

А.П. ДАВИДЕНКО, к.т.н., проф. НТУ «ХПИ»

В.И. МОЩЕНОК, к.т.н., проф. ХНАДУ

Л.В. СУЛИМ, магистр НТУ «ХПИ»

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Розглянуто основні методи вимірювання твердості та показано актуальність визначення механічних властивостей матеріалів через твердість. Встановлені основні переваги та недоліки методів визначення твердості. Проаналізований сучасний напрямок розвитку твердометрії.

Reviewed the main methods of measuring hardness and shows the relevance of mechanical properties of materials through hardness. Outlined the advantages and disadvantages of methods for determining hardness. On analyzing the current direction of measurement of hardness.

Постановка проблемы. Одним из основных свойств материала, что определяют надежность и долговечность механизмов и конструкций, является твердость.

Твердость - в общем случае свойство материала (твердого тела) сопротивляться вдавливанию, деформированию, внедрению в него других твердых тел [1]. Для определения твердости в поверхность материала с определенной силой вдавливается тело (индентор), выполненное в виде стального шарика, алмазного конуса, пирамиды или иглы.

Физические теории твердого тела не в состоянии описать твердость различных материалов из-за неопределенного многообразия факторов, от которых она зависит. Поэтому понятие "твердость" без указания метода и условий измерения является неопределенным. Говоря о твердости, подразумевают не физическую постоянную, характеризующую материал, а одну из величин, измеренную по одному из методов и зависящую не только от материала, но и от условий и метода измерения. В связи с этим становится актуальной задача создания и внедрения новых методов и стандартов по определению твердости и их сопоставление с традиционными методами.

Анализ литературы. Измерение твердости - наиболее доступный и легко осуществимый на практике метод определения механических свойств материалов, что позволяет проводить измерения твердости на реальных конструкциях без их повреждения и получать характеристики тех участков конструкции, которые требуют тщательного мониторинга.

В связи с этим, актуальной проблемой современной твердометрии является повышение точности измерения твердости материала, а также точности определения механических характеристик материалов посредством измерения твердости.

По международному стандарту ISO 14577 [4] количественно диапазоны измерения твердости распределены по трем уровням: макроуровень, микроуровень, наноуровень.

Наиболее распространенные методы определения макротвердости: по Бринеллю (НВ), Роквеллу (HR), Виккерсу (HV).

Метод Бринелля заключается во вдавливании в поверхность индентора в форме шарика различных размеров.

Твердость рассчитывают как отношение нагрузки к площади поверхности отпечатка.

Твёрдость определяется по параметрам отпечатка после снятия нагрузки. При использовании стального шарика этим методом измеряют твёрдость материалов не более 450НВ, при использовании твердосплавного шарика – более твёрдых. Так как шарик имеет значительные размеры, то на поверхности детали остаются большие отпечатки.

Преимущества метода Бринелля состоят в безусловной простоте его реализации и возможности оперативного определения пределов прочности и текучести по эмпирическим зависимостям.

К недостаткам следует отнести сравнительно большой размер отпечатка, что ограничивает толщину исследуемых образцов, искажение контура отпечатка навалами, что вносит существенную ошибку при измерении диаметра, а также невозможность учета упругих свойств материала ввиду восстановления отпечатка.

В настоящее время в Украине действует новый стандарт на твёрдость по Бринеллю ДСТУ ISO 6506-1:2007. Согласно этому стандарту существует 30 шкал, по которым производится измерение твёрдости.

Метод Виккерса заключается во вдавливании в поверхность индентора в форме четырёхгранной алмазной пирамиды. Методом Виккерса (HV) твердость измеряется по длине диагонали отпечатка четырёхгранной пирамиды с углом при вершине 136° (при нагрузке 1–120 кгс).

В настоящее время в Украине действует новый стандарт на твёрдость по Виккерсу - ДСТУ ISO 6507-1:2007.

Согласно этому стандарту существует 21 шкала, по которым производится измерение твёрдости.

Метод Виккерса отличается высокой точностью, позволяет измерять твёрдость тонких слоёв, не продавливая их, так как отпечаток имеет небольшую глубину, а размеры диагоналей можно измерять с большой точностью. Метод отличается универсальностью, так как можно измерять твёрдость как твёрдых, так и мягких материалов.

Метод Роквелла заключается во вдавливании в поверхность детали индентора в виде шарика (при измерении твёрдости мягких материалов по шкале В – HRB) или в виде алмазного конуса (при измерении твёрдости твёрдых материалов по шкале С – HRC или тонких поверхностных слоёв и

очень твёрдых материалов по шкале А – HRA). Твёрдость определяется по условной глубине внедрения индентора.

Метод отличается универсальностью. Недостатком метода является то, что он не имеет размерности и не вполне отвечает физическому смыслу твёрдости.

Значения HB и HV выражаются в Мпа или Гпа, твердость по Роквеллу – в безразмерных величинах, которые могут быть переведены в HB с помощью таблиц.

Недостатки традиционных методов измерения твёрдости:

1. Использование восстановленного отпечатка не даёт возможности учитывать упругую составляющую деформации при вдавливании.

2. Невозможность измерения твёрдости материалов с плохой отражательной способностью, например, полимеров.

3. Невозможность измерения твёрдости материалов с высокой упругостью (например, резин) вследствие исчезновения отпечатка после снятия нагрузки.

4. Невозможность определения свойств слоистых покрытий, даже при применении разрушающих способов контроля.

5. Трудность измерения твёрдости при очень малых нагрузках, т. е. тонких поверхностных слоёв, покрытий, малых количествах материала из-за трудности измерения параметров отпечатка, что делает невозможным использование оптической микроскопии. Необходимо использовать атомную силовую или сканирующую атомную микроскопию или измерять глубину внедрения индентора вместо диаметра отпечатка.

