

НАНОИНДЕНТИРОВАНИЕ И НАНОТВЕРДОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

В.И. Мощенок, профессор, к.т.н., ХНАДУ

***Аннотация.** Предложены формулы для расчета универсальной и истинной нанотвердости, по которым предлагается оценивать твердость поверхностных слоев деталей машин толщиной до 200 нанометров.*

***Ключевые слова:** наноиндентирование, универсальная нанотвердость, истинная нанотвердость, размерный эффект.*

Введение

Для современного машиностроения, и автомобилестроения в частности, характерно усложнение конструкций и условий эксплуатации, что обусловило более высокие требования к механическим свойствам материалов. Возникла необходимость создания новых материалов с использованием высоких технологий. При этом рабочий слой таких деталей может достигать нескольких нанометров. В этом случае речь идет о нанобъемных слоях на поверхности, для которых наиболее точной, а иногда и единственно возможной характеристикой оценки механических свойств является нанотвердость.

Анализ публикаций

В последние годы для определения твердости материалов все шире используется метод непрерывного индентирования, достаточно полно разработанный в 1960 – 70 гг. в СССР, где он был более известен как метод кинетической твердости [1]. Сущность метода кинетической твердости заключается в том, что в исследуемый материал внедряется индентор и при этом регистрируются два параметра: нагрузку и глубину внедрения индентора. Твердость определяют как частное от деления нагрузки на площадь поверхности отпечатка или его проекции. В настоящее время стандартами Евросоюза также предусмотрено кинетическое индентирование для определения твердости, при этом придерживаются следующих уровней определения твердости [2, 3]:

1-макроуровень:

$$2 N < F < 30\,000 N; \quad (1)$$

2-микроуровень:

$$F < 2 N; h > 200 \text{ nm}; \quad (2)$$

3-наноуровень:

$$h < 200 \text{ nm}, \quad (3)$$

где F – нагрузка, h – глубина индентирования.

Вполне очевидно, что 1-й уровень наиболее соответствует общепринятому термину макротвердость, 2-й – микротвердость, 3-й уровень логично назвать нанотвердостью.

Весьма важным является изучение зависимости твердости от нагрузки именно в диапазоне индентирования, соответствующего наноуровню. Сохраняются ли при наноиндентировании явления размерного эффекта, характерные для микро- и макроиндентирования. Ответ на этот вопрос является весьма актуальным.

Цель и постановка задачи

Целью данной работы является определение нанотвердости материалов при различных нагрузках индентирования и выявление размерного эффекта при наноиндентировании.

Определение универсальной и истинной нанотвердости деталей машин

При использовании в качестве индентора пирамиды Берковича, универсальную твердость рассчитывают по формуле (4) согласно [2, 3] и схеме индентирования, приведенной на рис. 1:

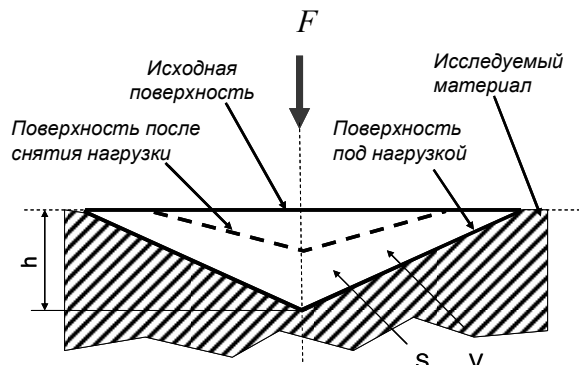


Рис. 1. Схема измерения универсальной и истинной нанотвердости пирамидой Берковича: F – сила сопротивления внедрению индентора, Н; h – глубина внедрения индентора, мм; V – объем внедренной части индентора, мм^3 ; S – площадь поверхности внедренной части индентора, мм^2

$$H_{\text{ун}} = \frac{F}{S_{\text{бок}}} = \frac{F}{26,4342 \cdot h^2}, \text{ мН/мм}^2 \quad (4)$$

где F – сила сопротивления внедрению пирамиды, мН; h – глубина внедрения пирамиды, мм; $S_{\text{бок}}$ – площадь боковой поверхности внедренной части индентора, мм^2 .

Истинную твердость согласно [4] рассчитывают по формуле

$$H_{\text{ист}} = \frac{F}{V} = \frac{F}{10,31 \cdot h^3}, \text{ мН/мм}^3 \quad (5)$$

где F – сила сопротивления внедрению пирамиды, мН; h – глубина внедрения пирамиды, мм; V – объем внедренной части индентора, мм^3 .

По данным наноиндентирования на приборе Nano-Hardness Tester-NHT таких материалов, как нанокристаллическая пленка TiSiN, кремний (100), поликристаллическая медь, приведенным авторами в работе [5], по формулам (4) – (5) получены зависимости нанотвердости от глубины наноиндентирования, которые представлены на рис. 2, 3.

