 3 для каждой измеряемой аттестованной меры твердости.

**A1.5.2.6** Если погрешность  $E$ , рассчитанная для каждой меры твердости, находится в пределах допусков, представленных в подлежащих к применению Таблице A1.3 или Таблице A1.4, то эксплуатационные характеристики установки для испытаний с индентором могут считаться удовлетворительными.

**A1.5.2.7** В качестве альтернативы для расчета погрешности  $E$  допускается расчет диапазона погрешности для эталонной меры в единицах длины диагонали или единицах твердости. Эксплуатационные характеристики установки для испытаний с индентором могут считаться удовлетворительными, если среднее значение измеренной длины диагонали  $\bar{d}$  или рассчитанное среднее значение твердости находится в пределах диапазона погрешности.

*Пример* — Мера твердости имеет аттестованную среднюю длину диагонали 35,2 мкм и аттестованное значение 750 HV 0,5. Согласно Таблице A1.4 максимальная погрешность  $E$  составляет 2 % от 35,2 мкм или от диапазона от 34,5 мкм до 35,9 мкм. Это эквивалентно диапазону от 719 HV 0,5 до 779 HV 0,5. Периодическая верификация допустима, если среднее значение измеренной длины диагонали или эквивалентное значение HV находится в пределах данных диапазонов.

**A1.5.2.8** Если погрешность  $E$ , рассчитанная для какой-либо меры твердости, выходит за пределы допусков, следуйте рекомендациям производителя по выявлению и устранению неисправностей и повторно проведите испытание. Если среднее значение измерений твердости снова выходит за пределы допусков для какой-либо меры твердости, необходимо провести косвенную верификацию.

**A1.5.2.9** Во всех случаях, когда испытательный твердомер не проходит периодическую верификацию, испытания на твердость, проведенные с последней успешной косвенной верификации или периодической верификации, могут быть поставлены под сомнение.

**ПРИМЕЧАНИЕ A1.6** — Настоятельно рекомендуется, чтобы результаты, полученные при испытаниях периодической верификации, были зарегистрированы с помощью принятых методик статистического контроля производственных процессов, но не ограничиваясь таковыми, как контрольная карта для средних значений, схемы изменения размахов и гистограммы.

## **A1.6 Отчет по верификации**

**A1.6.1** Отчет по верификации требуется для прямой и косвенной верификаций. Отчет по верификации не требуется для периодической верификации; однако рекомендуется регистрировать результаты периодической верификации, включая дату проведения верификации, результаты измерений, аттестованное значение меры твердости, идентификацию меры твердости и фамилию специалиста, проводящего верификацию, и т. д. (см. также Примечание A1.6). Данные записи могут использоваться для оценки рабочих характеристик твердомера спустя некоторое время.

**A1.6.2** Отчет по верификации должен быть сформирован специалистом, выполняющим верификацию и по мере доступности включать следующую информацию, представляющую собой результат выполненной верификации.

**A1.6.2.1** Ссылка на настоящий метод испытания ASTM. Предыдущие отчеты по верификациям со ссылкой на Метод испытания E384, который появился до выхода настоящей редакции Методов испытаний E92 и продолжает значиться в графике проведения верификации, представленного в Таблице A1.1, считаются соответствующими данному требованию.

**A1.6.2.2** Метод верификации (прямой или косвенный).

**A1.6.2.3** Идентификация используемых испытательных твердомеров.

**A1.6.2.4** Средства проведения верификации (меры твердости, динамометры с упругим элементом и т. д.) с предписаниями, определяющими прослеживаемость по настоящему национальному стандарту.

**A1.6.2.5** Верифицированная(-ые) шкала(-ы) твердости по Виккерсу и Кнупу.

**A1.6.2.6** Отдельные и рассчитанные результаты, используемые для определения соответствия установки для испытаний требованиям выполненной верификации. Каждое измерение, проведенное для определения текущего состояния установки для испытаний, должно быть включено в отчет.

**A1.6.2.7** Описание настроек или обслуживания, проведенного на испытательном твердомере.

**A1.6.2.8** Дата проведения верификации и ссылка на орган, проводящий верификацию или службу.

**A1.6.2.9** Подпись специалиста, выполнившего верификацию.

## **A2. ТВЕРДОМЕРЫ ДЛЯ АТТЕСТАЦИИ ПО ВИККЕРСУ И КНУПУ**

### **A2.1 Область применения**

**A2.1.1** Настоящее Дополнение определяет требования к производительности, использованию и периодической верификации твердомеров для аттестации по Виккерсу и Кнупу. твердомер для аттестации отличается от испытательного твердомера более ограниченными допусками на определенные технические характеристики, например, приложение нагрузки и геометрия индентора. твердомер для аттестации используется для аттестации мер твердости согласно Дополнению A4.

**A2.1.2** Строгое соблюдение предписаний настоящего стандарта и дополнения обеспечивает прослеживаемость по национальным стандартам, если не указано иное.

### **A2.2 Аккредитация**

**A2.2.1** Орган, который проводит прямые и/или косвенные верификации твердомеров для аттестации, должен быть аккредитован согласно требованиям ISO 17025 (или эквивалентного документа) аккредитующим органом, признанным Международной ассоциацией по аккредитации лабораторий (ILAC) как действующим согласно требованиям ISO/IEC 17011. Орган, аккредитованный для проведения верификаций твердомеров для аттестации, может проводить верификации своих собственных твердомеров для аттестации. Стандартизирующая лаборатория должна иметь сертификат/область аккредитации с указанием типов верификаций (прямых и/или косвенных) и шкал твердости по Виккерсу и Кнупу, на которые распространяется данная

аккредитация.

A2.2.2 Учреждение, которое было аккредитовано в соответствии с п. A2.2.1 для проведения прямых и/или косвенных верификаций твердомеров для аттестации по Виккерсу или Кнупу до выпуска настоящей редакции Методов испытаний E92, имеющее действительный и актуальный сертификат/область аккредитации со ссылкой на Метод испытания E384, удовлетворяет требованиям аккредитации настоящей редакции.

### A2.3 Оборудование

A2.3.1 Согласно Дополнению A1 твердомер для аттестации должен соответствовать следующим дополнительным требованиям.

A2.3.2 *Прямая верификация* — Прямая верификация должна проводиться каждые 12 месяцев согласно п. A1.3.

A2.3.3 *Косвенная верификация* — Косвенная верификация должна проводиться в соответствии с п. A1.4, после проведения прямой верификации.

A2.3.3.1 Косвенные верификации должны проводиться с использованием мер твердости, прослеживаемых по доступным национальным стандартам.

Примечание A2.1 — Первичные аттестованные меры твердости в качестве стандартного эталонного материала можно получить в NIST, Гейтерсберг, MD 20899.

A2.3.4 Периодическая верификация — Периодическая верификация должна проводиться согласно п. A1.5 при соответствии следующим дополнительным требованиям.

A2.3.4.1 Периодическая верификация должна проводиться до и после аттестации каждой партии мер твердости. Если аттестация отдельных партий мер твердости проводится на протяжении нескольких дней, то процедуры периодической верификации должны проводиться в конце рабочего дня и в начале следующего дня в течение периода аттестации партии.

A2.3.4.2 Периодическая верификация должна проводиться каждый раз при смене индентора, опоры или испытательной нагрузки.

A2.3.4.3 По меньшей мере две меры твердости должны использоваться в соответствующих диапазонах твердости, охватывающих уровень твердости, который должен быть аттестован.

A2.3.5 *Инденторы* — Должны использоваться инденторы по Виккерсу и Кнупу класса A согласно Дополнению A3.

A2.3.6 *Испытательный цикл* — Время применения испытательной нагрузки должно составлять от 5 до 7 секунд. Время выдержки под испытательной нагрузкой должно составлять от 13 до 15 секунд.

A2.3.7 Система измерения отпечатка должна пройти верификацию в соответствии с п. A1.3.3. Разница между показателями устройства для отчета и многоступенчатого микрометра не должна превышать 0,2 мкм или 0,25 %, в зависимости от того, какое из значений является большим.

### A2.4 Отчет по верификации

A2.4.1 *Прямая верификация:*

A2.4.1.1 Ссылка на настоящий метод испытания ASTM.

A2.4.1.2 Идентификация твердомера для аттестации, включая серийный номер, производителя и номер модели.

A2.4.1.3 Идентификация всех устройств (динамометры с упругим элементом и т. д.), используемых для верификации, включая серийные номера и идентификацию стандартов, по которым обеспечивается прослеживаемость.

A2.4.1.4 Температура при проведении испытаний во время верификации с разрешающей способностью по температуре по меньшей мере 1° C.

A2.4.1.5 Показатели отдельного измерения и рассчитанные результаты, используемые для определения соответствия твердомера для аттестации требованиям выполняемой верификации. Рекомендуется также внести в отчет неопределенность рассчитанных результатов, используемых для определения соответствия твердомера для аттестации требованиям выполняемой верификации.

A2.4.1.6 Описание проведенных настроек и обслуживания твердомера для аттестации, в соответствующих случаях.

A2.4.1.7 Дата проведения верификации и ссылка на орган, проводящий верификацию или службу.

A2.4.1.8 Подпись специалиста, выполнившего верификацию.

A2.4.1.9 Сертификационный номер аккредитации.

A2.4.2 *Косвенная верификация:*

A2.4.2.1 Ссылка на настоящий метод испытания ASTM.

A2.4.2.2 Идентификация твердомера для аттестации, включая серийный номер, производителя и номер модели.

A2.4.2.3 Идентификация всех устройств (динамометры с упругим элементом и т. д.), используемых для верификации, включая серийные номера и идентификацию стандартов, по которым обеспечивается прослеживаемость.

A2.4.2.4 Температура при проведении испытаний во время верификации с разрешающей способностью по температуре по меньшей мере 1° C.

A2.4.2.5 Верифицированная(-ые) шкала(-ы) твердости.

A2.4.2.6 Показатели отдельного измерения и рассчитанные результаты, используемые для определения соответствия твердомера для аттестации требованиям выполняемой верификации. Необходимо включать в отчет каждое измерение, проводимое для определения текущего состояния твердомера для аттестации. Рекомендуется также внести в отчет неопределенность рассчитанных результатов, используемых для определения соответствия твердомера для аттестации требованиям выполняемой верификации.

A2.4.2.7 Описание технического обслуживания, проведенного для твердомера для аттестации, в соответствующих случаях.

A2.4.2.8 Дата проведения верификации и ссылка на орган, проводящий верификацию или службу.

A2.4.2.9 Подпись специалиста, выполнившего верификацию.

A2.4.2.10 Сертификационный номер аккредитации.

A2.4.3 Периодическая верификация:

A2.4.3.1 Отчет по периодической верификации не требуется; однако необходимо регистрировать результаты периодической верификации.

