

УДК 620.178.15

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КРИВОЙ РАСТЯЖЕНИЯ

И.Е. Кухарева, аспирант, ХНАДУ

**Аннотация.** Рассмотрено современное состояние вопроса о возможности построения кривой растяжения по результатам испытаний материалов на твердость. Предложен новый метод перехода от кривой кинетического индентирования пирамидой Берковича к кривой растяжения.

**Ключевые слова:** твердость, прочность, напряжение, деформация, индентор, кривая растяжения, кривая индентирования.

## ЗАСТОСУВАННЯ ІНДЕНТУВАННЯ ДЛЯ ПОБУДОВИ КРИВОЇ РОЗТЯГУ

І.Є. Кухарева, аспірант, ХНАДУ

**Анотація.** Розглянуто сучасний стан питання про можливість побудови кривої розтягу за результатами випробувань на твердість. Запропоновано новий метод переходу від кривої кінетичного індентування пірамідою Берковича до кривої розтягу.

**Ключові слова:** твердість, міцність, напруження, деформація, індентор, крива розтягу, крива індентування.

## THE APPLICATION OF INDENTATION TEST FOR BUILDING OF STRESS-STRAIN CURVE

I. Kukhareva, post-graduate, KhNAHU

**Abstract.** The current state of the possibility of constructing stress-strain curve by the results of materials hardness test was considered. A new method of transition from the curve of kinetic indentation with Berkovich pyramid to the stress-strain curve was proposed.

**Key words:** hardness, strength, stress, deformation, indenter, stress-strain curve, indentation curve.

### Введение

Среди методов контроля механических свойств материалов твердометрия занимает отдельное место. Этот метод соединяет в себе оперативность, простоту подготовки исследуемой поверхности и обработки экспериментальных данных и, что немаловажно, малые объемы деформационного повреждения объекта испытаний. О возможности оперативного определения характеристик прочности при исследовании материала на твердость известно довольно давно. Однако широкому распространению экспресс-контроля прочности препятствует ряд факторов.

### Анализ публикаций

Известно [1, 2] два вида испытаний на твердость:

- 1) метод восстановленного отпечатка;
- 2) метод невосстановленного отпечатка (кинетическая твердость).

Возможность перехода к диаграмме напряжений возможна для обоих этих методов при индентировании сферическим индентором [1, 2].

Формирование отпечатка при вдавливании индентора проходит те же этапы, что и удли-

нение материала при испытаниях на растяжение. На начальной стадии происходит упругая деформация, и изменение рельефа материала обратимо. При увеличении нагрузки материал под индентором начинает испытывать нарастающую пластическую деформацию. При дальнейшем повышении деформирующего усилия в отпечатке может наступить разрушение. Исходя из этого, М.П. Марковец предлагает для построения кривой растяжения пользоваться зависимостью твердости НВ от отношения диаметра восстановленного отпечатка к диаметру индентора [3]. Твердость по Бринеллю имеет размерность напряжения и физический смысл предельного удельного давления на единицу площади пластического отпечатка. Соотношение диаметров отпечатка и индентора характеризует степень деформации материала под индентором: чем это значение ниже, тем материал прочнее.

Ю.В. Мильман в работе [4] представляет метод построения диаграммы условных напряжений путем индентирования поверхности материала с использованием набора трехгранных инденторов. При этом рассчитывается твердость по Мейеру и соответствующие точки наносятся на график в координатах « $H_{IT} - \varepsilon$ ».

По полученной кривой, как утверждает автор [4], можно определить предел пропорциональности, предел текучести, максимальное напряжение течения, напряжение разрушения, а также деформационное упрочнение. Для их численного определения Ю.В. Мильман предлагает обратиться к соотношению Джексона [4]

$$\frac{HM}{\sigma} = \frac{2}{3} \left( 1 + \ln \frac{E_r \operatorname{ctg} \gamma}{3\sigma} \right), \quad (1)$$

где  $E_r$  – контактный модуль упругости;  $\sigma$  – напряжение;  $\gamma$  – угол между гранью и осью пирамидального отпечатка.