Цель работы – Всех этих недостатков лишён метод кинетического индентирования, который впервые описан С.И. Булычевым и В.П. Алехиным в работе [5]. Согласно авторам, кинетическое индентирование (инструментальное индентирование в иностранной литературе) – это метод контроля механических свойств материалов, заключающийся в непрерывном вдавливании жесткого индентора с регистрацией приложенного усилия, глубины проникновения его в материал (глубины индентирования) и времени нагружения. Результатом испытаний материала методом кинетического индентирования является кривая (диаграмма) индентирования [5], которая отображает изменение глубины индентирования с ростом нагрузки на индентор.

Новый метод измерения твердости приведен в [6]. Рассмотрим основные характеристики и определим возможность технической реализации нового метода измерения твердости.

В соответствии с [6], при испытании материалов методом кинетического индентирования открывается возможность исследовать комплекс физико-механических свойств:

- твердость индентирования;
- модуль Юнга;

- вязкость разрушения;
- кинетику релаксации напряжений;
- особенности структуры: пористость, неоднородность;
- прочность сцепления покрытия с основным материалом;
- энергию адгезии покрытия;
- демпфирующую способность;
- гистерезисные потери;
- термоактивационные параметры: активационный объем в процессе деформации, релаксацию напряжений при деформации;
- соотношение между восстановленной и невосстановленной твердостью;
- работу упругой и пластической деформации;
- корреляционные параметры между диаграммами растяжения (сжатия) и диаграммой твердости;
- аномальные особенности деформации субмикрообъемов материала;
- кинетику неоднородности микродеформации;
- анизотропию.

Методика определения наиболее часто используемых характеристик описана в международном стандарте ISO 14577 [4]. В качестве инденторов используется: пирамида Виккерса, пирамида Берковича, твердосплавные и алмазные шарики.

Преимущества кинетического индентирования:

- 1 Возможность определить твёрдость в процессе нагружения, под нагрузкой и после её снятия.
- 2 Возможность оценки упругих свойств.
- 3 Возможность проведения испытаний на твёрдость и микротвёрдость при малых и сверхмалых нагрузках.
- 4 Получение целого ряда параметров, характеризующих физико-механические свойства материала:
 - показатели прочности (σ_b , $\sigma_{0,2}$, E и др.);
 - показатели пластичности (δ , ψ);
 - определение склонности к хрупкому разрушению (коэффициент интенсивности напряжений КИН);
 - кинетика ползучести и релаксации напряжений;
 - пористость и распределение пор по размерам;
 - адгезионная прочность покрытий;
 - анизотропия свойств;
 - износостойкость;
 - определение структурных параметров (гистограммы распределения размеров фаз).
5. Безобразцовая оценка механических свойств малых объёмов или локальных зон обработанных материалов (упрочнённые слои, тонкие покрытия, сварные соединения).

6. Одновременная оценка механических характеристик деформированных поверхностных слоёв и основного металла без удаления верхнего деформированного слоя.

7. Ускоренная безобразцовая оценка прочностного состояния в элементах конструкций и машин на стадии их изготовления и эксплуатации с целью выявления потенциально опасных зон, определения остаточного ресурса и предотвращения аварийных ситуаций.

8. Возможность автоматизации и дистанционного управления, что важно для автоматизированного производства и контроля металла в агрессивных средах или радиационных зонах.

9. Повышение производительности в десятки и сотни раз, экономия материалов, электроэнергии, трудозатрат.

10. Возможность определения твёрдости и других характеристик любых материалов - очень твёрдых, хрупких, высокоупругих, в том числе керамики, стёкол, полимеров, резин, карбидов, нитридов и т.п.

Несомненные преимущества кинетического индентирования вовсе не означают, что нужно отказаться от традиционных методов измерения твёрдости.

Уровень информации качественно возрастает, если осуществляется измерение обоими способами одновременно с определением восстановленной и невосстановленной твёрдости, которые надо рассматривать как две самостоятельные величины, а соотношение между ними – как новый параметр физико-механических свойств материала, по которому можно определять другие характеристики.

Таким образом, разработка новых методов значительно расширяет области применения твердомерии.

Установлено, что не менее важным направлением в обеспечении точности измерения твердости является разработка и внедрение в промышленность новых средств измерений твердости, что обладают рядом неоспоримых преимуществ и, прежде всего, позволяют проводить контроль твердости дистанционно, на труднодоступных участках изделий, т. е. в тех местах, где использование стационарных твердомеров не представляется возможным.

Список литературы:1 Асланян Э. Г., Дойников А. С. // Законодательная и прикладная метрология. - 2002. - № 4. - С. 38. 2 Брянский Л. Н., Дойников А. С., Крутин Б. Н. Метрология. Шкалы, эталоны, практика. - М.: Изд-во ВНИИФТРИ. - 2004. 3 Асланян Э. Г., Научно-технический журнал "Измерительная техника" Государственного комитета РФ по стандартизации и метрологии, 2005 г., №1 4 ISO 14577 Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters 5 Бульчев С.И. Испытания материалов непрерывным вдавливанием индентора / С.И. Бульчев, В.П. Алехин. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с. 6 Кошкин В.И. Оценка структуры и механических свойств материалов по статистическим характеристикам микротвердости / Валерий Иванович Кошкин. – М.: РИЦ МГИУ, 2001. – 62 с. 7 Моценок В.И. Костин Л.Л. Новітні матеріали і нанотехнології.//Вісник КрНУ ім.. Михайла Остроградського. Випуск 5/2011(70), с. 16-18.