### А3. АТТЕСТАЦИЯ ИНДЕНТОРОВ ПО ВИККЕРСУ И КНУПУ

#### А3.1 Область применения

А3.1.1 Настоящее Дополнение устанавливает требования и процедуры для производства и аттестации алмазных инденторов по Виккерсу и Кнупу.

А3.1.2 Дополнение охватывает два уровня алмазных инденторов, обозначаемых настоящим стандартом как инденторы Класса В и Класса А. Инденторы Класса В предназначены для ежедневного пользования испытательного твердомера. Инденторы Класса А предназначены для аттестации мер твердости в соответствии с Дополнением А4.

А3.1.3 Строгое соблюдение предписаний настоящего стандарта и дополнения обеспечивает прослеживаемость по национальным стандартам, если не указано иное.

А3.1.4 Инденторы, которые были аттестованы согласно Методу испытания Е384 лабораторией, аккредитованной в соответствии с п. А3.2.1 до выпуска настоящей редакции Методов испытаний Е92 могут использоваться для удовлетворения требований настоящей редакции, при условии, что они соответствуют всем требованиям Метода испытания Е384-09 или более поздней пересмотренной редакции.

#### А3.2 Аккредитация

А3.2.1 Орган, который проводит аттестацию инденторов, должен быть аккредитован согласно требованиям ISO 17025 (или эквивалентного документа) аккредитующим органом, признанным Международной ассоциацией по аккредитации лабораторий (ILAC) как действующим согласно требованиям ISO/EC 17011. Стандартизирующая лаборатория должна иметь сертификат аккредитации, указывающий класс и типы инденторов, на которые распространяется данная аккредитация. Только инденторы класса и типов в рамках области аккредитации лаборатории считаются соответствующими настоящему стандарту, за исключением случаев, описанных ниже.

А3.2.2 Учреждение, которое было аккредитовано в соответствии с А3.2.1 для аттестации инденторов до выпуска настоящей редакции Методов испытаний Е92, имеющее действенный и актуальный сертификат/область аккредитации со ссылкой на Метод испытания Е384, удовлетворяет требованиям аккредитации настоящей редакции.

#### А3.3 Общие требования

А3.3.1 Индентор по Виккерсу — Идеальным индентором по Виккерсу является тщательно отполированный, остроконечный, пирамидальный алмаз с квадратным основанием, имеющий плоские углы  $136^{\circ} 0'$ .

А3.3.2 *Индентор по Кнупу* — Идеальным индентором по Кнупу является тщательно отполированный, остроконечный, пирамидальный алмаз с ромбовидным основанием. Внутренние углы продольной кромки составляют  $172^{\circ} 30'$  и  $130^{\circ} 0'$ .

А3.3.3 Четыре поверхности индентора по Виккерсу или Кнупу должны быть одинаково наклонены к оси индентора и смыкаться в остроконечии.

А3.3.4 Все инструменты, используемые для проведения измерений, требуемых настоящим Дополнением, должны быть откалиброваны в соответствие с национальными стандартами, в которых имеется система прослеживаемости, если не указано иное.

А3.3.5 *Верификация инденторов* — Геометрия алмазных инденторов по Виккерсу и Кнупу всех классов должна пройти прямую верификацию перед вводом в эксплуатацию.

Инструменты, используемые для верификации геометрических параметров индентора, должны иметь максимально расширенную неопределенность ( $k=2$ ) согласно Таблице А3.1.

#### А3.4 Индентор по Виккерсу Класса В

А3.4.1 Алмазный индентор по Виккерсу Класса В, см. Рис. А3.1, используемый для стандартного испытания и косвенных верификаций, должен иметь плоские углы  $136^{\circ} 0' \pm 30'$ . Четыре поверхности индентора по Виккерсу или Кнупу должны быть равно наклонены к оси индентора с точностью до  $\pm 30'$ .

А3.4.2 В качестве альтернативы плоские углы  $136^{\circ}$  могут верифицироваться путем измерения углов между противоположными кромками, а не поверхностями. При измерении углы кромки должны составлять  $148^{\circ} 6' 36'' \pm 45'$  и быть равно наклонены к оси индентора с точностью до  $\pm 30'$ .

А3.4.3 Сдвиг соединения поверхности, см. Рис. А3.1, не должен превышать 1 мкм при испытании с применением испытательной нагрузки 1 кгс и более. При испытаниях с применением испытательной нагрузки менее 1 кгс, сдвиг не должен превышать 0,5 мкм.

А3.4.4 В качестве альтернативы допускается проводить верификацию сдвига соединения поверхности с помощью микроскопа при увеличении по меньшей мере 500X для рассмотрения отпечатка, образованного индентором, и сравнения длины сдвига с известным размером.

#### А3.5 Индентор по Виккерсу Класса А

А3.5.1 Алмазный индентор по Виккерсу Класса А, используемый для аттестации мер твердости, должен иметь плоские углы, равные  $136^{\circ} 0' \pm 6'$ . Плоские углы должны быть равно наклонены к оси индентора с точностью до  $\pm 15'$ .

А3.5.2 В качестве альтернативы плоские углы  $136^{\circ}$  могут быть верифицированы путем измерения углов между противоположными кромками, а не поверхностями. При измерении углы кромки должны составлять  $148^{\circ} 6' 36'' \pm 9'$ , и быть равно наклонены относительно оси индентора с точностью до  $\pm 30'$ .

А3.5.3 Сдвиг соединения поверхности не должен превышать 0,3 мкм.

#### А3.6 Индентор по Кнупу Класса В

А3.6.1 Алмазный индентор по Кнупу Класса В, см. Рис. А3.2, используемый для стандартного испытания и косвенных верификаций, должен иметь внутренний угол продольной кромки А  $172^{\circ} 30' \pm 6'$ , и соответствующий угол кромки В  $130^{\circ} \pm 1^{\circ}$ . Две кромки угла А алмаза должны быть равны равно наклонены к оси индентора с точностью до  $\pm 30'$ , а две кромки угла В алмаза должны быть равны равно наклонены к оси индентора с точностью до  $\pm 30'$ .

**ТАБЛИЦА А3.1 Максимально расширенная неопределенность инструментов для верификации геометрических параметров индентора по Кнупу и по Виккерсу.**

Геометрические параметры	Класс индентора	Максимально расширенная неопределенность ( $k=2$ )
Углы	А и В	$0,07^{\circ}$
Сдвиг соединения	В	0,5 мкм
Сдвиг соединения	А	0,3 мкм

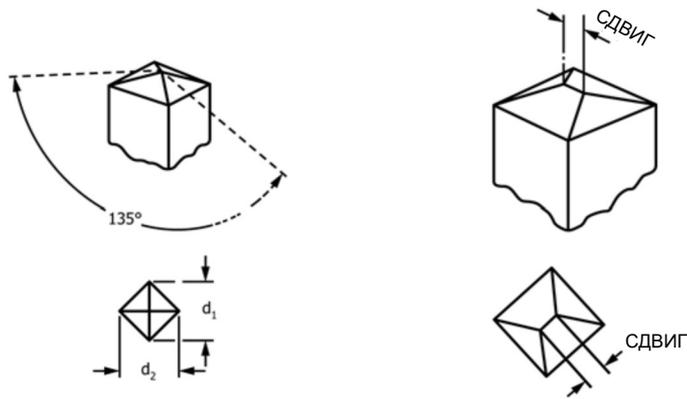


Рис. А3.1 Индентор по Виккерсу

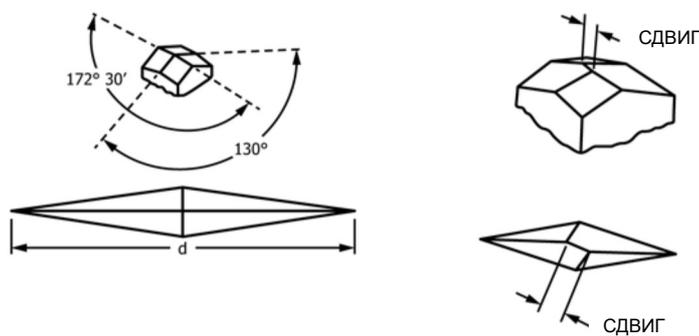


Рис. А3.2 Индентор по Кнупу

А3.6.2 Постоянная индентора ( $c_P$ ) должна составлять 0,07028 с точностью до  $\pm 1\%$ .

А3.6.3 Длина сдвига соединения поверхности не должна составлять более 1 мкм для отпечатков, длина которых составляет более 15 мкм, как показано на Рис. А3.2. Для более коротких отпечатков сдвиг должен быть пропорционально меньше. (См. А3.4.4.)

### А3.7 Индентор по Кнупу Класса А

А3.7.1 Алмазный индентор по Кнупу Класса А, используемый для аттестации мер твердости, должен соответствовать требованиям для индентора по Кнупу Класса в в А3.6, и иметь постоянную индентора  $0,07028 \pm 0,5\%$ . Сдвиг не должен превышать 0,5 мкм.

### А3.8 Маркировка

А3.8.1 Все инденторы должны выпускаться серийно. Если нанесение серийного номера на индентор является практически неосуществимым вследствие ограничений, обусловленных размером, то маркировку размера можно нанести на контейнер.

### А3.9 Сертификат

А3.9.1 Каждый индентор класса А или класса В должен иметь сертификат о калибровке, в котором содержится следующая информация (см. А3.1.4).

А3.9.1.1 Ссылка на настоящий метод испытания ASTM.

А3.9.1.2 Серийный номер индентора.

А3.9.1.3 Дата аттестации.

А3.9.1.4 Тип (по Виккерсу или Кнупу) и класс индентора (класс А или класс В).

А3.9.1.5 Результаты всех проведенных геометрических верификаций.

А3.9.1.6 Для индентора по Виккерсу класса В: наиболее низкая из возможных для использования испытательных нагрузок (1 гс или 1 кгс, в зависимости от значения сдвига соединения).

А3.9.1.7 Для индентора по Кнупу класса В: допустимо получение наименьшего отпечатка (в зависимости от значения сдвига соединения).

А3.9.1.8 Утверждение, заявляющее, что индентор соответствует всем требованиям к геометрии для индентора определенного типа и класса.

А3.9.1.9 Сертификационный номер органа аккредитации.

## A4. АТТЕСТАЦИЯ МЕР ТВЕРДОСТИ ПО ВИККЕРСУ И КНУПУ

### A4.1 Область применения

A4.1.1 Настоящее Дополнение устанавливает требования и процедуры для проведения аттестации мер твердости по Виккерсу и Кнупу, имеющих прослеживаемую связь с определенными стандартами по испытанию твердости. Такие аттестованные меры твердости предназначены для верификации эксплуатационных характеристик установок для испытаний по Виккерсу и Кнупу путем проведения периодических верификаций и косвенных верификаций согласно Дополнению A1.

