

УДК 620.165.79

Е.И. Орешко¹, В.С. Ерасов¹, Н.О. Яковлев¹, Д.А. Уткин¹

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ИНДЕНТИРОВАНИЯ (обзор)

Рассмотрены основные методы определения твердости материалов. Представлены основные формулы расчета механических характеристик материалов по значениям твердости. Проведен анализ методов расчета диаграмм растяжения материалов по диаграммам вдавливания. Рассмотрены подходы к построению конечно-элементной модели индентирования материалов. Показана необходимость доработки существующих стандартов и развития расчетных методов с подробным описанием методик пересчета диаграмм индентирования в механические характеристики материалов.

Ключевые слова: твердость, механические свойства, индентирование, напряжения, деформация, расчет, диаграмма деформирования.

E.I. Oreshko¹, V.S. Erasov¹, N.O. Yakovlev¹, D.A. Utkin¹

METHODS FOR DETERMINING THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF MATERIALS USING INDENTATION (review)

The paper considers the main methods for determining the hardness of materials. The basic formulas for calculating the mechanical characteristics of materials by hardness values are presented. The analysis of methods for calculating tensile diagrams of materials by indentation diagrams is carried out. Approaches to building a finite element model of material indentation are considered. The paper shows the need to improve existing standards and develop computational methods with a detailed description of techniques for recalculating indentation diagrams into mechanical characteristics of materials.

Keywords: hardness, mechanical properties, indentation, stresses, deformation, calculation, stress-strain diagram.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В процессе создания конструкций оценивают физико-механические характеристики конструкционных материалов [1–5]. Быстро и точно, практически без повреждения поверхности оценить качество изделия позволяет такая характеристика материала, как твердость [6–11].

В конце XIX в. Генрих Герц развил теорию контактной механики [12] и решил задачу контакта двух сфер с различными размерами и упругими свойствами. По этому методу для определения твердости вдавливают сферический индентор в образец. Герц предложил мерой твердости считать нагрузку, соответствующую началу пластической деформации при вдавливании полусферы в плоскость. Однако из-за сложности определения начала пластической деформации данный способ применять на практике

достаточно затруднительно. Твердость, определяемую по методу Герца, представляют символом H_z с индексом H , обозначающим контактные напряжения.

Около 1900 г. Мартенс предложил следующую формулировку для определения твердости – это сопротивление, оказываемое телом проникновению другого (более твердого) тела [13]. Это простое определение применяется в технической области и соблюдается до настоящего времени. Его фамилией назван универсальный метод определения твердости, которую обозначают символом H_M .

Существует метод Майера, по которому твердость измеряется по площади проекции отпечатка на плоскость и обозначается символом H_m [13].

Твердость при вдавливании сферического шарика определяют методом Бринелля и обозначают символом H_B [10].

В результате использования методов определения твердости проводят исследования зависимости твердости материалов от их механических характеристик [14–19].

Благодаря обширному анализу экспериментальных данных Д. Тейбор [20] в 1951 г. предложил следующее соотношение для описания деформации при внедрении сферы в материал:

$$\varepsilon = 0,2 \frac{d}{D}, \quad (1)$$

где d – диаметр отпечатка; D – диаметр индентора.

Соответствующие напряжения описываются выражением

$$\sigma = \frac{P_m}{\psi}, \quad (2)$$

где P_m – среднее контактное давление, равное отношению нагрузки вдавливания к площади области контакта; ψ – коэффициент, который для упругого идеально пластического тела равен 3.

В 1951 г. Тейбор получил диаграмму деформирования материала по результатам циклического вдавливания сферического индентора при последовательном увеличении глубины индентирования.

Наиболее высокую точность определения пределов прочности и текучести показали методы, предложенные М.П. Марковцом [21, 22].

Метод инструментального индентирования в нанодиапазоне разработали Оливер и Фарр [23, 24]. На разгрузочной ветви непрерывной диаграммы индентирования определяют значения упругой жесткости индентора и образца. По поводу данного метода имеются существенные критические комментарии, представленные во многих работах разных исследователей твердости материалов [25–30]. Так, некоторые из них убеждены в неправильной трактовке Оливером и Фарром результатов классической механики одностороннего контакта упругих тел (например, с помощью методов Герца [31] и Снедона [32]), а также в неправильной идентификации глубины контакта h_c , лежащей в основе определения площади контакта $A = F(h_c)$ при вычислении твердости [33] и т. д. Тем не менее материаловедческое сообщество признало этот метод наиболее удобным для индентирования пирамидальными инденторами [34]. Для сферических инденторов обычно отдают предпочтение методам, развиваемым Свейном и Фишером–Крипсом [35]. За последние годы метод Оливера–Фарра стал общепринятым, на его основе созданы многие национальные и международные стандарты [35].