Данная методика позволяет восстанавливать кривую деформации при определении твердости. Для испытаний используются инденторы любой формы, что позволяет исследовать разные объемы материала, в том числе фольги и детали малых размеров. Недостатком этого метода является необходимость изготовления нескольких инденторов, что усложняет процедуру измерений и обработки результатов. Кроме того, при индентирова-

нии неоднородных материалов возникает вероятность получения неточных данных из-за влияния фаз.

Для определения прочностных характеристик по твердости широко используется метод кинетического индентирования [1, 3, 5, 6]. Существует ряд методик перехода от кривой твердости к кривой упрочнения.

Сопоставление диаграмм твердости и растяжения авторы работы [1] начинают с эмпирических степенных уравнений, используемых для их описания. Так, процесс вдавливания сферического индентора описывается степенной функцией Мейера следующего вида [1]

$$F = ad^n, \quad (2)$$

где  $F$  – нагрузка;  $a$  и  $n$  – константы Мейера, характеризующие прочностные ( $a$ ) и пластические ( $n$ ) свойства материала;  $d$  – диаметр восстановленного отпечатка.

Из работы [1] известно, что диаграмма растяжения может быть описана уравнением

$$\sigma = b\varepsilon^x, \quad (3)$$

где  $b$  – константа;  $\varepsilon$  – деформация, %;  $x$  – показатель степени.

Таким образом, сравнивая соответствующие коэффициенты в уравнениях, можно рассчитать любую точку диаграммы растяжения.

Авторы работы [7] знакомят с методом АВИ (Automated ball indentation). Этот метод заключается в непрерывном циклическом индентировании поверхности материала сферическим индентором до достижения соотношения диаметра отпечатка к диаметру индентора, равного единице. По результатам индентирования решается система уравнений [7]

$$\begin{cases} e_p = 0,2 \frac{d_p}{D} \\ \sigma_i = \frac{4F}{\pi d_p^2 \delta} \end{cases}, \quad (4)$$

где  $e_p$  – истинная пластическая деформация;  $d_p$  – диаметр восстановленного отпечатка;  $D$  – диаметр индентора.

Методика, описанная выше, является одной из наиболее широко применяемых и развивающихся в настоящее время. Это связано с возможностью полной автоматизации процесса вычислений, но в то же время в случае отсутствия необходимого программного обеспечения значительно усложняет расчет.

В.М. Шабанов предлагает эмпирическое уравнение, связывающее степень упрочнения при испытаниях сферического индентора вдавливанием и растяжением [8]

$$\frac{E - E'}{E'} = k \left( \frac{h_g}{W_0} \right)^2, \quad (5)$$

Тут,  $\frac{E - E'}{E'}$  характеризует степень упрочнения материала при растяжении, а  $\frac{h_g}{W_0}$  – степень упрочнения при вдавливании [5]. Для сталей коэффициент  $k$  принят равным 0,161.

Окончательное выражение для расчета кривой упрочнения, согласно [5], имеет вид

$$\varepsilon = 2k \frac{1 - 2\mu}{\pi(1 - \mu^2)} \cdot \frac{h_g^2}{W_0 d_k}, \quad (6)$$

где  $d_k$  – диаметр контакта индентора с материалом под нагрузкой.

Описанная методика построения кривой растяжения по твердости представляет интерес с точки зрения ее теоретической обоснованности, но в то же время является громоздкой при реализации.

Сегодня активно развивается феноменологический подход к построению диаграммы условных напряжений по кинетической твердости. Так, в работе [7] предложена методика, основанная на сопоставлении соответствующих коэффициентов в уравнениях, аппроксимирующих диаграммы растяжения и твердости, например, уравнение Войса [7]

$$\sigma = k_1 - k_2 \exp(-k_3 \varepsilon), \quad (7)$$

где  $k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты, характеризующие запас пластичности и способность материала к упрочнению при испытаниях на растяжение.