A4.1.2 меры твердости, которые были аттестованы лабораторией, аккредитованной в соответствии с п. A4.2.1, согласно Методам испытаний E92 или Методу испытания E384 до выпуска настоящей редакции Методов испытаний E92, могут использоваться для удовлетворения требований настоящей редакции при условии, что они соответствуют всем требованиям Методов испытаний E92 (2003) или Метода испытания E384-09 или более поздних редакций.

### A4.2 Аккредитация

A4.2.1 Орган, который проводит аттестацию мер твердости, должен быть аккредитован согласно требованиям ISO/IEC 17025 (или эквивалентного документа) аккредитующим органом, признанным Международной ассоциацией по аккредитации лабораторий (ILAC) как действующий, согласно требованиям ISO/IEC 17011. Орган, проводящий аттестацию, должен иметь сертификат/область аккредитации, указывающий шкалы твердости по Виккерсу и Кнупу, на которые распространяется данная аккредитация, а также стандарты, по которым имеется прослеживаемая связь с аттестацией мер твердости.

A4.2.2 Учреждение, которое было аккредитовано в соответствии с п. A4.2.1 для аттестации инденторов до выпуска настоящей редакции Методов испытаний E92, имеющее действительный и актуальный сертификат/область аккредитации со ссылкой на Метод испытания E384, удовлетворяет требованиям аккредитации настоящей редакции.

### A4.3 Изготовление мер твердости

A4.3.1 Толщина меры твердости должна превышать более, чем в двадцать раз глубину отпечатка, сделанного с помощью аттестованной испытательной нагрузки.

A4.3.2 Необходимо выбрать материал меры твердости и производственные процессы для получения требуемой степени однородности, структурной устойчивости и равномерной твердости на подготовленной поверхности.

A4.3.3 Ферромагнитные меры твердости должны быть размагничены производителем и поддерживаться в таком состоянии пользователем.

A4.3.4 Поверхность держателя меры твердости должна быть тщательно отшлифована. Максимальное отклонение от плоскостности испытательной и опорной поверхностей не должна превышать 5 мкм. Максимальная непараллельность не должна превышать 15 мкм на 30 мм.

A4.3.5 Рабочая поверхность меры твердости должна быть отполирована в соответствии с процедурами, представленными в Методах E3, для выработки натуральной микроструктуры без царапин, которые могут препятствовать получению отпечатка или измерению его диагонали(-ей). Среднее значение, среднее арифметическое отклонение профиля, измерение высоты

шероховатости рабочей поверхности не должно превышать 0,1 мкм (4 мкддойма).

A4.3.6 Повторная полировка меры твердости влечет за собой признание аттестации недействительной и не рекомендуется к проведению. Очистка отполированной поверхности меры твердости часто требуется при нормальном использовании, но не должна вносить изменения в твердость или качество отполированной рабочей поверхности.

### A4.4 Требования к аттестационному прибору

A4.4.1 Аттестация мер твердости должна проводиться с помощью твердомера для аттестации по Кнупу или Виккерсу, которая соответствует всем требованиям Дополнения A2.

A4.4.2 *Инденторы* — Должны использоваться инденторы по Виккерсу и Кнупу Класса А согласно Дополнению A3.

A4.4.3 *Испытательный цикл* — Время применения испытательной нагрузки должно составлять от 5 до 7 секунд. Время выдержки под испытательной нагрузкой должно составлять от 13 до 15 секунд.

### A4.5 Процедура аттестации меры твердости

A4.5.1 Проведите по меньшей мере пять измерений твердости, распределенных по поверхности меры твердости следующим образом — по одному отпечатку рядом с центром каждого из четырех квадрантов меры и пятое рядом с центром меры твердости. Если сделано более пяти отпечатков, то они должны быть расположены вокруг рабочей поверхности аналогичным образом.

A4.5.2 Отрегулируйте освещение измерительной системы для получения равномерной интенсивности поля обозрения и оптимального контраста между отпечатками и поверхностью меры.

A4.5.3 Измерьте длину продольной диагонали по Кнупу или среднюю длину диагоналей по Виккерсу каждого отпечатка. Запишите данные по расположению или по у.

### A4.6 Повторяемость аттестованной меры твердости

A4.6.1 Пусть  $d_1, d_2, \dots, d_5$  будут представлять собой пять значений измерений диагоналей, а  $\bar{d}$  — среднее значение по пяти измерениям, вычисленным с помощью Уравнения 1. Определите повторяемость  $R$  калибровочных измерений с помощью Уравнения 2. Повторяемость  $R$  является указанием на равномерную твердость меры твердости, несмотря на то, что  $R$  подверглось влиянию всех переменных, воздействующих на повторяемость результатов испытания. Повторяемость  $R$  должна находиться в пределах допусков согласно Таблице A4.1 или Таблице A4.2, в которых перечислены максимальные значения  $R$  для меры твердости по типу индентора, диапазон испытательной нагрузки и диапазон твердости. Измеренное значение  $R$  должно быть меньше этих пределов, чтобы считаться в достаточной степени равномерным по твердости для выполнения функций аттестованной меры твердости.

### A4.7 Маркировка

A4.7.1 На каждую меру должна быть нанесена идентификационная маркировка с указанием наименования или идентификационной отметки органа, проводящего аттестацию, соответствующего идентификационного серийного номера и отметки на рабочей поверхности, которая будет стерта в случае повторного полирования поверхности.

**ТАБЛИЦА А4.1 Повторяемость измерений диагонали для аттестованных мер твердости, откалиброванных в диапазонах нагрузки микровдавливания ( $\leq 1$  кгс)<sup>А</sup>**

Диапазон твердости аттестованных мер твердости		Нагрузка, гс	R, %, Менее, чем
По Кнупу	По Виккерсу		
НК > 0	HV > 0	$1 \leq F < 100$	12
НК < 100	HV < 100	$100 < F \leq 1000$	12
$100 \leq НК \leq 250$	$100 \leq HV \leq 240$	$100 \leq F < 500$	12
$250 < НК \leq 650$	$240 < HV \leq 600$		4
НК > 650	HV > 600		3
$100 \leq НК \leq 250$	$100 \leq HV \leq 240$	$500 \leq F \leq 1000$	7
$250 < НК \leq 650$	$240 < HV \leq 600$		3
НК > 650	HV > 600		2

<sup>А</sup> Во всех случаях предел повторяемости является большим в заданном процентном отношении или 0,001 мм (1 мкм).

**ТАБЛИЦА А4.2 Повторяемость измерений диагонали для аттестованных мер твердости, откалиброванных в диапазонах нагрузки микровдавливания ( $> 1$  кгс)<sup>А</sup>**

Диапазон твердости аттестованных мер твердости	Нагрузка, гс	Максимум, R%
От 100 до 240 включительно	> 1	3
От 240 до 600 включительно	>1	2
От 600	>1	1,5

<sup>А</sup> Во всех случаях предел повторяемости является большим в заданном процентном отношении или 0,001 мм (1 мкм).

A4.7.2 Если меры твердости заключены в оболочку из гистологической среды, то должны быть нанесены износостойкие отметки, перечисленные в A4.7.1, на поверхность оболочки рабочей поверхности.

A4.7.3 Каждое из калибровочных измерений должно быть идентифицировано так, чтобы пользователь мог определить их положение.

A4.8 Аттестация меры твердости.

A4.8.1 Сертификат, сопровождающий каждую аттестованную меру для испытания на твердость, должен включать как минимум следующую информацию. (См. A4.1.2.)

A4.8.1.1 Средняя длина диагонали и расположение каждого из аттестованных отпечатков.

A4.8.1.2 Среднее значение всех средних длин диагоналей отпечатков и соответствующее значение твердости.

A4.8.1.3 Испытательное усилие.

A4.8.1.4 Серийный номер меры твердости.

A4.8.1.5 Наименование производителя или организации по аттестации.

A4.8.1.6 Используемое увеличение для измерения аттестованных отпечатков.

A4.8.1.7 Дата проведения аттестации.

A4.8.1.8 Ссылка на настоящий метод испытания ASTM.

A4.8.1.9 Значение неопределенности аттестованного значения с объяснением того, каким образом рассчитывалась неопределенность.

A4.8.1.10 Сертификационный номер аккредитационного агентства.

## A5. ПОПРАВочНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА ТВЕРДОСТЬ ПО ВИККЕРСУ, ПРОВЕДЕННЫХ НА СФЕРИЧЕСКИХ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

A5.1 Таблицы A5.1-A5.3 предоставляют поправочные коэффициенты, которые могут применяться к значениям твердости по Виккерсу, полученным при испытаниях, проводимых на сферических или цилиндрических поверхностях. Поправочные коэффициенты сведены в таблице, выраженные в соотношении средней диагонали  $d$  отпечатка и диаметром  $D$  сферы или цилиндра. Примеры использования данных Таблиц представлены в Примерах A5.1 и A5.2.

### Пример A5.1

Выпуклая сфера  
 Диаметр сферы,  $D = 10$  мм, усилие,  $F = 10$  кгс  
 Средняя диагональ вдавливания,  $d = 0,150$  мм  
 $d/D = 0,150/10 = 0,015$   
 Согласно Уравнению 7 и Таблице 2,  $HV = 824$   
 Согласно Таблице A5.1, полученный путем интерполяции поправочный коэффициент = 0,983  
 Твердость сферы =  $824 \times 0,983 = 810$  HV 10

### Пример A5.2

Вогнутый цилиндр, одна диагональ параллельна диаметральной оси цилиндра,  $D = 5$  мм, Нагрузка,  $F = 30$  кгс  
 Средняя диагональ вдавливания,  $d = 0,415$  мм  
 $d/D = 0,415/5 = 0,083$   
 Согласно Уравнению 7 и Таблице 2,  $HV = 323$   
 Согласно Таблице A5.3, поправочный коэффициент = 1,075 Твердость цилиндра =  $323 \times 1,075 = 347$  HV 30

ПРИМЕЧАНИЕ A5.1 — Метод поправки показателей твердости по Виккерсу, полученных на сферической или цилиндрической поверхности, можно найти в Стандарте по твердости по Виккерсу (ISO 6507-1) Международной организации по стандартизации (ISO).

