

УДК 620.3:669.539.5

В.Е. Олишевская, Д.В. Гаркавенко, И.В. Сташевская, М.О. Черкашин

Национальный технический университет «Днепроовская политехника»

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Проведено порівняльний аналіз методів визначення твердості, розглянуто особливості і перспективи застосування нанотвердості.

Ключові слова: твердість, індентор, пружна деформація, пластична деформація, поверхня відбитку, площа поверхні відбитку.

Проведен сравнительный анализ методов определения твердости, рассмотрены особенности и перспективы применения нанотвердости.

Ключевые слова: твердость, индентор, упругая деформация, пластическая деформация, поверхность отпечатка, площадь поверхности отпечатка.

The comparative analysis of methods of determination of hardness is conducted, features and prospects of application of nanohardness are considered.

Keywords: hardness, resilient deformation, plastic deformation, surface of imprint, area of surface of imprint.

Введение. Надежность и долговечность деталей, применяемых в автомобильной отрасли, авиа- и ракетостроении, приборостроении, добывающей и других отраслях промышленности, формируется по трем направлениям: видам обеспечения (конструкционное, технологическое, материаловедческое, метрологическое, организационно-техническое, эксплуатационное); свойствам надежности (безотказность, долговечность, ремонтпригодность); критериям работоспособности (механическая прочность, износостойкость, жесткость, усталостная прочность, коррозионная стойкость).

Механическая прочность материалов определяется различными показателями, среди которых важной характеристикой является твердость.

Первый метод определения твердости предложил в 1722 году Реомюр Рене Антуан, а первая шкала твердости материалов была составлена Моосом в 1822 году.

В 1900 году шведский инженер Бринелль (Brinell) опубликовал методику определения твердости, основанную на вдавливании шарика в поверхность испытываемого материала, и представил оборудование на Всемирной выставке в Париже. С 1919 года применяется метод определения твердости по Роквеллу.

В 20-м веке методы измерения твердости материалов получили широкое применение при изучении свойств материалов и при производстве изделий, что

обусловлено не только техническими аспектами, обеспечивающими надежность деталей, но и экономической целесообразностью, позволяющей снижать расходы при изготовлении или ремонте деталей в результате исключения или уменьшения брака.

За почти 300-летнюю историю изучения твердости материалов разработаны десятки методов и тысячи приборов для определения твердости. Однако сегодня эти методы не удовлетворяют требованиям, которые выдвигает современное производство – нанотехнологии.

Нанотехнологии можно определить как научно-техническое направление по созданию материалов с заданной на атомно-молекулярном уровне структурой и изделий с атомной или молекулярной точностью масштаба и размерами менее 100 нм [1-3].

Сегодня разработаны сотни наноматериалов, характеризующиеся наноразмерным уровнем структурных составляющих и высокими прочностными, пластическими, электрическими, магнитными свойствами.

Примерами таких материалов являются наноструктурированные стали; покрытия, обладающие повышенной прочностью, коррозионной стойкостью, низким коэффициентом трения; прессованные наноматериалы; наноструктурные керамические и металлокерамические изделия; «умные» наноматериалы, способные следить за собственным состоянием и функционированием [4,5].

Внедрение наноматериалов в производство, обеспечение надежности и долговечности деталей требует современных методов исследования и контроля качества материалов на нанометровом уровне. Перспективными методами являются методы определения нанотвердости материалов.

Постановка задачи. Задачей работы является аналитический обзор исследований и достижений современных методов измерения твердости материалов и анализ особенностей и перспектив нанотвердости.

Результаты и их обсуждение. Измерение твердости материалов имеет большое значение для технологии производства и ремонта деталей, так как не разрушает материал и не требует много времени.

Твердость – это свойство поверхностного слоя материала сопротивляться упругой и пластической деформации или разрушению при местных контактных воздействиях со стороны другого, более твердого и не получающего остаточной деформации тела (индентора).

Эта формулировка хорошо известна, однако не однозначна. Например, часто твердость материала отождествляется с сопротивлением износу, хотя материалы равной твердости могут подвергаться разному истиранию.

Разное значение имеют и понятия «измерение твердости» и «контроль твердости». Измерение твердости – это сравнение твердости изучаемого материала с твердостью материала, принятого за эталон.

Контроль твердости – это определение соответствия между твердостью данного материала и твердостью, которая должна быть согласно техническим условиям.

Современные методы измерения твердости материалов классифицируются в зависимости от вида индентора на три группы: статические методы, динамические методы, специальные методы.