При испытаниях вдавливанием, соответственно [7]

$$HM = m_1 - m_2 \exp(-m_3 \varepsilon_p), \quad (8)$$

где  $m_1, m_2, m_3$  – коэффициенты, характеризующие запас пластичности и способность материала к упрочнению при индентировании;  $\varepsilon_p$  – средняя деформация в отпечатке, определяемая соотношением Тейбора [7]

$$\varepsilon_p = 0,2 \frac{d}{D}. \quad (9)$$

На основании определенного массива данных по кривым растяжения и твердости для данного класса материалов устанавливается зависимость [9]

$$k_i = f(m_i). \quad (10)$$

На основании данной зависимости находятся коэффициенты уравнения (7) и восстанавливается кривая условных напряжений.

Преимущества данного метода очевидны, если приходится иметь дело с определенными группами материалов. В случае массового производства, когда речь идет о десятках различных материалов и видов обработки, он становится очень громоздким и не позволяет осуществлять экспресс-контроль качества материала. Кроме того, как отмечают сами авторы [7], при малых нагрузках часто наблюдается нарушение закономерностей контактного деформирования при кинетическом индентировании. Следует также отметить, что авторы [7] оценивают погрешность своего метода более 10 %.

Расчетно-экспериментальная методика, описанная в работе [10], предусматривает начальную аппроксимацию кривых деформирования при растяжении и индентировании степенной функцией на основании некоторого массива экспериментальных данных для определенного класса сталей. Методом конечных элементов решается задача вдавливания сферического индентора в упругопластическую упрочняющуюся среду. По расчетным значениям нагрузки и глубины внедрения индентора строится кривая. Далее определяют соотношение между расчетной и экспериментальной нагрузкой (глубиной индентирования). Если полученная разница не

удовлетворяет ожидаемой точности эксперимента, то начальное уравнение аппроксимации меняется и вычисления проводятся повторно. По мнению авторов [10], погрешность данного метода может достигать 15 %.

К достоинствам метода можно отнести теоретическую обоснованность выбора конечного уравнения аппроксимации в результате решения задачи вдавливания индентора в упругопластическую среду. С другой стороны, при этом значительно усложняется процесс вычислений, что приводит к увеличению времени испытаний.

Автор [11] предлагает метод построения диаграммы растяжения материала по кривой кинетического индентирования. Строится кривая растяжения эталонного материала в координатах «нагрузка – удлинение»; на тот же график наносится возрастающая ветвь кривой индентирования до нагрузки, соответствующей разрушению материала. Обе кривые аппроксимируются, например, степенным полиномом. По уравнениям аппроксимации рассчитывается поправка [11]

$$\Delta P_1 = \text{тренд}(P_{\text{роз},1}(\Delta l)) - \text{тренд}(P_{\text{инд},1}(h)). \quad (11)$$

С учетом поправки рассчитывается теоретическое усилие растяжения [10]

$$P_{\text{роз.теор},1} = P_{\text{инд},1} + \Delta P_1. \quad (12)$$

По полученным данным строится расчетная кривая растяжения и ее тренд. Для проверки правильности произведенных допущений необходимо провести сравнение трендов экспериментальной и расчетной кривых растяжения [11].

Далее для всех исследуемых материалов строятся кривые кинетического индентирования в условиях, отвечающих испытаниям материала-эталона. Они последовательно наносятся на график, масштабируются до эталонной кривой индентирования, устанавливается уравнение аппроксимации и определяются поправки для каждого индентирования [11]

$$\Delta P_i = \text{тренд}(P_{\text{инд},i}(h)) - \text{тренд}(P_{\text{инд},1}(h)). \quad (13)$$

Строятся феноменологические кривые растяжения исследуемых материалов, для чего

рассчитывается теоретическое усилие растяжения по формуле [11]

$$P_{\text{роз.теор},i} = P_{\text{инд},1} + \Delta P_1 \pm \Delta P_i. \quad (14)$$

Данная методика предлагает непосредственный переход от кривой индентирования к кривой растяжения, что дает возможность избежать необходимости выбора метода расчета твердости для более корректной оценки механических свойств. Суто феноменологический подход дает возможность автоматизировать вычисления с помощью компьютерной техники. По утверждению автора, описанный метод имеет точность более 94 % [11]. Существенным недостатком изложенной методики является необходимость большого числа математических вычислений, а также отсутствие какого-либо теоретического обоснования.