**ТАБЛИЦА А5.1 Поправочные коэффициенты для использования в испытаниях на твердость по Виккерсу, проводимых на сферических поверхностях**

Выпуклая поверхность		Вогнутая поверхность	
$d/D^A$	Поправочный коэффициент	$d/D^A$	Поправочный коэффициент
0,004	0,995	0,004	1,005
0,009	0,990	0,008	1,010
0,013	0,985	0,012	1,015
0,018	0,980	0,016	1,020
0,023	0,975	0,020	1,025
0,028	0,970	0,024	1,030
0,033	0,965	0,028	1,035
0,038	0,960	0,031	1,040
0,043	0,955	0,035	1,045
0,049	0,950	0,038	1,050
0,055	0,945	0,041	1,055
0,061	0,940	0,045	1,060
0,067	0,935	0,048	1,065
0,073	0,930	0,051	1,070
0,079	0,925	0,054	1,075
0,086	0,920	0,057	1,080
0,093	0,915	0,060	1,085
0,100	0,910	0,063	1,090
0,107	0,905	0,066	1,095
0,114	0,900	0,069	1,100
0,122	0,895	0,071	1,105
0,130	0,890	0,074	1,110
0,139	0,885	0,077	1,115
0,147	0,880	0,079	1,200
0,156	0,875	0,082	1,125
0,165	0,870	0,084	1,130
0,175	0,865	0,087	1,135
0,185	0,860	0,089	1,140
0,195	0,855	0,091	1,145
0,206	0,850	0,094	1,150

<sup>A</sup>  $D$  = диаметр цилиндра, в миллиметрах;  $d$  = средняя диагональ вдавливания, в миллиметрах.

**ТАБЛИЦА А5.2 Поправочные коэффициенты для использования в испытаниях на твердость по Виккерсу, проводимых на цилиндрических поверхностях (Диагонали, расположенные на 45° к оси)**

Выпуклая поверхность		Вогнутая поверхность	
$d/D^A$	Поправочный коэффициент	$d/D^A$	Поправочный коэффициент
0,009	0,995	0,009	1,005
0,017	0,990	0,017	1,010
0,026	0,985	0,025	1,015
0,035	0,980	0,034	1,020
0,044	0,975	0,042	1,025
0,053	0,970	0,050	1,030
0,062	0,965	0,058	1,035
0,071	0,960	0,066	1,040
0,081	0,955	0,074	1,045
0,090	0,950	0,082	1,050
0,100	0,945	0,089	1,055
0,109	0,940	0,097	1,060
0,119	0,935	0,104	1,065
0,129	0,930	0,112	1,070
0,139	0,925	0,119	1,075
0,149	0,920	0,127	1,080
0,159	0,915	0,134	1,085
0,169	0,910	0,141	1,090
0,179	0,905	0,148	1,095
0,189	0,900	0,155	1,100
0,200	0,895	0,162	1,105
		0,169	1,110
		0,176	1,115
		0,183	1,120
		0,189	1,125
		0,196	1,130
		0,203	1,135
		0,209	1,140
		0,216	1,145
		0,222	1,150

<sup>A</sup>  $D$  = диаметр цилиндра, в миллиметрах;  $d$  = Средняя диагональ вдавливания, в миллиметрах.

**ТАБЛИЦА А5.3 Поправочные коэффициенты для использования в испытаниях на твердость по Виккерсу, проводимых на цилиндрических поверхностях (Одна диагональ параллельно оси)**

Выпуклая поверхность		Вогнутая поверхность	
$d/D^A$	Поправочный коэффициент	$d/D^A$	Поправочный коэффициент
0,009	0,995	0,008	1,005
0,019	0,990	0,016	1,010
0,029	0,985	0,023	1,015
0,041	0,980	0,030	1,020
0,054	0,975	0,036	1,025
0,068	0,970	0,042	1,030
0,085	0,965	0,048	1,035
0,104	0,960	0,053	1,040
0,126	0,955	0,058	1,045
0,153	0,950	0,063	1,050
0,189	0,945	0,067	1,055
0,243	0,940	0,071	1,060
		0,076	1,065
		0,079	1,070
		0,083	1,075
		0,087	1,080
		0,090	1,085
		0,093	1,090
		0,097	1,095
		0,100	1,100
		0,103	1,105
		0,105	1,110
		0,108	1,115
		0,111	1,120
		0,113	1,125
		0,116	1,130
		0,118	1,135
		0,120	1,140
		0,123	1,145
		0,125	1,150

<sup>A</sup>  $D$  = диаметр цилиндра, в миллиметрах;  $d$  = средняя диагональ вдавливания, в миллиметрах.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### (Необязательная информация)

#### X1. ПРИМЕРЫ ПРОЦЕДУР ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ТВЕРДОСТИ ПО ВИККЕРСУ И КНУПУ

X1.1.1 Целью настоящего приложения является предоставление основного подхода к оценке неопределенности значений измерения твердости по Виккерсу и Кнупу для упрощения и унификации интерпретации неопределенности твердости по Виккерсу и Кнупу пользователями.

X1.1.2 Настоящее приложение предоставляет основные процедуры установления неопределенности следующих значений твердости:

X1.1.2.1 *Погрешность твердомера, определенная в рамках косвенной верификации (см. п. X1.6)* — В качестве части косвенной верификации, проводится ряд измерений твердости на эталонной мере твердости. В соответствии с Дополнением A1, рассчитывается погрешность  $E$  в виде процентной (%) погрешности, основанной на длинах диагоналей, но не на значениях твердости (см. Уравнение 3). Установление неопределенности данного значения является проблематичным, т. к. помимо разрешения системы измерения отпечатков, неопределенность также зависит от приложения нагрузок, геометрии индентора и других параметров, но это дает мало информации для заказчика. Более точным указанием на неопределенность измерения является неопределенность

разницы, или погрешность твердости  $E_H$ , между средним значением показателей измерения твердости и аттестованным значением твердости эталонной меры. Процедура, описанная в пункте X1.6, предоставляет метод установления неопределенности погрешности измерения твердости  $E_H$  твердомера. Значение неопределенности может быть занесено в сертификат верификации и отчет, и оно несет практическую пользу для пользователей при установлении неопределенности их собственных измерений.

X1.1.2.2 Значение твердости, измеренное пользователем (см. п. X1.7) — Процедура предоставляет метод установления неопределенности значений твердости, измеренных пользователем во время нормального использования твердомера. Пользователь может внести в отчет значение неопределенности со значением, полученным при измерении.

X1.1.2.3 *Аттестованное значение меры твердости (см. п. X1.8)* — Процедура предоставляет метод установления неопределенности аттестованного значения аттестованных мер твердости. Орган по аттестации может сообщить значение неопределенности в сертификате к мере твердости

Примечание X1.1 — При расчете, значения неопределенности,

сообщенные органом по калибровке в условиях эксплуатации (см. п. X1.6), не являются неопределенностью измерений твердомера при эксплуатации, ими являются только те измерения, которые проведены во время верификации для установления «погрешности» твердомера.

**ПРИМЕЧАНИЕ X1.2** — Описанные в настоящем приложении процедуры для установления неопределенностей в первую очередь базируются на измерениях, являющихся частью процедур верификации и стандартизации настоящего метода испытания. Это делается для того, чтобы предоставить метод, который базируется на известных процедурах и практических руководствах по твердости по Виккерсу и Кнупу для пользователей и органов, проводящих аттестацию. Следует, чтобы читатель был осведомлен о том, что существуют другие методы, которые можно использовать для установления таких же неопределенностей, которые могут предоставить более точные оценки значений неопределенности.

**ПРИМЕЧАНИЕ X1.3** — Настоящий стандарт определяет допуски и ограничения к допустимым показателям повторяемости и погрешности твердомера по Виккерсу или Кнупу (Таблица A1.3 и Таблица A1.4), а также неоднородности аттестованных мер (Таблица A4.1 и Таблица A4.2). Данные значения ограничений изначально были установлены на основе испытательного опыта многих пользователей испытания твердости по Виккерсу и Кнупу, и, таким образом, отражают нормальные эксплуатационные характеристики надлежащего функционирования твердомера по Виккерсу или Кнупу, включая нормальные погрешности, связанные с процедурой измерения и эксплуатационными характеристиками твердомера. Так как ограничения основываются на испытательном опыте, предполагается, что установленные значения ограничений учитывают типичный уровень неопределенности для действительных измерений твердости по Виккерсу и Кнупу. Таким образом, при определении соответствия с Таблицей A1.3, Таблицей A1.4, Таблицей A4.1 и Таблицей A4.2, неопределенность измерения пользователя не должна вычитаться из значений предела допуска, представленных в Таблицах, в отличие от других типов метрологических измерений. Рассчитанные значения для повторяемости, погрешности или неоднородности а должны быть непосредственно сопоставлены с пределами допусков, представленными в Таблицах.

**ПРИМЕЧАНИЕ X1.4** — Для большинства продуктов были установлены технические условия на допуск твердости по Виккерсу и Кнупу на основе испытательного и эксплуатационного опыта. Значения допуска отражают нормальные рабочие характеристики твердомеров по Виккерсу и Кнупу, функционирующих надлежащим образом, включая нормальные допустимые погрешности, связанные с процессом измерения твердости. Для данных продуктов установленные пределы допусков учитывают типичный уровень неопределенности для действительных измерений твердости по Виккерсу и Кнупу. Таким образом, во время проведения приемочных испытаний большинства продуктов на твердость по Виккерсу или Кнупу, неопределенность измерения пользователя не должна вычитаться из значений предела допуска, представленных в технических условиях. Измеренные значения твердости должны быть непосредственно сопоставлены с допусками. Могут возникнуть исключительные обстоятельства, когда твердость продукта должна находиться в установленных пределах до высокого доверительного уровня. При таких редких случаях следует получить специальное соглашение между задействованными сторонами до вычитания неопределенности измерения твердости из пределов допуска. До формирования такого соглашения рекомендуется, чтобы конструкция продукта учитывала предусмотренное влияние материала и металлургических факторов на вариацию продукта, также типичные промышленные значения неопределенности твердости.

**X1.1.3** Настоящее приложение не учитывает неопределенности на уровне стандартизации первичного эталона.

## X1.2 Уравнения

**X1.2.1** Среднее значение (*AVG*)  $\bar{H}$  ряда  $n$  измерений твердости  $H_1, H_2, \dots, H_n$  рассчитывается следующим образом:

$$AVG(H_1, H_2, \dots, H_n) = \bar{H} = \frac{H_1 + H_2 + \dots + H_n}{n} \quad (X1.1)$$

**X1.2.2** Стандартное отклонение (*STDEV*) ряда  $n$  измерений твердости  $H_1, H_2, \dots, H_n$  рассчитывается следующим образом:

$$STDEV(H_1, H_2, \dots, H_n) = \sqrt{\frac{(H_1 - \bar{H})^2 + \dots + (H_n - \bar{H})^2}{n - 1}} \quad (X1.2)$$

где  $\bar{H}$  является средним значением ряда  $n$  измерений твердости  $H_1, H_2, \dots, H_n$  согласно Уравнению X1.1.