Метод Тейбора впоследствии был модифицирован Фарми Хэгггом – создателем метода Automated Ball Indentation (ABI-метод) [36, 37], который основан на внедрении

индентора в объект контроля под действием плавно возрастающей нагрузки с последующим ее полным снятием при достижении заданной максимальной глубины внедрения и ряда периодических частичных разгрузок. В ходе испытания зависимость глубины внедрения индентора от нагрузки постоянно регистрируется, а также определяется контактная жесткость и глубина упругого контакта при частичной разгрузке на различных глубинах вдавливания.

Кинетическое индентирование в стандарте [34] получило название «инструментальное индентирование» [38, 39], твердость в нем называется универсальной, а число твердости обозначается цифрами, характеризующими величину твердости, со стоящим после них символом НU. В качестве индентора используется в основном пирамида Виккерса. В 2014 г. М.Б. Бакировым был разработан соответствующий ГОСТ 56232–2014 [40].

Развитие науки о твердости материалов породило не только появление новых методов ее определения, но и неточности в их названиях. Так, методы определения твердости по Бринеллю, Виккерсу, Берковичу получили (согласно немецкому стандарту [41]) общее название – определение универсальной твердости. Затем с 2002 г. методы Виккерса и Берковича по международному стандарту были названы твердостью по Мартенсу [13]. Твердость по Майеру, согласно этому же стандарту, получила название «твердость индентирования», хотя разработанный в СССР в 1960-е гг. этот же метод был назван кинетической твердостью [42]. Вышеуказанный метод измерения твердости в нанодиапазоне (глубина внедрения индентора не превышает 200 нм) известен как метод Оливера–Фарра. На основе вышеизложенного можно утверждать, что в настоящее время отсутствует единый подход расчета твердости разными методами и существуют разночтения в формулировке термина «твердость».

Методы определения твердости и расчета механических характеристик материалов по результатам индентирования

Для формулировки обобщенных названий все основные методы определения твердости материалов условно можно разбить на три основные группы, представленные в табл. 1 [43]:

- 1 – методы, определяющие поверхностную твердость;
- 2 – методы, определяющие проекционную твердость;
- 3 – методы, определяющие объемную твердость.

Широко применяемая эмпирическая зависимость впервые была предложена Бринеллем:

$$\sigma_y = 0,346 \cdot HB, \quad (3)$$

где σ_y – условный предел прочности; HB – твердость по Бринеллю.

Позднее Тейбор применял подобное уравнение в виде:

$$H = C \cdot \sigma_r, \quad (4)$$

где H – твердость по Виккерсу или Бринеллю; σ_r – напряжение при одноосной деформации ϵ_r ; C – коэффициент от 3 до 3,2.

В настоящее время в зарубежной научно-технической литературе подобное уравнение называется уравнением Тейбора. Коэффициент C зависит от геометрической формы индентора и свойств индентируемого материала.