Наибольшее применение получили статические методы измерения твердости. При статических методах индентор, имеющий определенную форму и изготовленный из определенного материала, медленно и непрерывно вдавливаются в исследуемый материал с определенной силой. В результате возникает местная деформация материала, имеющая упругую и пластическую составляющие. Для определения твердости материала важна лишь пластическая деформация. После измерения глубины отпечатка или величины его проекции рассчитывают по соответствующим формулам твердость материала. Твердость, определенная для одного материала разными методами, может отличаться. Поэтому величина твердости имеет и обозначение метода, по которому определена твердость. Например, *HB*, *HV*, *HR*.

Статические методы определения твердости, в зависимости от величины приложенной нагрузки, можно классифицировать на группы: макротвердость, микротвердость, нанотвердость.

Среди способов измерения макротвердости наибольшее распространение получили методы определения твердости по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу (рис. 1).

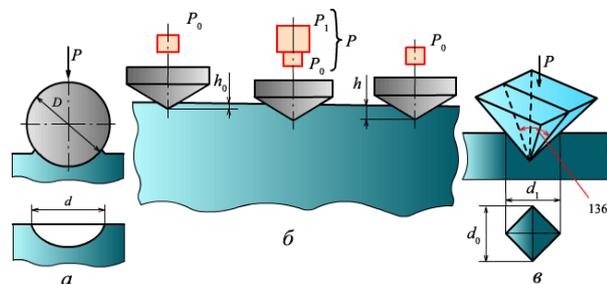


Рис. 1. Схематическое изображение измерения твердости:
а – по Бринеллю, б – по Роквеллу, в – по Виккерсу

При измерении твердости по Бринеллю шарик диаметром D под действием силы P вдавливаются в исследуемый материал (рис.1,а). Повышение нагрузки P должно произойти за такой период времени (например, 10 с), чтобы процессы пластической деформации успели пройти до снятия нагрузки. В результате пластической деформации на поверхности исследуемого материала образуется отпечаток сферической формы d . Твердость по Бринеллю рассчитывается по формуле:

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{P}{\pi Dt},$$

где P – действующая сила; F – площадь поверхности отпечатка; D – диаметр шарика; t – глубина отпечатка.

Метод Бринелля оценивает конечный результат сопротивления материала внедрению индентора. После снятия нагрузки происходит упругое восстановление отпечатка, и измеряемые параметры отпечатка характеризуют в основном пластическую деформацию материала.

Метод Бринелля часто подвергался критике. Майер, Хольм и другие исследователи считали, что действующую силу надо относить не к величине действительной поверхности отпечатка, а к величине проекции этой поверхности [6].

Твердость по Майеру рассчитывается по формуле:

$$HM = \frac{P}{F_{pr}} = \frac{P}{\frac{\pi D^2}{4}},$$

где P – действующая сила; F_{pr} – величина проекции поверхности отпечатка; D – диаметр шарика.

Беклайн установил, что величину твердости по Бринеллю можно рассчитать, вычитая из твердости по Майеру поправочный коэффициент, зависящий от величины нагрузки. Бринелль признавал, что теоретически более правильным является определение твердости по Майеру. Однако считал свою методику более корректной на практике, так как при увеличении глубины проникновения шарика в материал величина поверхности отпечатка возрастает быстрее, чем площадь проекции этого отпечатка. При вдавливании шарика многие материалы наклепываются, что вызывает рост сопротивления дальнейшему проникновению шарика. В результате наклепа твердость материала увеличивается. Однако рост твердости по Бринеллю будет происходить медленнее, чем рост твердости по Майеру. При измерении твердости по Бринеллю влияние наклепа материала будет менее ощутимо, а точность метода Бринелля выше, чем метода Майера.

Для одного материала глубина отпечатка будет зависеть от величины прикладываемой нагрузки. Майер установил зависимость между величиной нагрузки и диаметром отпечатка:

$$P = ad^n,$$

где a – постоянная величина, равная по величине силе, необходимой для получения отпечатка диаметром 1 мм; d – диаметр отпечатка; n – постоянная величина, зависящая от наклепа материала.

В 1920 году американский металлург С.П. Роквелл предложил оценивать твердость в условных единицах, характеризующих глубину внедрения индентора (рис.1,б). Метод Роквелла использует в качестве индентора алмазный конус с углом 120° при вершине (шкала С) или шарик диаметром 1,58 мм (шкала В). Твердость измеряют, прикладывая и снимая нагрузку в две стадии. Величина твердости зависит от разности глубин проникновения индентора в материал под действием этих двух стадий нагружения.