**X1.2.3** Абсолютным значением (*ABS*) числа является величина значения независимо от его знака, например:

$$ABS(0,12) = 0,12$$

а также

$$ABS(-0,12) = 0,12$$

## X1.3 Общие требования

**X1.3.1** Способ установления неопределенности, представленный в настоящем приложении, рассматривает только неопределенности, связанные с общей производительностью измерений твердомера по Виккерсу или Кнупу относительно стандартных образцов. Такие неопределенности характеристик отражают совокупный эффект отдельных неопределенностей, связанных с многочисленными отдельными комплекующими твердомера, например система приложения силы и система измерения отпечатка. Таким образом, неопределенности, связанные с отдельными комплекующими твердомера не включены в расчеты. В связи с данным способом важно, чтобы отдельные комплекующие твердомера функционировали в пределах допусков. Настоятельно рекомендуется, чтобы данная процедура выполнялась только после успешного проведения прямой верификации.

**X1.3.2** Процедуры, представленные в настоящем приложении, применимы только при условии, что твердомер по Виккерсу или Кнупу прошел косвенную верификацию в соответствии с процедурами и графиками настоящего стандартного метода испытания.

**X1.3.3** Процедуры расчета неопределенности значений измерения твердости по Виккерсу и Кнупу являются аналогичными как для твердомеров для аттестации, так и для испытательного твердомера. Принципиальной разницей является уровень иерархии эталонных мер твердости, которые обычно используются для косвенной верификации. Как правило, твердомеры для аттестации верифицируются с помощью стандартных эталонных образцов, а испытательные твердомеры верифицируются с помощью вторичных стандартных образцов.

**X1.3.4** Для оценки общей неопределенности значений измерения твердости по Виккерсу и Кнупу, необходимо установить комплекующие, оказывающие воздействие на неопределенность. Поскольку многие неопределенности могут варьироваться в зависимости от определенной шкалы твердости и уровня твердости, то следует устанавливать отдельную неопределенность измерения для каждой необходимой шкалы твердости и уровня твердости. Во многих случаях отдельное значение неопределенности может применяться к диапазону уровней твердости, основанном на лабораторном опыте и известных данных по функционированию твердомера.

**X1.3.5** Неопределенность следует устанавливать относительно стандартного образца наивысшего по стране уровня или государственного стандартного образца другой страны. В некоторых случаях стандартным образцом наивысшего по стране уровня может являться коммерческий стандартный образец.

## X1.4 Общая процедура

**X1.4.1** Данная процедура вычисляет совокупную стандартную неопределенность  $u_c$  путем суммирования комплекующих, способствующих неопределенности,  $u_1, u_2, \dots, u_n$ , следующим образом:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \quad (X1.3)$$

X1.4.2 Неопределенность измерения обычно выражается в виде расширенной неопределенности  $U$ , которая вычисляется путем умножения совокупной стандартной неопределенности  $u_c$  на количественный коэффициент охвата  $k$ , следующим образом:

$$U = k \times u_c \quad (X1.4)$$

X1.4.3 Выбор коэффициента охвата зависит от того, насколько точно оценена неопределенность (количество измерений), а также от необходимого уровня неопределенности. Для данного анализа следует использовать коэффициент охвата  $k = 2$ . Такой коэффициент охвата обеспечивает доверительный уровень приблизительно 95 %.

X1.4.4 Смещение измерения  $B$  твердомера представляет собой разницу между ожидаемыми значениями измерения твердости, отображаемыми твердомером и “фактической” твердостью материала. В идеальном варианте следует поправить смещения измерений. Если в испытательных системах не введены поправки на смещения измерений, что часто наблюдается при испытаниях твердости по Виккерсу и Кнупу, то смещения способствуют общей неопределенности измерений. Существует ряд возможных методов включения смещений в вычисление неопределенности, каждый из которых имеет как преимущества, так и недостатки. Простой и консервативный метод подразумевает комбинацию смещений с вычислением расширенной неопределенности следующим образом:

$$U = ku_c + ABS(B) \quad (X1.5)$$

где  $ABS(B)$  — это абсолютное значение смещения.

X1.4.5 Так как могут использоваться несколько подходов к оценке и выражению неопределенности измерения, следует включать краткое описание того, что представляют сообщаемые значения неопределенности с сообщаемыми значениями неопределенности.

## X1.5 Источники неопределенности

X1.5.1 В данном пункте описывается большинство значимых источников неопределенности в измерениях твердости по Виккерсу или Кнупу и предоставляет процедуры и формулы для вычисления общей неопределенности значения твердости. В последующих пунктах будет представлено то, как источники неопределенности способствуют общей неопределенности измерения для трех условий измерения, описанных в X1.1.2.

X1.5.2 Рассматриваемыми источниками неопределенности являются (1) недостаточная повторяемость твердомера, (2) неравномерная твердость испытываемого материала, (3) недостаточная воспроизводимость твердомера, (4) разрешение экрана измерения отпечатка твердомера и (5) неопределенность аттестованного значения эталонных аттестованных мер твердости. Также рассматривается оценка смещений измерения и их включение в расширенную неопределенность.

X1.5.3 *Неопределенность, обусловленная недостаточной повторяемостью ( $u_{Repeat}$ ) и совмещением с неравномерностью ( $u_{Rep\&N/U}$ )* — Повторяемость твердомера является признаком того, насколько хорошо он может непрерывно выдавать одно значение твердости при каждом измерении. Представим материал, который имеет равномерную твердость по всей поверхности. Также представим, что измерения твердости повторно проводились на данном однородном материале в течение короткого промежутка времени без измерений условий проведения испытания, в том числе оператора. Даже несмотря на то, что фактическая твердость каждого места проведения испытания является абсолютно одинаковой, может быть обнаружено, что вследствие случайных погрешностей каждое значение измерения будет отличаться от всех других значений измерений (принимая во внимание достаточное разрешение измерения). Вследствие чего недостаточная повторяемость препятствует тому, чтобы твердомер мог постоянно измерять фактическую твердость материала, и, следовательно,

способствует неопределенности измерения.

X1.5.3.1 Содействие недостаточной повторяемости твердомера общей неопределенности измерения определяется различными способами в зависимости от того, нужно ли вносить в отчет значение отдельного измерения или среднее значение нескольких измерений. Кроме того, в случаях, когда сообщаемое среднее значение измерений предназначается для оценки средней твердости испытываемого материала, становится проблематично разделить составляющие неопределенности, обусловленная недостаточной повторяемостью твердомера и неравномерностью твердости испытываемого материала, и их необходимо устанавливать вместе. Составляющие неопределенности для каждого из трех условий могут быть оценены следующим образом.

X1.5.3.2 *Отдельное измерение твердости* — Для предстоящего отдельного измерения твердости, обусловленного недостаточной повторяемостью, может быть оценена стандартная составляющая неопределенности  $u_{Repeat}$ , с помощью стандартного отклонения значений от числа измерений твердости, проведенных на однородном образце для испытания, следующим образом:

$$u_{Repeat} = STDEV(H_1, H_2, \dots, H_n) \quad (X1.6)$$

где  $H_1, H_2, \dots, H_n$  — это  $n$  значений твердости. Как правило, оценка повторяемости улучшается при увеличении числа измерений твердости. Обычно значения твердости, измеренные во время косвенной верификации, предоставляют корректную оценку  $u_{Repeat}$ ; однако следует учитывать меры предосторожности, описанные в Примечании X1.6. Для пользователя может быть более целесообразным определение значения  $u_{Repeat}$  путем проведения близкорасположенных измерений твердости (в пределах интервалов) на однородном материале, например, мере твердости.

ПРИМЕЧАНИЕ X1.5 — Неопределенность  $u_{Repeat}$ , обусловленная недостаточной повторяемостью твердомера, как было указано выше, не следует путать с исторически определенной «повторяемостью», что является требованием, соответствие которому является частью косвенной верификации (см. п. A1.4.7.3). Вычисления неопределенности  $u_{Repeat}$  исторически определенной повторяемости не производят одинаковое значение. Неопределенность  $u_{Repeat}$  является способствующим фактором относительно общей неопределенности значения измерения твердости, обусловленная недостаточной повторяемостью твердомера, в то время как исторически определенная повторяемость представляет собой диапазон значений твердости, измеренной во время проведения косвенной верификации.

ПРИМЕЧАНИЕ X1.6 — Все материалы демонстрируют некоторую степень неравномерного распределения твердости на рабочей поверхности. Таким образом, описанная выше оценка составляющей неопределенности, обусловленная недостаточной повторяемостью, также будет включать в себя способствующий фактор неравномерного распределения твердости на измеряемом материале. При оценке повторяемости описанным выше способом любая неоднородность по возможности должна быть сведена к минимуму. Лабораторию следует предупредить, что, если измерения повторяемости основаны на испытаниях, проведенных на поверхности материала, то значение повторяемости вероятно будет включать в себя значительную составляющую неопределенности, обусловленную неоднородностью материала. Повторяемость твердомера лучше оценивается путем проведения близкорасположенных измерений твердости (в пределах интервалов).

X1.5.3.3 *Усредненное значение нескольких измерений* — Если в отчет необходимо внести усредненное значение нескольких результатов испытания твердости, то вследствие недостаточной повторяемости твердомера стандартная составляющая неопределенности  $u_{Repeat}$  может быть оценена путем деления стандартной составляющей неопределенности  $u_{Repeat}$  (предварительно вычисленной из числа измерений твердости, проведенных на однородном образце для испытания, см. п. X1.5.3.1) на квадратный корень числа усредненных результатов испытания твердости следующим образом:

$$u_{Repeat} = \frac{u_{Repeat}}{\sqrt{n_T}} \quad (X1.7)$$

где  $u_{Repeat}$  рассчитывается с помощью Уравнения X1.6, а  $n_T$  — это число отдельных усредненных значений испытания твердости.

**X1.5.3.4 Оценка твердости материала** — Измерения твердости часто проводятся в нескольких местах и на значениях, усредненных для оценки средней твердости материала в целом. Например, это можно выполнить путем проведения измерений контроля качества во время производства изделий различного типа; при определении погрешности твердомера  $E$ , как части косвенной верификации; а также при калибровке меры твердости. Поскольку все материалы демонстрируют некоторую степень неравномерного распределения твердости на рабочей поверхности, чрезмерная неоднородность материала также способствует неопределенности при данной оценке средней твердости материала. Если среднее значение нескольких результатов измерения твердости вычисляется как оценка среднего материала или твердости продукта, то может потребоваться установление неопределенности данного значения относительно фактической твердости материала. В данном случае вследствие недостаточной повторяемости твердомера и неоднородности испытательного материала комбинация составляющих неопределенности может быть оценена из «стандартного отклонения среднего значения» результатов измерения твердости. Она рассчитывается как стандартное отклонение значений твердости, разделенное на квадратный корень числа измерений, следующим образом:

$$u_{Rep\&NU} = \frac{STDEV(H_{T1}, H_{T2}, \dots, H_{Tn})}{\sqrt{n_T}} \quad (X1.8)$$

где  $H_{T1}, H_{T2}, \dots, H_{Tn}$  — это  $n_T$  значений измерений.