Таблица 1

Основные методы определения твердости материалов и формулы расчета

Метод	Группа 1 (поверхностная твердость)	Группа 2 (проекционная твердость)	Группа 3 (объемная твердость)
Для индентора сферической формы	$HV_{\text{пов}}^{\text{инд}} = \frac{F}{2\pi R h_{\text{инд}}}$	$HB_{\text{пр}} = \frac{F}{\pi h(2R - h)}$	$HB_{\text{об}}^{\text{инд}} = \frac{F}{1,047 \cdot h_{\text{инд}}^2 (3R - h_{\text{инд}})}$
Для пирамиды Виккерса	$HV_{\text{пов}}^{\text{инд}} = \frac{F}{26,429 h_{\text{инд}}^2}$	$HV_{\text{пр}} = \frac{F}{24,5 h^2}$	$HV_{\text{об}}^{\text{инд}} = \frac{F}{8,168 h_{\text{инд}}^3}$
Для модифицированной пирамиды Берковича	$HB_{\text{пов}}^{\text{инд}} = \frac{F \cos \alpha}{3 h_{\text{инд}}^2 \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta}$	$HB_{\text{пр}}^{6,27} = \frac{F}{24,494 h^2}$	$HB_{\text{об}}^{\text{инд}} = \frac{F}{8,165 h_{\text{инд}}^3}$
Для сфероконического индентора с углом при вершине 120 градусов и радиусом закругления вершины 0,2 мм	$HR_{\text{пов}}^{\text{инд}120-0,2} = F / (2\pi R h_{\text{инд}} + (10,88 h_{\text{инд}}^2 + 0,668 h_{\text{инд}} - 0,026))$	Для сферического индентора $H_{\text{пр}}^{\text{сф-кон}} = F / \left(\pi \sqrt{h_{\text{сф-кон}} (2R - h_{\text{сф-кон}} + \frac{h_{\text{ус-кон}}^2}{\operatorname{tg} \alpha})} \right)$	$HR_{\text{об}}^{\text{инд}120-0,2} = F / (3,1414 h_{\text{инд}}^3 + 0,2906 h_{\text{инд}}^2 + 0,0089 h_{\text{инд}} - 0,00006)$
Для сфероконического наноиндентора с углом при вершине 60 градусов и радиусом закругления вершины 8,6 мкм	$HR_{\text{пов}}^{\text{н.инд}60-8600} = F / (2\pi R h_{\text{инд}} + 2,09 h_{\text{инд}}^2 + 22805,45 h_{\text{инд}} - 10577173,84)$		$HR_{\text{об}}^{\text{н.инд}60-8600} = F / (0,349 h_{\text{инд}}^3 + 9000 h_{\text{инд}}^2 + 77465070 h_{\text{инд}} - 52779489468)$
Для индентора Шора (шкала А)	$HSA_{\text{пов}}^{\text{инд}} = \frac{F}{7,839 h_{\text{инд}} - 1,292}$		$HSA_{\text{об}}^{\text{инд}} = \frac{F}{0,831 h_{\text{инд}}}$

Широко применяется модель гидростатического ядра Джонсона [44], которая в итоге сводится к эмпирической модели Тэйбора–Марковца:

$$p_m = \frac{2}{3} \sigma_r \left[1 + \ln \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{E \cdot \tan \alpha}{\sigma_y} \right) \right]. \quad (5)$$

Для использования уравнения Зайцева [45] необходимо знать значения равномерного удлинения при испытании на растяжение:

$$H = 2,94 \sigma_b (1 - \delta_p^2), \quad (6)$$

где δ_p – равномерное удлинение при испытании на растяжение.

Методом конечных элементов (МКЭ) получено следующее уравнение для расчета твердости материалов:

$$H = K_1 \sigma_1 + K_2 \sigma_h, \quad (7)$$

где σ_1 и σ_h – напряжения, соответствующие одноосной деформации соответственно на величины 0,02 и 0,35; K – коэффициенты: $K_1=1$, $K_2=1,4$ – для индентора в методе Виккерса и 1,55 – для эквивалентного конического индентора.

Для материалов, подчиняющихся уравнению Холломона при использовании формулы (7), коэффициент $K_2=1,65$.

Степенной закон Холломона для описания истинных напряжений растяжения или сжатия имеет следующий вид [46]:

$$\sigma = \begin{cases} E \cdot \varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ E \cdot \varepsilon_y^{1-n} \varepsilon^n, & \varepsilon \geq \varepsilon_y \end{cases}, \quad (8)$$

где E – модуль упругости; ε_y – упругая деформация; ε – полная деформация; n – коэффициент.

На рисунке представлена диаграмма инструментального индентирования.