В 1925 году английский военно-промышленный концерн Vickers Limited (авторы Смит и Сандлер) разработал метод измерения твердости материалов алмазной пирамидой, который по физической сущности аналогичен методу Бринелля (рис.1,в). Для измерения твердости по Виккерсу применяют правильную четырехгранную алмазную пирамиду с углом между двумя противоположными гранями 136° , который устанавливает связь между методами Бринелля и Виккерса. При измерении твердости по Бринеллю диаметр отпечатка лежит в пределах $0,25 \dots 0,50$ от диаметра шарика. Средний диаметр отпечатка составляет $0,375 D$. Если при таком диаметре отпечатка провести касательные к окружности, проходящие через центр шарика, то угол между ними составит 136° .

Твердость по Виккерсу рассчитывается по формуле:

$$HV = \frac{P}{O} = \frac{P \cdot 1,8544}{d^2},$$

где P – действующая сила; O – поверхность отпечатка пирамидальной формы; d – диагональ отпечатка.

Микротвердость измеряют на очень тонких или небольших образцах, применяя в качестве индентора правильную четырехгранную алмазную пирамиду с углом между двумя противоположными гранями 136° . Микротвердость рассчитывают по формуле:

$$HV_m = \frac{P}{O},$$

где P – действующая сила; O – поверхность отпечатка пирамидальной формы.

Величина микротвердости зависит от многих факторов, в том числе и от факторов, связанных с материалом образца: качества подготовки поверхности образца, кристаллографической ориентации образца, неоднородной твердости поверхности, степени упругой деформации материала, числа сделанных отпечатков.

В 60-70 годах 20-го столетия С.И. Булычев и В.П. Алехин разработали метод кинетического индентирования (непрерывного индентирования, метод кинетической твердости) [7].

Кинетическое индентирование материалов регламентируется международными стандартами [8, 9]:

измерения макротвердости проводится при нагрузке на индентор от 2 Н до 30 кН;

микротвердость регламентирует нагрузку на индентор до 2 Н и глубину внедрения индентора от 0,2 мкм;

измерение нанотвердости регламентирует глубину внедрения индентора (менее 0,2 мкм) и выдвигает особые требования к шероховатости поверхности,

форме наконечника, особенностям упругой и пластической деформации материалов.

По Европейскому стандарту (DIN 60359-1; E ISO 14577-1) кинетическая твердость называется универсальной, а число твердости обозначается цифрами, характеризующими величину твердости со стоящим после них символом HU.

При этом в качестве индентора используется в основном пирамида Виккерса. Универсальная твердость HU вычисляется как отношение нагрузки к площади поверхности невосстановленного отпечатка по формуле:

$$HU = \frac{P}{26,43h^2}$$

(твердость по Мартенсу) или как отношение нагрузки к площади проекции невосстановленного отпечатка (твердость по Майеру).

В 1992 году В. Оливер и Дж. Фарр разработали методику измерения нанотвердости [10]. Параметрами испытания являются нагрузка, перемещение вершины индентора и время [11, 12].

В результате испытания получают зависимость нагрузки от глубины внедрения индентора (рис.2). Верхняя кривая отражает сопротивление материала внедрению индентора, а нижняя – описывает возврат деформации после снятия нагрузки и характеризует упругие свойства материалов [12].



Рис. 2. Зависимости нагрузки p от глубины внедрения индентора h

Сложность измерения нанотвердости заключается в обработке полученной экспериментальной кривой. Нанотвердость H определяют как отношение максимальной нагрузки P_{max} к площади проекции отпечатка A_c (по Майеру):

$$H = \frac{P_{max}}{A_c}$$

Если измерение микротвердости по Виккерсу проводится по восстановленному отпечатку индентора, то нанотвердость – по невосстановленному отпечатку индентора, т. е. по максимальному проникновению в исследуемый материал. Основная сложность при измерении нанотвердости состоит в том, что прибор измеряет не глубину отпечатка, а перемещение индентора h_{max} , которое является суммой глубины контакта h_c (контактная глубина) и упругого прогиба поверхности образца на краю контакта h_s (деформация поверхности по периметру контакта) (рис. 3):

$$h_{max} = h_c + h_s.$$

Упругий прогиб не замеряется, а определяется по методике Оливера-Фарра.