**X1.5.4 Неопределенность, обусловленная недостаточной воспроизводимостью ( $u_{Reprod}$ )** — Ежедневные вариации рабочих характеристик твердомера известны как уровень его воспроизводимости. Такие вариации, как разные операторы твердомера или изменения в испытательной среде часто влияют на эксплуатационные характеристики твердомера. Уровень воспроизводимости лучше определять путем контроля эксплуатационных характеристик твердомера на протяжении длительного периода времени, в течение которого твердомер испытывает максимальные вариации испытательных переменных. Очень важно, чтобы испытательный твердомер находился под контролем во время оценки воспроизводимости. Если твердомер нуждается в техническом обслуживании или некорректно функционирует, то недостаточная воспроизводимость будет переоценена.

**X1.5.5 Оценка недостаточной воспроизводимости твердомера** должна основываться на периодических контрольных измерениях твердомера, например, измерения периодической верификации, проводимые с течением времени на одной мере твердости. Составляющая неопределенности может оцениваться с помощью стандартного отклонения усредненного значения каждого набора контрольных значений следующим образом:

$$u_{Reprod} = STDEV(M_1, M_2, \dots, M_n) \quad (X1.9)$$

где  $M_1, M_2, \dots, M_n$  — это отдельные средние значения по каждому из  $n$  наборов из нескольких значений контрольных измерений.

**ПРИМЕЧАНИЕ X1.7** — Составляющая неопределенности, обусловленная недостаточной воспроизводимостью, согласно расчетам по Уравнению X1.9, также включает в себя способствующий фактор недостаточной повторяемости твердомера и неоднородности контрольной меры твердости; однако, такие способствующие факторы основаны на усредненном значении нескольких измерений, и из-за них не следует сильно переоценивать неопределенность воспроизводимости.

**X1.5.6 Неопределенность, обусловленная разрешением**

*системы измерения отпечатка ( $u_{Resol}$ )* — Ограниченная разрешающая способность системы измерения отпечатка препятствует тому, чтобы твердомер демонстрировал абсолютно точное значение твердости. Составляющая неопределенности  $u_{Resol}$ , обусловленная влиянием разрешения измерительной системы  $r_H$ , может быть описана с помощью прямоугольного распределения и оценена следующим образом:

$$u_{Resol} = \frac{r_H/2}{\sqrt{3}} = \frac{r_H}{\sqrt{12}} \quad (X1.10)$$

где  $r_H$  — это предел разрешения, при котором значение твердости может быть оценено из измерительной системы диагонали отпечатка в единицах твердости. Важно отметить, что предел разрешения  $r_H$  будет зависеть не только от разрешения длины  $r_d$  системы измерения отпечатка, но также от значения твердости  $\bar{H}$  и соответствующей длины диагонали  $d$ . Разрешение измерения в единицах длины диагонали может быть конвертировано в разрешение в единицах твердости следующим образом:

**ПРИМЕЧАНИЕ X1.8** — Влияние разрешения измерения может серьезно воздействовать на неопределенность измерения HV и НК, особенно для отпечатков небольших размеров. Рассмотрите случай измерения отпечатка небольшого размера, например, имеющего длину диагонали 25 мкм, с помощью измерительной системы, имеющей разрешение 1 мкм. Вероятно, что каждое измерение отпечатка продемонстрирует одинаковое значение измерения, указывая на то, что неопределенность измерения, обусловленная (недостаточной) повторяемостью, будет незначительной или нулевой в своей способности к измерению длины диагонали отпечатка. Однако вероятно, что причина не в этом. Возможно, что фактическая неопределенность повторяемости измерения является более высокой вследствие разрешения измерения.

Следует учитывать несколько факторов при установлении того, как разрешение способствует общей неопределенности измерения твердости. Влияние разрешения также зависит от типа используемой системы измерения. В большинстве случаев длина диагонали отпечатка по Виккерсу или Кнупу измеряется путем определения положения и разрешения кромок отпечатка на каждом конце диагонали. Способность измерительной системы обеспечивать разрешение кромок отпечатка частично является следствием инкрементного разрешения системы, а также оптического разрешения объектива микроскопа. В случае видеоизмерительной системы, инкрементное разрешение может быть основано на интервале возрастающей длины, наблюдаемой на пробе, соответствующей двум близлежащим пикселям дисплея, ли на том, как разрешение видео предоставляет измерительное программное обеспечение. В случае использования оптического микроскопа с нитяным окуляром инкрементное разрешение может быть основано на разрешении дисплея измерений или шкале микрометра. Разрешение измерительной системы также зависит от разрешения объектива микроскопа, основанного на длине волны света, используемой для визуального анализа отпечатка и числовой апертуры линзы (см. п. 7.9.1).

Для определения общей неопределенности измерений, обусловленной разрешением измерений, следует принимать во внимание как инкрементное разрешение системы  $u_{Resol(incr)}$ , так и оптическое разрешение объектива микроскопа  $u_{Resol(obj)}$ .

Неопределенность измерения твердости, обусловленная разрешением кромок одного конца диагонали отпечатка, является  $u_{Resol}^2 = u_{Resol(incr)}^2 + u_{Resol(obj)}^2$ , рассчитывая  $u_{Resol(incr)}$  и  $u_{Resol(obj)}$  с помощью Уравнения X1.10 после проведения конвертации  $r_d$  в  $r_H$  в соответствии с Уравнением X1.11. Так как измерение длины диагонали обычно заключается в разрешении двух кромок диагонали, неопределенность, обусловленная разрешением двух концов диагонали отпечатка, составляет  $u_{Resol}^2 = 2 \times (u_{Resol(incr)}^2 + u_{Resol(obj)}^2)$ , что является неопределенностью, обусловленной разрешением измерения отдельной длины диагонали. Для измерения твердости по Кнупу или по Виккерсу,

$$u_{Resol} = \sqrt{2 \times (u_{Resol(incr)}^2 + u_{Resol(obj)}^2)}$$

**X1.5.7 Стандартная неопределенность аттестованного значения усредненной твердости эталонной меры твердости ( $u_{RefBlik}$ )** — Эталонные меры твердости обеспечивают связь со стандартами по Виккерсу и Кнупу, по которым требуется обеспечение прослеживаемости. Следует, чтобы сертификаты, сопровождающие эталонные меры твердости, представляли

неопределенность установленного аттестованного значения и устанавливал по какому стандарту (Виккерсу или Кнупу) имеется прослеживаемость значения эталонной меры твердости. Данная неопределенность способствует неопределенности измерения твердомеров, откалиброванных или верифицированных с помощью эталонных мер твердости. Следует отметить, что неопределенность, вносимая в сертификаты к эталонной мере твердости, обычно указывается как расширенная неопределенность.

Как указано в Уравнении X1.4, расширенная неопределенность вычисляется путем умножения стандартной неопределенности на коэффициент охвата (часто 2). При таком анализе используется стандартная неопределенность, а не значение расширенной неопределенности. Таким образом, значение неопределенности, обусловленной неопределенностью аттестованного значения эталонной меры твердости, обычно может рассчитываться следующим образом:

$$u_{RefBlk} = \frac{U_{RefBlk}}{k_{RefBlk}} \quad (X1.12)$$

где  $u_{RefBlk}$  — это вносимая в отчет расширенная неопределенность аттестованного значения эталонной меры твердости, а  $k_{RefBlk}$  — это коэффициент охвата, используемый для вычисления неопределенности аттестованного значения эталонного стандарта (обычно 2).

X1.5.8 *Смещение измерения (B)* — Смещением измерения является разница между значениями измерения твердости согласно показателям твердомера и «фактической» твердости материала. Смещение измерения B может быть оценено погрешностью E, определенной в рамках косвенной верификации следующим образом:

$$B = \bar{H} - \bar{H}_{RefBlk} \quad (X1.13)$$

где  $\bar{H}$  среднее значение твердости согласно измерениям твердомера во время проведения косвенной верификации, а  $\bar{H}_{RefBlk}$  — это аттестованное среднее значение твердости эталонной меры твердости, используемой для косвенной верификации.

### X1.6 Процедура расчета неопределенности: косвенная верификация

X1.6.1 В рамках косвенной верификации процентная (%) погрешность E твердомера определяется из усредненного значения измерений длины диагонали, проведенных на эталонной мер твердости (см. Уравнение 3 и A1.4). Данное значение предоставляет указание на то, насколько точно твердомер может измерить «фактическую» твердость материала; однако, для пользователя нецелесообразно устанавливать неопределенность данного значения (см. п. X1.1.2.1). В настоящем разделе представлена процедура, которую можно использовать, например, агентством по калибровке в условиях эксплуатации, для оценки неопределенности  $U_{Mach}$  погрешности измерения твердости  $E_H$  твердомера, установленной в виде разницы между средним значением измерений и аттестованным значением меры твердости, используемой для верификации. Поскольку в измерениях твердости всегда существует неопределенность, из этого следует, что неопределенность должна быть при определении среднего значения измерений и, таким образом, при определении погрешности твердомера.

X1.6.2 Факторы, способствующие стандартной неопределенности погрешности измерения твердости  $u_{Mach}$ , следующие:

(1)  $u_{Rep\&NU}$  (Этал. мера) неопределенность, обусловленная недостаточной повторяемостью твердомера, в совокупности с неопределенностью, обусловленной неоднородностью эталонной меры твердости (Пример X1.8), устанавливаемая из измерений твердости, выполненных на эталонной мере твердости для определения погрешности E

твердомера. Условное обозначение (*Этал. мера*) добавляется к термину  $u_{Rep\&NU}$  для уточнения того, что неопределенность установлена из измерений, выполненных на эталонной мере, используемой для косвенной верификации,

(2)  $u_{Resol}$  неопределенность, обусловленная разрешением системы измерения отпечатка (Уравнение X1.10) в единицах твердости, а также

(3)  $u_{RefBlk}$ , стандартная неопределенность аттестованного значения эталонной меры твердости (Уравнение X1.12).

X1.6.3 Суммарная стандартная неопределенность  $u_{Mach}$  и расширенная неопределенность  $U_{Mach}$  рассчитывается путем совмещения соответствующих компонентов неопределенности, описанных выше, для каждого уровня твердости по каждой шкале твердости по Виккерсу и Кнупу следующим образом:

$$u_{Mach} = \sqrt{u_{Rep\&NU}^2(Ref.Block) + u_{Resol}^2 + u_{RefBlk}^2} \quad (X1.14)$$

и

$$U_{Mach} = k \times u_{Mach} \quad (X1.15)$$

X1.6.4 Для данного анализа следует использовать коэффициент охвата  $k = 2$ . Данный коэффициент охвата обеспечивает доверительный уровень приблизительно 95 %.