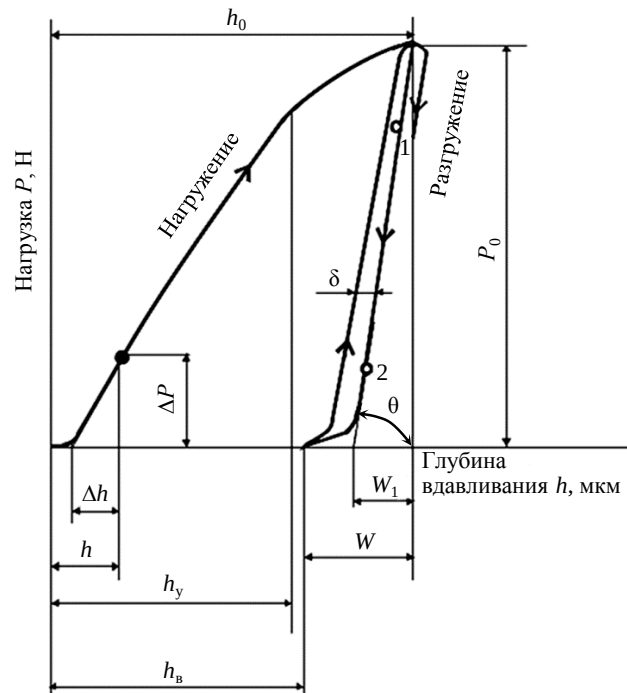


Диаграмма инструментального индентирования

В работах [47, 48] показаны области диаграммы инструментального индентирования, на которых определяемые величины соответствуют следующим методам испытаний на вдавливание: методы Мартенса [9] и ХНАДУ [49], метод ИСМ НАНУ (Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля) [50], метод Оливера–Фарра, метод Роквелла, методы Бринелля и Виккерса.

В работе [51] представлен метод кинетической микротвердости, который позволяет определить следующие показатели механических свойств:

- микротвердость по глубине отпечатка;
- модуль упругости;
- величину гистерезисных потерь;
- степень пористости, рыхлости материала;
- параметр, характеризующий упругопластические свойства материала;
- коэффициент вариации микротвердости как функцию глубины отпечатка;
- обратимую деформацию;
- микропрочностные показатели – микропрочность и микрохрупкость;
- коэффициент вязкости разрушения (коэффициент трещиностойкости).

В одном из методов построения деформационной кривой по результатам индентирования предполагается использование набора инденторов с разными вершинными углами, что приводит к изменению деформации и коэффициента C в формуле Тейбора. Например, в статье [52] показан метод, который основан на использовании набора пирамидальных инденторов с разными углами при вершине. Изменение угла позволяет менять степень деформации под индентором. Полученные кривые для двух методов показали хорошее совпадение, но при испытании на сжатие возможно изучить только небольшой участок кривой «напряжение–деформация», в отличие от кривых, полученных методом индентирования.

В работе [53] использована аналогичная методика построения кривых деформации с применением набора трехгранных инденторов, которые изменяют степень деформации под индентором от 2 до 35%. Применение каждого индентора дает возможность получить одну точку на кривой деформации в координатах «твердость по Майеру H_m –общая степень деформации под индентором». Полученная при индентировании трехгранными инденторами твердость по Майеру является средним контактным давлением и может быть пересчитана в напряжение течения при сжатии.

Построение кривых деформации методом индентирования открывает новые возможности для определения комплекса механических свойств материалов: верхней и нижней границы текучести, границы пропорциональности, максимального напряжения течения, напряжения разрушения, деформационного упрочнения на каждом отрезке кривой.

Анализ методов построения диаграмм растяжения материалов по результатам индентирования шаром

В стандарте [40] используют метод Тейбора для построения диаграммы деформирования материала по результатам индентирования, при этом оценивают отпечаток с учетом наплыва. Наплыв – это поднятие материала у края лунки из-за его выдавливания от индентирования. Из-за этого смещается край отпечатка, что необходимо учитывать при измерении твердости. Эффективность материала при индентировании характеризуется величиной изменения глубины вдавливания при постоянном усилии. Испытание может проводиться как при одном цикле нагружения, так и при многоцикловом характере приложения нагрузки. При этом в ГОСТ не регламентированы значения параметров программного нагружения.

Анализ стандарта [40] показал, что в нем недостаточно информации для проведения расчета диаграммы растяжения по результатам вдавливания индентора. Во многих пунктах стандарта приведены ссылки на стандарт [34], в котором представлены только формулы для определения модуля упругости, ползучести и релаксации материала. Следует отметить, что представленные в стандарте [40] формулы неудобны для расчета, так как их достаточно много и отсутствуют пояснения к определяемым величинам, а также непонятно как их применять при расчете диаграммы «напряжение–деформация». Приложение А стандарта [40] может быть полезно для научно-технического литературного обзора по разновидностям методик интерпретации диаграмм вдавливания.