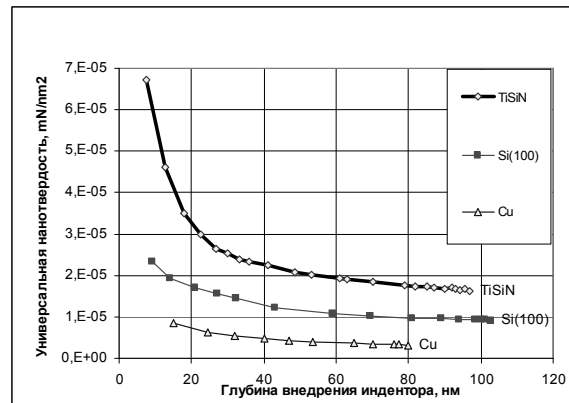


Рис. 2. Зависимость универсальной нанотвердости разных материалов от глубины внедрения индентора

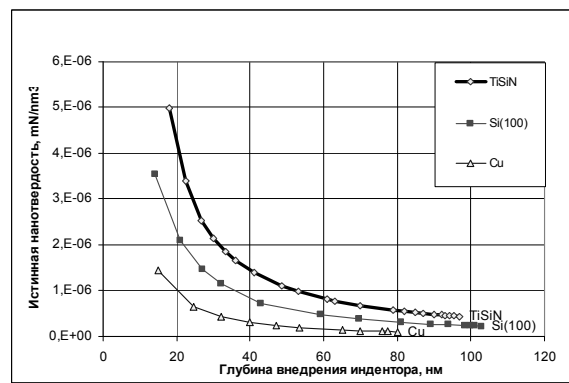


Рис. 3. Зависимость истинной нанотвердости разных материалов от глубины внедрения индентора

Как следует из графиков, представленных на рис. 2, 3, характер изменения универсальной и истинной нанотвердости в зависимости от глубины внедрения индентора подобен и позволяет идентифицировать материалы по нанотвердости. При этом более высокие значения нанотвердости соответствуют малым нагрузкам, а с увеличением нагрузки на индентор нанотвердость монотонно уменьшается. Подобные явления при индентировании различных материалов получили название «размерный эффект». При объяснении этого эффекта высказываются следующие основные гипотезы [6]:

- 1 – влияние внешних вибраций;
- 2 – наклеп поверхности при полировке;
- 3 – увеличение относительной погрешности измерения размеров отпечатка;
- 4 – большая относительная доля упругого восстановления для маленького отпечатка;
- 5 – индентирование «бездислокационных объемов» с твердостью, приближающейся к

теоретическому пределу, когда размер отпечатка соизмерим с междислокационными расстояниями;

- 6 – наклеп во время индентирования;
- 7 – влияние границ зерен и включений;
- 8 – влияние несовершенства индентора;
- 9 – изменение отношения поверхности контакта к индентируемому объему;
- 10 – наличие «краевого» эффекта – дополнительной изгибной деформации по краю отпечатка и др.

Выводы

Характер изменения универсальной и истинной нанотвердости образцов из TiSiN, Si(100), Cu в зависимости от глубины внедрения индентора подобен и позволяет четко идентифицировать образцы по нанотвердости в широком диапазоне нагрузок и глубин внедрения индентора. С увеличением глубины индентирования универсальная и истинная нанотвердость значительно уменьшается, что позволяет утверждать о присутствии размерного эффекта и при наноиндентировании. До настоящего времени не найдено убедительного и однозначного объяснения причин возникновения размерного эффекта при наноиндентировании.

Литература

1. Булычев С.И., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием

индентора. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.

- 2. DIN 50359-1. Prüfung metallischer Werkstoffe – Universalhärteprüfung. Teil 1: Prüfverfahren.
- 3. DIN EN ISO 14577-1. Metallische Werkstoffe – Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter. Teil 1: Prüfverfahren.
- 4. Мощенок В.И., Тарабанова В.П., Глушкова Д.Б. Спосіб оцінки твердості матеріалу. Пат. України UA 74654 C2, G01N3/40. Заявл. 30.12.2003. Опубл. 16.01.2006. Бюл. №1. – 3 с.
- 5. Петржик М.И., Штанский Д.В., Левашов Е.А. Современные методы оценки механических и трибологических свойств функциональных поверхностей. Материалы X Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России». – М.: ОАО ЦНИТИ «Техномаш», 2004. – С. 311 – 318.
- 6. Федосов С.А., Пешек Л. Определение механических свойств материалов микроиндентированием: Современные зарубежные методики. – М.: Физический факультет МГУ, 2004. – 100 с.

Рецензент: А.И. Пятак, профессор, д. ф.-м. н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию _____2007 г.