Наиболее распространенный метод построения кривой растяжения по кривой кинетического индентирования, широко применяемый в практике, – метод конечных элементов (МКЭ). При его реализации обычно используют профессиональные пакеты прикладных программ, например, ANSYS [12, 13].

Суть метода состоит в составлении аналитической модели упругопластического поведения материала в зоне деформации материала под индентором на основании закона Гука (на участке  $\sigma < \sigma_y$ ) и аппроксимации кривой растяжения (на участке  $\sigma > \sigma_y$ ) уравнением вида [14–16]

$$\sigma - \sigma_y = B\varepsilon^n, \quad (15)$$

где  $\sigma_y$  – условный предел текучести;  $B$ ,  $n$  – коэффициенты.

Цель подобного моделирования – определение корреляции между значениями модуля упругости, коэффициента Пуассона, предела текучести, с одной стороны, и кривой кинетического индентирования, с другой.

#### Цель и постановка задачи

Целью настоящего исследования была разработка экспресс-метода построения кривой растяжения при кинетическом индентировании.

Была поставлена задача реализации перехода от кривой индентирования к кривой растяжения без использования сложного дорогостоящего программного обеспечения, основываясь только на пакете прикладных программ Microsoft Office. Индентирование было выполнено самым распространенным в настоящее время индентором – пирамидой Берковича в микродиапазоне образцов меди М1 (испытания проводились на исследовательском комплексе NanoTest (MicroMaterials, Англия) в Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва, РФ).

### Экспресс-метод построения кривой растяжения по кривой индентирования пирамидальным индентором

В соответствии с разработанной методикой сопоставление кривых растяжения и индентирования следует начинать с выявления сходных участков, идентификации точки упругопластического перехода, аппроксимации нелинейных участков, построения корреляционной зависимости между усилием при индентировании и растяжении.

Точка упругопластического перехода характеризует нагрузку, которая впервые вызывает остаточную деформацию. Эта точка может быть определена как на диаграмме растяжения (рис. 1), так и на диаграмме кинетического индентирования (рис. 2). Учитывая сложность определения степени деформации по кривой кинетического индентирования, принимаем, что в этой точке деформация при растяжении соответствует деформации при индентировании.