В Приложении Е стандарта [40] описана нейросетевая методика [54, 55], которая успешно применяется фирмами-производителями испытательной техники. Например, немецкая компания Mubates [56] предлагает системы, которые позволяют перестраивать диаграмму индентирования в диаграмму растяжения и определять пределы прочности и текучести материала с использованием нейронных сетей.

Предложенная численная методика содержит общие требования к расчетной конечно-элементной модели, в которой не указаны параметры моделируемого контакта, параметры конечно-элементной сетки на контактной и ответной поверхности, не регламентируются условия нагружения и закрепления модели.

В другой предложенной методике с использованием нейронных сетей остается открытым вопрос создания такой нейронной сети, ее обучения с большим количеством статистических данных по конечно-элементным расчетам, которые также не совсем понятно, как нужно выполнять.

Следующий стандарт, который следует рассмотреть в рамках данного обзора, посвящен определению поверхностных остаточных напряжений методом инструментального индентирования [57]. Индентирование образцов проводят как в исходном состоянии, так и имеющих заданный уровень растягивающих и сжимающих напряжений. Далее для каждого условия приложения нагрузки численно рассчитывают диаграммы вдавливания. При использовании конечно-элементной модели (МКЭ) индентирования материала возникает вопрос о ее адекватности. Экспериментальный способ также не регламентируется и имеет определенные сложности при создании в образцах заданного уровня растягивающих и сжимающих напряжений. В ГОСТ Р 57172–2016 в общем виде представлены методы определения поверхностных остаточных напряжений, но отсутствует подробная методика по их реализации, что делает этот ГОСТ, также как и предыдущий стандарт [40], малоинформативным для использования.

Стандарт [21] разработан М.П. Марковцом. Представленный стандарт позволяет по значению твердости определить в таблице соответствующее значение предела текучести легированных сталей. Для других материалов стандарт не дает возможности определить предел текучести при растяжении, так как не представлена методология его расчета. (Вероятно, таблица соответствия твердости и предела текучести получена экспериментально, и поэтому расчет отсутствует в стандарте.)

В инструкции по определению механических свойств металла для оборудования атомных станций безобразцовыми методами [58] предлагаются приборы отечественного производителя и американской компании АТС, которые реализуют АВІ-метод: ТЕСТ-5У (ВНИИАЭС, Россия), ПИТМ-ДВ-02 (НПФ «Экспресс-измерения», Россия), МЭИ-Т7 (Университет МЭИ, Россия), SSM-M1000, SSM-B1000 и SSM-B4000 (Advanced Technology Corporation, США).

Порядок действий по феноменологической методике ВНИИАЭС представлен в табл. 2.

