



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 Кнупу¹

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 (ϵ) 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 ≤ 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 (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:²

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

¹ 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) ϵ 2, которая была отменена

² Для ознакомления с упомянутыми стандартами ASTM посетите сайт ASTM, www.astm.org, или свяжитесь со Службой заказчиков ASTM по адресу 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.³

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 × 10⁻³ 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, настройкой 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:

³ 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 ^А	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	

^А 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 мм².

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

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:

α = 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:

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

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:

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

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:

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

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 мм².

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

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 проведенных 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 ± 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 ^A	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

^A 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:
 λ = 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 / ($2 \times 0,65$) = 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.

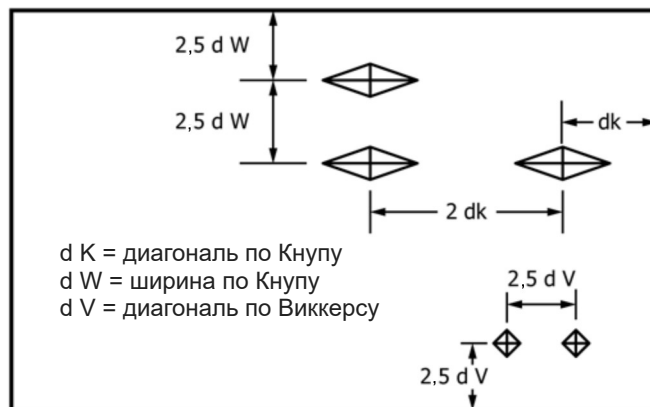


Рис. 1 Минимальный рекомендуемый интервал для получения отпечатков по Виккерсу и Кнупу

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 нагружки 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 преобразованием приближением путем проведения сравнительных испытаний. При однородных материалах и испытательных нагрузках ≥ 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: E04-1007⁴.

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

⁴ 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.

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 А, 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 A1.4 Повторяемость и погрешность установок для испытаний — Испытательные нагрузки > 1 кгс^A

Диапазон твердости аттестованных мер твердости	Нагрузка, кгс	R Максимальная повторяемость (%)	E Максимальная погрешность (%) ^B
от ≥ 100 до < 240	>1	4	2
от > 240 до ≤ 600	>1	3	2
> 600	>1	2	2

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

^B Во всех случаях погрешность является удовлетворительной, если E из

Уравнения 3 равна 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, представляющий 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 НК 1. Выбираются две меры твердости для верификации: 450 HV 0,5 (средний диапазон) и 200 НК 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 A1.3 Повторяемость и погрешность установок для испытаний — Испытательные нагрузки ≤ 1 кгс^A

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

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

^B Во всех случаях погрешность является удовлетворительной, если E из Уравнения 3 равно 0,5 мкм или менее.

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

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/136234041053010052>