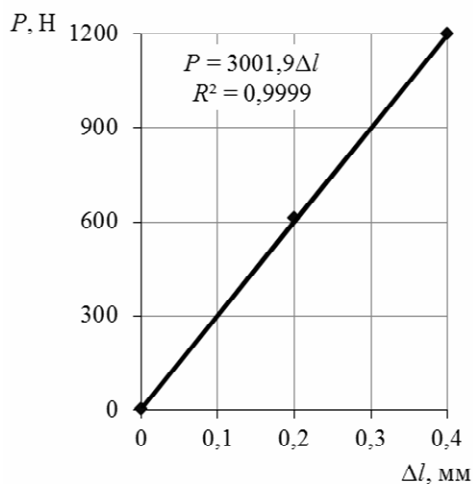


Рис. 1. Линейная часть кривой растяжения

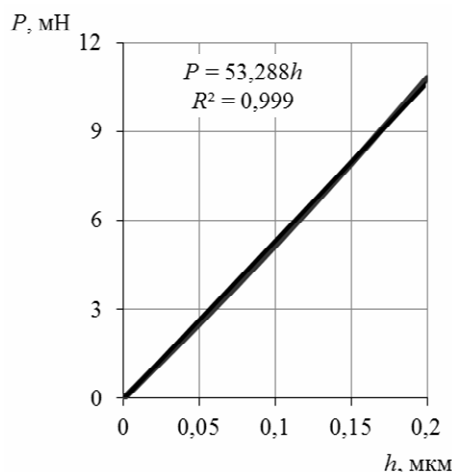


Рис. 2. Линейная часть кривой индентирования

Для определения характера взаимосвязи нагрузки при индентировании и растяжении необходимо получить уравнение зависимости изменения длины разрывного образца от нагрузки на линейном участке (рис. 3) и глубины индентирования от нагрузки для растущей ветви (рис. 4).

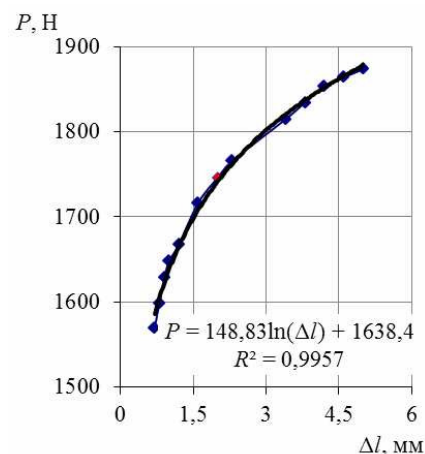


Рис. 3. Аппроксимация нелинейной части кривой растяжения

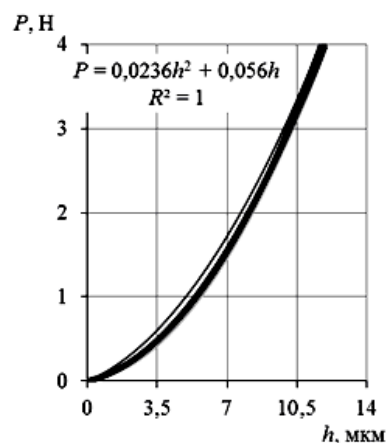


Рис. 4. Аппроксимация нелинейной части кривой индентирования

Для выявления корреляционной зависимости между диаграммами индентирования и растяжения необходимо при одних и тех же значениях степени деформации определить расчетные значения деформирующего усилия при обоих видах нагружения на основе ранее определенных уравнений аппроксимации.

На рис. 5 изображена зависимость нагрузки при растяжении и индентировании.

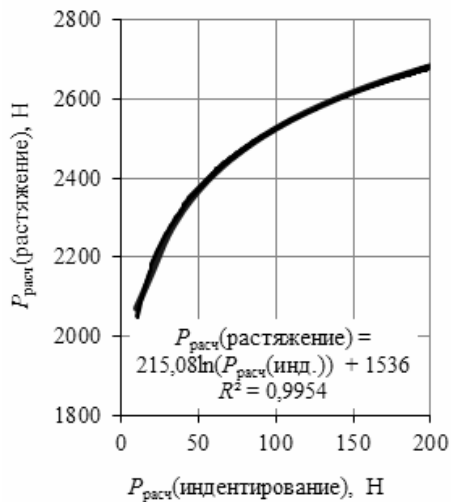


Рис. 5. Построение корреляционной кривой, связывающей усилие при индентировании и растяжении

Теперь, имея кривую растяжения образца-эталоны, для материалов данной группы можем построить по кривой кинетического индентирования диаграмму растяжения (рис. 6) и определить главные характеристики прочности.