Таблица 2

**Феноменологическая методика ВНИИАЭС для получения
диаграммы растяжения по результатам вдавливания шара**

Условный номер действия	Порядок действий	Формула
1	Сопоставление коэффициентов подобия в формуле, описывающей степенные зависимости напряжений R от пластической деформации ε_p в процессе растяжения	$R(\varepsilon_p) = Y_a \cdot \varepsilon_p^m$, где Y_a – коэффициент запаса пластичности материала; m – коэффициент, который характеризует способность материала к упрочнению
2	Сопоставление коэффициентов подобия в формуле, описывающей степенные зависимости напряжений Hm от пластической деформации ε_p в процессе вдавливания	$Hm(\varepsilon_p) = Y_b \cdot \varepsilon_p^n$, где Y_b – коэффициент запаса пластичности материала; n – коэффициент, который характеризует способность материала к упрочнению
3	Определение твердости по Майеру через диаметр отпечатка d и силу, приложенную к индентору P	$Hm = \frac{P}{\pi \cdot d^2 / 4}$
4	Выражение диаметра отпечатка d через глубину вдавливания t и диаметр шарового индентора D	$d = 2\sqrt{t \cdot D - t^2}$
5	Представляем соотношение из второго пункта табл. 2 в следующем виде	$\frac{P}{d^2} = Y_b \left(\frac{d}{D} \right)^n$
6	По диаграмме вдавливания шарового индентора восстанавливаем диаграмму одноосного растяжения	$R(\varepsilon) = f(Y_b) \cdot \varepsilon^m$
7	В точке перегиба на участке вдавливания шарового индентора определяем текущее значение твердости по Бринеллю	$H_{\max} = \frac{P_{\max}}{\pi \cdot D \cdot t_{\max}}$, где $t_{\max}$ – значение глубины вдавливания; $P_{\max}$ – значение прилагаемого усилия в точке перегиба
8	Определение предела прочности при растяжении	$R_m = f(H_{\max})$, где $H_{\max}$ – твердость в точке перегиба
9	Определение предела текучести	$R_{0,2} = f(Y_b)$
10	Определение равномерного удлинения	$A_m = f(d_{\max}/D)$
11	Определение текущего диаметра поверхности контакта, соответствующего точке перегиба	$d_{\max} = 2\sqrt{(t_{\max} \cdot D - t_{\max}^2)}$
12	Построение истинной кривой одноосного растяжения	$R(\varepsilon) = b - (b - a) e^{-c\varepsilon}$ где a, b, c – параметры при $\varepsilon = \varepsilon_m$
13	Параметры a, b, c определяют по следующему алгоритму	$\varepsilon_m = \ln(1 + A_m)$, $R(\varepsilon = 0) = R_{0,2}$, $R(\varepsilon = \varepsilon_m) = \frac{dR}{d\varepsilon}(\varepsilon = \varepsilon_m) = R_m \cdot e^{\varepsilon_m}$, $c = \frac{1}{\varepsilon_m} \ln \left(\frac{(1+c)(x-1)}{x - e^{-c\varepsilon_m}} \right)$, $x = R_m \cdot e^{\varepsilon_m} / R_{0,2}$, $a = R_{0,2}$, $b = R_{0,2} \cdot e^{c\varepsilon_m} / (1+c)$

Методика Марковца состоит в том, чтобы найти текущее значение НВ при выполнении условия [21]

$$d/D=0,0893\approx 0,09. \quad (9)$$

Методика Марковца реализована в твердомерах Московского энергетического института, в котором разработан переносной прибор, позволяющий контролировать твердость, пределы текучести и прочности материала, строить кривую его деформирования [59]. В твердомере используют сферические инденторы, которые в зависимости от глубины вдавливания позволяют регистрировать различную контактную деформацию. Это дает возможность получить диаграмму вдавливания одним индентором в координатах «контактное напряжение–контактная деформация» (табл. 3).

Таблица 3

Методика Окриджской национальной лаборатории получения диаграммы растяжения по результатам вдавливания шара

Условный номер действия	Порядок действий	Формула
1	Точка на восстановленной истинной кривой одноосного растяжения $R(\epsilon_p)$ находится из соотношения (1)	$R=P/(\pi(d/2)^2\delta)$, где R – истинное напряжение; δ – множитель; d – диаметр лунки
2	Диаметр лунки D_p рассчитывается на основании формулы Герца	$d^3\left(\frac{1}{D}-\frac{1}{D_p}\right)=\frac{3P}{E}$
3	Кривизна лунки вычисляется на основании ее глубины h_p и диаметра D_p	$(D_p/2)^2=(D_p/2-h_p)^2+d^2$
4	Приведенный модуль упругости выражается через модуль упругости и коэффициент Пуассона образца (E_s, ν_s) и индентора (E_i, ν_i)	$\frac{1}{E}=\frac{1-\nu_s^2}{E_s}+\frac{1-\nu_i^2}{E_i}$
5	Определение множителя δ	$\delta=\begin{cases} 1,12 & \Phi\leq 1 \\ 1,12+\tau\ln\Phi & 1<\Phi\leq 27, \\ \delta_{\max} & \Phi>27 \end{cases}$ где $\Phi=\epsilon_p E_s/0,43R$, $\delta_{\max}=2,87\alpha_m$, $\tau=\frac{\delta_{\max}-1,12}{3,3}$, α_m – параметр чувствительности материала к скорости нагружения (для материалов нечувствительных к скорости нагружения $\alpha_m=1,0$)
6	Определение текущего диаметра лунки под нагрузкой t	$d_t=2\sqrt{tD-t^2}$
7	Определение связи диаметра лунки со значением усилия, приложенного к индентору	$P/d_t^2=A(d_t/D)^{m-2}$ где m – индекс Майера; A – коэффициент
8	Определение предела текучести	$R_{0,2}=\beta_m\cdot A+B$, где коэффициент β_m зависит от класса материала образца

Инструкция РД ЭО 0027–2005 [58] содержит подробное и понятное описание методики пересчета диаграммы индентирования в диаграмму растяжения материала и включает феноменологическую и Окриджскую методики, а также методику Марковца.