ПРИМЕЧАНИЕ X1.9 — Составляющая неопределенности  $u_{Mach}$  согласно вычислениям с помощью Уравнения X1.14 не включает фактор, обусловленный недостаточной воспроизводимостью твердомера. Это обусловлено тем, что предполагается, что косвенная верификация проведена во время функционирования твердомера на его оптимальном уровне работы в наилучших возможных условиях среды.

ПРИМЕЧАНИЕ X1.10 — Расширенная неопределенность  $u_{Mach}$  обычно имеет более широкий диапазон, чем значения «погрешности» твердомера.

X1.6.5 *Внесение в отчет неопределенности измерения* — Данная расширенная неопределенность  $u_{Mach}$  может сообщена органом калибровки заказчику как указание на неопределенность погрешности E твердомера, сообщаемой в рамках косвенной верификации твердомера по Виккерсу или Кнупу. Значение  $u_{Mach}$  следует дополнить утверждением, которое устанавливает, по какой шкале твердости по Виккерсу или Кнупу и на каком уровне твердости неопределенность является допустимой, с разъясняющим комментарием, например, «Расширенная неопределенность погрешности E твердомера сообщается как часть косвенной верификации для установленных(-ой) шкал(ы) твердости и уровню(-ям) твердости, относительно эталонных стандартов по твердости, которые хранятся в \_\_\_ (например, NIST), и была рассчитана в соответствии с Приложением X1 ASTM E92 с коэффициентом охвата 2, представляющим доверительный уровень приблизительно 95 %.»

X1.6.6 Назначение стандартной неопределенности  $u_{Mach}$  может использоваться в качестве составляющей неопределенности при установлении неопределенности предстоящих измерений, выполняемых с помощью твердомера (см. пп. X1.7 и X1.8).

X1.6.7 *Пример X1.1* — Данный пример иллюстрирует способ вычисления неопределенности  $u_{Mach}$  в погрешности измерения твердости  $E_H$  твердомера, определяемой как разница между усредненным значением измерений и аттестованным значением меры твердости. Оценка будет проведена только для измерений, выполненных на эталонной мере по Кнупу с сообщаемым аттестованным значением 420 НК 0,3 и расширенной неопределенностью  $U_{RefBlk} = 6$  НК 0,3. Микроскоп, используемый для измерения отпечатка, имеет разрешение, равное 1 мкм. Орган проводит пять верификационных измерений на мере. Пять измерений диагонали составляют 103,9, 104,8, 102,3, 102,8 и 100,2 мкм, которые рассчитываются до 395, 389, 408, 404 и 425 НК 0,3, с получением усредненного значения 404 НК 0,3. Таким образом:

$$u_{Rep\&NU}(Ref.Block) = \frac{STDEV(395, 389, 408, 404, 425)}{\sqrt{5}}$$

ИЛИ

$$u_{Rep\&NU} (Ref.Block) = 6,18 \text{ НК } 0,3$$

$$r_d = 1 \text{ мкм} = 0,001 \text{ мм}$$

$$r_H = r_d \times 2 \times \bar{H}/d = 0,001 \times 2 \times 404,2 / 0,1028$$

ИЛИ

$$r_H = 7,86 \text{ НК } 0,3$$

$$u_{Resol} = \frac{r_H / 2}{\sqrt{3}} = \frac{r_H}{\sqrt{12}} = 2,27 \text{ НК } 0,3$$

$$u_{RefBlk} = \frac{6}{2} = 3 \text{ НК } 0,3$$

Таким образом,

$$u_{Mach} = \sqrt{6,18^2 + 2,27^2 + 3^2} = 7,24 \text{ НК } 0,3$$

$$U_{Mach} = 2 \times 7,24 = 14,5 \text{ НК } 0,3$$

Таким образом, погрешность  $E_H$  неопределенности в  $-16 \text{ НК } 0,3$  в твердомере составляет  $14,5 \text{ НК } 0,3$ . Несмотря на то, что данная оценка была выполнена на материале, твердость которого приблизительно составляет  $420 \text{ НК } 0,3$ , неопределенность может применяться ко всему среднему диапазону шкалы твердости НК 0,3. Такой расчет необходимо выполнять для низкого и высокого диапазонов шкалы твердости НК 0,3, а также для диапазонов других верифицированных шкал твердости по Виккерсу и Кнупу.

**ПРИМЕЧАНИЕ X1.11** — Читателю следует знать, что при расчете конечного значения неопределенности во всех примерах этого приложения не производилось округления результатов между этапами. Следовательно, если отдельные уравнения решаются с помощью округленных значений, представленных на каждом этапе данного примера, некоторые результаты вычислений могут отличаться по значению последними десятичными знаками от указанных результатов.

### X1.7 Процедуры для расчета неопределенности: значения измерений твердости по Виккерсу и Кнупу

X1.7.1 Неопределенность  $u_{Mach}$  значения твердости, измеренного пользователем, может рассматриваться как указание на то, насколько точно измеренное значение соответствует «фактическому» значению твердости материала.

X1.7.2 *Значение отдельного измерения* — При неопределенности измерения для отдельного определяемого значения измерения твердости способствующими факторами стандартной неопределенности  $u_{Meas}$  являются следующие:

(1)  $u_{Repeat}$ , неопределенность, обусловленная недостаточной повторяемостью твердомера (Уравнение X1.6),

(2)  $u_{Reprod}$ , составляющая неопределенности, обусловленная недостаточной воспроизводимостью (Уравнение X1.9),

(3)  $u_{Resol}$ , стандартная неопределенность аттестованного значения эталонной меры твердости (Уравнение X1.10), а также

(4)  $u_{Mach}$ , неопределенность установления погрешности  $E$  твердомера (Уравнение X1.14).

Суммарная стандартная неопределенность  $u_{Meas}$  рассчитывается путем объединения соответствующих компонентов неопределенности, описанных выше, для допустимого уровня твердости и шкалы твердости по Виккерсу или Кнупу следующим образом:

$$u_{Meas} = \sqrt{u_{Repeat}^2 + u_{Reprod}^2 + u_{Resol}^2 + u_{Mach}^2} \quad (X1.16)$$

X1.7.3 *Усредненного значения измерения* — В случае, если требуется установить неопределенность измерения для усредненного значения нескольких результатов измерения твердости, выполненных либо на одной заготовке для испытаний, либо на нескольких заготовках для испытаний, составляющими стандартной неопределенности  $u_{Meas}$  являются:

(1)  $u_{Repeat}$ , неопределенность, обусловленная недостаточной повторяемостью машины, основанная на усредненном значении результатов нескольких измерений (Уравнение X1.7),

(2)  $u_{Reprod}$ , составляющая неопределенности, обусловленная недостаточной воспроизводимостью (Уравнение X1.9),

(3)  $u_{Resol}$ , стандартная неопределенность аттестованного значения эталонной меры твердости (Уравнение X1.10), а также

(4)  $u_{Mach}$ , неопределенность установления погрешности  $E$  твердомера (Уравнение X1.14).

Суммарная стандартная неопределенность  $u_{Meas}$  рассчитывается путем объединения соответствующих компонентов неопределенности, описанных выше, для допустимого уровня твердости и шкалы твердости по Виккерсу и Кнупу следующим образом:

$$u_{Meas} = \sqrt{u_{Repeat}^2 + u_{Reprod}^2 + u_{Resol}^2 + u_{Mach}^2} \quad (X1.17)$$

X1.7.4 Неопределенность измерения, описанная выше, для отдельных и усредненных значений твердости представляет только неопределенности измерительного процесса и не зависит от неоднородности испытательного материала.

X1.7.5 *Среднее значение измерений как оценка средней твердости материала* — Измерительные лаборатории и производственные предприятия часто проводят измерения твердости по Виккерсу или Кнупу образца для испытания или продукта с целью оценки усредненной твердости испытательного материала. Как правило, проводится несколько измерений твердости на поверхности заготовки для испытаний, и затем сообщается усредненное значение твердости как оценка усредненной твердости материала. Если необходимо внести в отчет неопределенность как признак того, насколько точно усредненное значение измерений представляет фактическую усредненную твердость материала, то способствующими факторами стандартной неопределенности  $u_{Meas}$  являются следующие:

(1)  $u_{Rep\&NU}$  (*Материал*), неопределенность, обусловленная недостаточной повторяемостью машины, объединенная с неопределенностью, обусловленной неоднородностью материала (Уравнение X1.8), которая устанавливается из измерений твердости, выполненных на испытательном материале. Условное обозначение (*Материал*) добавляется к термину  $u_{Rep\&NU}$  для того, чтобы уточнить, что неопределенность установлена из измерений, выполненных на испытываемом материале.

(2)  $u_{Reprod}$ , составляющая неопределенности, обусловленная недостаточной воспроизводимостью (Уравнение X1.9),

(3)  $u_{Resol}$ , стандартная неопределенность аттестованного значения эталонной меры твердости (Уравнение X1.10), а также

(4)  $u_{Mach}$ , неопределенность установления погрешности  $E$  твердомера (Уравнение X1.14).

X1.7.6 Суммарная стандартная неопределенность  $u_{Meas}$  вычисляется путем объединения соответствующих компонентов неопределенности, описанных выше, для допустимого уровня твердости и шкалы твердости по Виккерсу или Кнупу следующим образом:

$$u_{Meas} = \sqrt{u_{Rep\&NU}^2 (Material) + u_{Reprod}^2 + u_{Resol}^2 + u_{Mach}^2} \quad (X1.18)$$

X1.7.7 Если неопределенность вносится в отчет как признак того, насколько точно усредненное значение измерений представляет фактическую усредненную твердость материала, то важно убедиться, что проведено достаточное количество измерений на соответствующих местах проведения испытания для обеспечения репрезентативного отбора проб при любой вариации твердости материала.

X1.7.8 Расширенная неопределенность  $U_{Meas}$  рассчитывается для трех случаев, описанных выше, следующим образом:

$$U_{Meas} = k \times u_{Meas} + ABS(B) \quad (X1.19)$$

Для данного анализа следует использовать коэффициент охвата  $k = 2$ . Данный коэффициент охвата обеспечивает доверительный уровень приблизительно 95 %.

X1.7.9 *Внесение в отчет неопределенности измерения:*

X1.7.9.1 *Отдельное и усредненное значение измерений* —

Если сообщаемое значение измерения относится к отдельному испытанию твердости или к усредненному из нескольких испытаний твердости, то значение  $U_{Meas}$  должно быть дополнено разъясняющим комментарием, например, «Расширенная неопределенность измерения указанного значения твердости (или усредненного значения твердости) относительно эталонных стандартов твердости, которые хранятся в \_\_\_\_\_ (например, NIST), и была рассчитана в соответствии с Приложением X1 ASTM E92 с коэффициентом охвата 2, представляющим доверительный уровень приблизительно 95 %.»