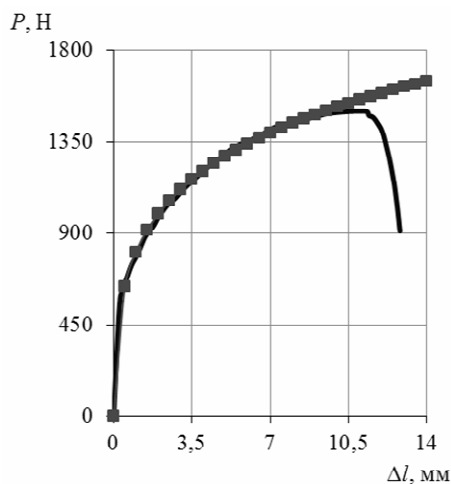


Рис. 6. Кривая растяжения медного образца, построенная по предлагаемой методике (1) и реальная кривая растяжения (2)

## Выводы

1. Наиболее значимые результаты по построению кривой растяжения на основе испытаний на твердость достигнуты при индентировании сферой, что связано с возможностью определения степени деформации по мере углубления индентора.

2. Наибольший интерес представляют следующие методы построения кривой растяжения: М.П. Марковца, Ю.В. Мильмана, В.И. Мощенка, а также метод конечных элементов.

3. Предложенный метод построения кривой растяжения по кривой индентирования сочетает высокую сходимость результатов и оперативность.

4. Экспериментально получена кривая растяжения медного образца по кривой индентирования пирамидой Берковича до максимальной нагрузки 4 Н.

## Литература

1. Бульчев С.И. Испытания материалов непрерывным вдавливанием индентора / С.И. Бульчев, В.П. Алехин. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
2. Марковец М.П. Определение механических свойств материалов по твердости / М.П. Марковец. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
3. Трунов М.Л. Исследование времязависимого механического поведения материалов при испытаниях на нанотвердость / М.Л. Трунов, В.С. Биланич, С.Н. Дуб // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77, Вып. 10. – С. 50–57.
4. Мильман Ю.В. Новые методики микромеханических испытаний материалов методом локального нагружения жестким индентором / Ю.В. Мильман // Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя. – К.: Наукова думка, 1998. – С. 637 – 656.
5. Шабанов В.М. Разработка и внедрение метода определения комплекса физико-механических свойств материалов непрерывным индентированием: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : 05.02.01 «Материаловедение и машиностроение» / В.М. Шабанов. – М.: Московский ордена трудового красного знамени институт химического машиностроения, 1988. – 16 с.

6. Федосов С.А. Определение микромеханических свойств материалов микроиндентированием: современные зарубежные методики / С.А. Федосов, Л. Пешек. – М.: Физический факультет МГУ, 2004. – 100 с.
  7. Инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразивными методами по характеристикам твердости РД ЭО 0027-2005 : утв. Концерном «Росэнергоатом» 06.07.2005. – Взамен РД ЭО 0027-94 ; введ. Приказом Концерна «Росэнергоатом» от 19.09.2006 г. № 878. – М.: Концерн «Росэнергоатом». – 1994. – 52 с.
  8. ГОСТ 22762-77. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара. – Введен впервые 01.01.1979. – М.: Изд-во стандартов, 1978.
  9. Gao X.L. New expanding model for indentation hardness including strain-hardening and indentation size effects / X.L. Gao // Materials Research Society. – 2006. – Vol. 21. – P. 1317–1326.
  10. Колмаков А.Г. Методы измерения твердости / А.Г. Колмаков, В.Ф. Терентьев, М.Б. Бакиров. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 128 с.
  11. Мощенок В.І. Модель феноменологічного зв'язку між механічними властивостями та мікрореформуванням металів / В.І. Мощенок // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – Харьков : ХНАДУ. – 2007. – №21. – С. 38–42.
  12. Чигарев А.В. ANSYS для инженеров: справочное пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 514 с.
  13. Каплун А.Б. ANSYS в руках инженера: практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
  14. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику / Ю.И. Головин. – М.: Машиностроение, 2007. – 496 с.
  15. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности / Ю.И. Головин. – М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.
  16. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях (Обзор) / Ю.И. Головин // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, Вып. 12. – С. 2113–2141.
- Рецензент: М.А. Подригало, профессор, д.т.н., ХНАДУ.
- Статья поступила в редакцию 11 июля 2011 г.
-