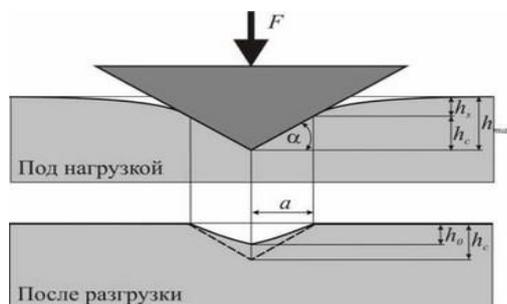


Рис. 3. Схема сечения отпечатка

Величина контактной глубины h_c находится из соотношения:

$$h_c = h_{max} - \frac{\varepsilon_c P_{max}}{S},$$

где $S = \frac{dp}{dh}$ - контактная жесткость на начальном участке ветви разгрузки; ε_c - коэффициент, зависящий от геометрии индентора.

Жесткость контакта находят по кривой нагрузки индентора. Для больших нагрузок ($P_{max} \geq 1H$) инденторы Берковича и Виккерса считают идеальными и принимают $A_c = 24,5h_c^2$.

Многими исследователями экспериментально зафиксирован размерный эффект при микро- и наноиндентировании различных материалов [10-12]. Однако единого мнения о причинах размерного эффекта не существует.

Выводы.

1. Несмотря на большое количество применяемых методов исследования твердости материалов, до сих пор не выработано строго научного понятия «твердость».

2. Твердость материалов не является простым свойством, описываемым одним числом. Так как во время испытания в зависимости от нагрузки и формы индентора изменяются значения твердости.

3. Широкое применение получила невозстановленная (универсальная) твердость – отношение нагрузки к площади контакта индентора с материалом, имеющая размерность Н/мм². Физический смысл универсальной твердости – среднее давление на поверхности контакта.

4. Восстановленная твердость – твердость, при которой используют площадь восстановленного отпечатка. Данный метод не вполне корректный, так как игнорирует упругие свойства материала.

5. Истинная твердость материалов – отношение силы сопротивления внедрению индентора в материал к объему внедренной части индентора.

Истинная твердость зависит от геометрической формы индентора, величины прилагаемой нагрузки, глубины внедрения индентора.

6. Сравнение значений твердости, полученных различными методами, не имеет физического смысла.

7. При определении макро-, микро- и нанотвердости необходимо учитывать размерный эффект.

Библиографические ссылки

1. Павлиго Т.М. Терміни та визначення в галузі наноматеріалів і нанотехнологій у стандартах міжнародної організації зі стандартизації / Т.М. Павлиго, Г.Г. Сердюк, Г.А. Баглюк. – Наноструктурное материаловедение, 2012. – № 3. – С. 70-77.

2. ISO / TS 80004-4:2015 Nanotechnologies – Vocabulary – Part 2: Nano-objects. Ed. 2015-06-04. ISO, 2015. 10 p.

3. ISO / TS 80004-4:2011 Nanotechnologies – Vocabulary – Part 4: Nanostructured materials. Ed. 2011-12-01. ISO, 2011. 7 p.

4. Богуслаев В.О. Наноматеріали і нанотехнології: підруч для студентів ВНЗ / В.О. Богуслаев, О.Я. Качан, Н.Є. Калініна та ін. Під заг. ред. В.О. Богуслаєва. Запоріжжя: Мотор Січ, 2015. – 202 с.

5. Азаренков М.О. Наноматеріали і нанотехнології: навч. посіб. / М.О. Азаренков, І.М. Неклюдов, В.М. Берсенев та ін. Харків: Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, 2014. – 316 с.

6. Meyer E. VDI-Forschungsheft, Nr 65/66. – 1909.

7. Булычев С.И. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора / С.И. Булычев, В.П. Алехин. М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.

8. ISO 14577-1. Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 1: Test method, 2002. – 31 p.

9. DIN 50359-1. Testing of metallic materials – Universal hardness test – Part 1: Test method. 15 p.

10. Oliver W.C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W.C. Oliver, G.M. Pharr // J. Mater. Res. 1992. – № 7. – p. 1572.

11. Мощенок В.И. История, современные достижения и перспективы развития твердометрии / В.И. Мощенок // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2008.

12. Пятак А.И. Современный метод оценки нанотвердости функциональных поверхностей деталей автомобилей / А.И. Пятак, В.И. Мощенок, Н.А. Лалазарова // Автомобильный транспорт. – 2008.

Надійшла до редколегії 30.09.2019