X1.7.9.2 *Среднее значение измерения как оценка средней твердости материала* — Если неопределенность вносится в отчет в виде указания на то, насколько точно среднее значение измерений представляет фактическую среднюю твердость материала, то значение  $U_{Meas}$  должно быть дополнено разъясняющим комментарием, например, «Расширенная неопределенность сообщаемого усредненного значения твердости испытываемого материала основана на составляющей неопределенности, полученной из процесса измерения и твердости неоднородности материалов. Неопределенность относительно эталонных стандартов твердости, которые хранятся в \_\_\_\_\_ (например, NIST), была рассчитана в соответствии с Приложением X1 ASTM E92 с коэффициентом охвата 2, представляющим доверительный уровень приблизительно 95 %.» Если в отчете по испытанию не указывается количество проведенных измерений, результаты которых были округлены, и расположения проведения измерений, то данные сведения следует включить в виде краткого пояснения о том, каким образом проводился расчет неопределенности.

X1.7.9.3 *Пример X1.2* — Например, лаборатория исследует продукт, проводя шесть измерений твердости по Виккерсу HV 0,5 на поверхности данного продукта для оценки твердости. Результаты измерений твердости продукта составляли 303, 310, 301, 312, 301 и 320, с полученным усредненным значением 308 HV 0,5. Микроскоп, используемый для измерения отпечатка, имеет разрешение 1 мкм. Лаборатория собирается определить неопределенность измерения по усредненному значению твердости. Твердость 308 HV 0,5 находится в среднем диапазоне испытательного диапазона HV 0,5 (см. Таблицу A1.3). Последняя косвенная верификация среднего диапазона HV 0,5 при сообщаемом испытательном диапазоне  $U_{Mach} = 8,4$  HV 0,5 и погрешность  $E = -6$  HV 0,5. Таким образом:

$$u_{Rep\&NU}(Material) = \frac{STDEV(303, 310, 301, 312, 301, 320)}{\sqrt{6}}$$

$$u_{Rep\&NU}(Material) = 3,1 \text{ HV } 0,5$$

Для примера предположим, что твердомер наблюдался в течение длительного периода времени, и с помощью Уравнения X1.9 было определено, что  $u_{Reprod} = 4,2$  HV 0,5 для среднего диапазона испытательного диапазона HV 0,5. Другие составляющие неопределенности рассчитываются следующим образом:

$$r_d = 1 \text{ мкм} = 0,001 \text{ мм}$$

$$r_H = r_d \times 2 \times \bar{H} / d = 0,001 \times 2 \times 307,8 / 0,0549$$

или

$$r_H = 11,21 \text{ HV } 0,5$$

$$u_{Resol} = \frac{r_H / 2}{\sqrt{3}} = \frac{r_H}{\sqrt{12}} = 3,24 \text{ HV } 0,5$$

$$u_{Mach} = \frac{9,2}{2} = 4,6 \text{ HV } 0,5$$

Таким образом,

$$u_{Meas} = \sqrt{3,1^2 + 4,2^2 + 3,24^2 + 4,6^2} = 7,68 \text{ HV } 0,5$$

и поскольку  $B = -6$  HV 0,5,

$$U_{meas} = (2 \times 7,68) + ABS(-6)$$

или

$$U_{meas} = 21,4 \text{ HV } 0,5$$

для усредненного значения измерений твердости, проведенных на отдельной единице продукции.

**X1.8 Процедура расчета неопределенности: аттестованное значение мер твердости**

X1.8.1 Стандартизирующие лаборатории, принимающие участие в калибровке эталонных мер твердости, должны устанавливать неопределенность сообщаемого аттестованного значения. Такая неопределенность  $U_{Cert}$  является признаком того, насколько точно аттестованное значение соответствует «фактической» усредненной твердости меры твердости.

X1.8.2 Меры твердости аттестованы в качестве мер, имеющих усредненное значение твердости на основании калибровочных измерений, проведенных на поверхности меры твердости. Данный анализ является главным образом аналогичным анализу, описанному в п. X1.7.5, для измерения усредненной твердости продукта. В данном случае продукт является откалиброванной эталонной мерой твердости. Составляющими стандартной неопределенности  $U_{Cert}$  аттестованного среднего значения меры твердости:

(1)  $u_{Rep\&NU}$  (*Калибр. мера*), неопределенность, обусловленная недостаточной повторяемостью твердомеров для аттестации, объединенная с неопределенностью, обусловленной неоднородностью откалиброванных мер (Уравнение X1.8), которая устанавливается по калибровочным измерениям, проводимым на мере твердости. Условное обозначение (*Калибр.*) добавляется к термину  $u_{Rep\&NU}$  для уточнения того, что неопределенность установлена по калибровочным измерениям, проведенным на откалиброванных мерах.

(2)  $U_{Reprod}$ , составляющая неопределенности, обусловленная недостаточной воспроизводимостью (Уравнение X1.9),

(3)  $U_{Resol}$ , неопределенность, обусловленная разрешением системы измерения отпечатков твердомеров для аттестации (Уравнение X1.10), а также

(4)  $U_{Mach}$ , неопределенность установления погрешности  $E$  твердомера для аттестации (Уравнение X1.14).

X1.8.3 Суммарная стандартная неопределенность  $u_{Cert}$  и расширенная неопределенность  $U_{Cert}$  рассчитываются путем объединения соответствующих компонентов неопределенности, описанных выше, для каждого уровня твердости каждой комбинации испытательного нагружки по Виккерсу или Кнупу и индентора следующим образом:

$$u_{Cert} = \sqrt{u_{Rep\&NU}^2(Calib.Block) + u_{Reprod}^2 + u_{Resol}^2 + u_{Mach}^2} \tag{X1.20}$$

$$U_{Cert} = k \times u_{Cert} + ABS(B) \tag{X1.21}$$

X1.8.4 Для данного анализа следует использовать коэффициент охвата  $k = 2$ . Коэффициент охвата предоставляет доверительный уровень приблизительно 95 %.

X1.8.5 *Внесение в отчет неопределенность измерения* — Значение  $U_{\text{Cert}}$  является оценкой неопределенности сообщаемого аттестованного усредненного значения твердости эталонной меры твердости. Сообщаемое значение следует дополнить утверждением с указанием того, для какой комбинации испытательной нагрузки по Виккерсу или Кнупу и для какого индентора и уровня твердости неопределенность является допустимой, сопровождая это разъясняющим комментарием, например, «Расширенная неопределенность аттестованного значения меры твердости относительно эталонных стандартов твердости, которые хранятся в \_\_\_\_\_ (например, NIST), и была рассчитана в соответствии с Приложением X1 ASTM E92 с коэффициентом охвата 2, представляющим доверительный уровень приблизительно 95 %.»

X1.8.6 *Пример X1.3* — Учреждение по аттестации меры твердости вторичного уровня выполнило калибровку меры твердости HV 5 в диапазоне высокой твердости. Значения калибровочных измерений меры составили 674, 674, 680, 682 и 670 HV 5 при получении усредненного значения 676 HV 5. Учреждение должно установить неопределенность аттестованного усредненного значения твердости меры. Твердость 676 HV 5 считается соответствующей высокому диапазону испытательного диапазона HV 5 (см. Таблицу A1.3). Последняя косвенная верификация высокого диапазона сообщаемого испытательного диапазона HV 5  $U_{\text{Mach}} = 6.4$  HV 5 и погрешность  $E +5$  HV 5. Микроскоп, используемый для измерения отпечатка, имеет разрешение 1 мкм. Таким образом:

$$U_{\text{Rep\&N}}(Calib.Block) = \frac{STDEV(674, 674, 680, 682, 670)}{\sqrt{5}}$$

$$U_{\text{Rep\&N}}(Calib.Block) = 2,2 \text{ HV } 5$$

Для примера предположим, что твердомер контролировался в течение длительного периода времени, и с помощью Уравнения X1.9 было определено, что  $u_{\text{Reprod}} = 3,8$  HV 5 для высокого диапазона испытательного диапазона HV 5. Другие составляющие неопределенности рассчитываются как:

$$r_d = 1 \text{ мкм} = 0,001 \text{ мм}$$

$$r_H = r_d \times 2 \times \dot{H} / d = 0,001 \times 2 \times 676 / 0,1171$$

или

$$r_H = 11,55 \text{ HV } 5$$

$$u_{\text{Resol}} = \frac{r_H / 2}{\sqrt{3}} = \frac{r_H}{\sqrt{12}} = 3,33 \text{ HV } 5$$

$$u_{\text{Mach}} = \frac{6,4}{2} = 3,2 \text{ HV } 5$$

Таким образом,

$$u_{\text{Meas}} = \sqrt{2,2^2 + 3,8^2 + 3,33^2 + 3,2^2} = 6,37 \text{ HV } 5$$

и поскольку  $B = +5$  HV 5,

$$U_{\text{Meas}} = (2 \times 7,68) + ABS(5)$$

или

$$U_{\text{Meas}} = 17,4 \text{ HV } 5$$

для аттестованного значения твердости отдельной калибровочной меры твердости.

*ASTM International не занимается вынесением решений относительно действительности любых патентных прав, заявляемых в связи с любым объектом, упоминаемым в настоящем стандарте. Пользователям настоящего стандарта открыто заявляется, что определение действительности таких патентных прав и риск нарушения таких прав целиком является их ответственностью.*

*Настоящий стандарт может быть пересмотрен в любой момент времени ответственным техническим комитетом и должен пересматриваться раз в пять лет; в случае невыполнения пересмотра он должен быть либо повторно утвержден, либо отменен. Мы с готовностью рассмотрим ваши предложения по пересмотру настоящего стандарта или по составлению дополнительных стандартов; они должны направляться по адресу штаб-квартиры ASTM International. Ваши замечания будут внимательно рассмотрены на собрании ответственного технического комитета, на котором вы можете присутствовать лично. Если вы полагаете, что ваши замечания не были заслушаны должным образом, вам следует довести свое мнение до сведения Комитета по стандартам ASTM по приведенному ниже адресу.*

*Авторские права на этот стандарт принадлежат ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States — США. Отдельные репринты (в одном или нескольких экземплярах) настоящего стандарта можно получить, связавшись с ASTM по указанному выше адресу или по номеру 610-832-9585 (телефон), 610-832-9555 (факс), по адресу service@astm.org (электронная почта), или через веб-сайт ASTM (www.astm.org). Разрешение на снятие фотокопий данного стандарта может быть также получено в Центре по проверке авторских прав (Copyright Clearance Center), 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, Tel: (978) 646-2600; http://www.copyright.com/.*