Методика ВНИИАЭС с использованием процедуры численного моделирования (как и рассмотренные ранее стандарты) содержит общие требования к построению конечно-элементной модели индентирования материала. Для понимания необходимости регламентирования процедуры создания конечно-элементной модели и проведения расчетов индентирования материалов рассмотрим работу [60], которая посвящена конечно-элементному моделированию индентирования металлических материалов.

Исследование индентирования пластичных материалов проводили с помощью численных конечно-элементных расчетов в программе ANSYS, которая позволяет проводить прочностные расчеты материалов и конструкций, состоящих из различных материалов, в том числе с заданием контактного взаимодействия [61–68]. Валидацию модели проводили на экспериментальных данных индентирования и растяжения материала. При моделировании учитывали несовершенство индентора, а для свойств сферического индентора и образца задавали кривые деформирования материалов, полученные при эксперименте. Оценивали чувствительность результатов расчетов к жесткости индентора, силе трения и ползучести образца. Для экономии времени расчетов рассматривали двумерную осесимметричную задачу с переменным разбиением модели в программе PATRAN. Поскольку процесс вдавливания имеет большую нелинейность, то с увеличением глубины проникновения сильно возрастают деформации конечных элементов с недопустимым изменением их формы, что приводит к несходимости расчета. Программа PATRAN имеет удобные средства ручной настройки сетки конечных элементов с возможностью удвоить размер элемента при переходе от зоны с мелкой сеткой к зоне с крупной сеткой без нарушения каких-либо ограничений геометрической формы элемента. Это достигается за счет использования трапециевидных элементов в качестве взаимосвязей между зонами двух размеров. В результате для всей сетки создается меньше элементов по сравнению с программой ANSYS. Разбиение индентора проведено в программе ANSYS с помощью стандартной опции свободного разбиения модели на конечные элементы [69–78].

При использовании контакта «узел–поверхность» контактный элемент представлял собой треугольник, основание которого являлось линией между двумя узлами на одной из поверхностей, а противоположная вершина являлась контактным узлом на другой поверхности. В этом случае расчет занимал длительное время, так как количество итераций на шаг нагрузки значительно увеличивалось после всего лишь нескольких микрометров проникновения моделируемого индентора. Проблема конвергенции усугубилась, когда между двумя поверхностями было включено трение скольжения. В связи с этим контакт моделировали иначе – парой контактных элементов, один из которых используется для поверхности индентора, другой – для поверхности образца. При таких условиях контакта наблюдалась хорошая сходимость задачи.

Нагружение образца осуществляли перемещением индентора на 0,1 мкм при каждом шаге нагрузки. Пиковая нагрузка достигалась при достижении максимальной глубины 20 мкм. На каждом шаге нагрузки измеряли геометрическую форму профиля вмятины, радиус и глубину контакта и сравнивали с соответствующими прогнозами аналитического решения Снедона [79], по которому определяются соотношения между нагрузкой, деформацией и формируемой контактной областью.

Следующий этап верификации модели проводили при сравнении расчетных кривых индентирования и кривых профиля отпечатка, полученных при различных

коэффициентах трения контактируемых поверхностей. Наибольшее расхождение кривых наблюдалось при максимальной глубине вдавливания.

При максимальной нагрузке проявляется эффект ползучести материала в виде плато на диаграмме индентирования. Ползучесть влияет не только на измеренную глубину и твердость, но и на наклон кривой разгрузки при пиковой нагрузке, которая является ключевой величиной при расчете модуля упругости. Расчетную кривую индентирования строили на основе экспериментальных данных, полученных при вдавливании индентора с различными скоростями нагружения.

Главная задача работы [60] – показать подходы к построению конечно-элементной модели индентирования материалов, к особенностям разбиения модели, задания контактных поверхностей, ее верификации и валидации. В статье перечислены различные нюансы по верификации и валидации конечно-элементной модели индентирования материала сферическим индентором и видно, что ее создание и расчеты достаточно трудоемки и многие моменты должны быть регламентированы, что отсутствует в существующих стандартах.

Заключения

Анализ методик по определению механических характеристик и построению диаграмм растяжения и сжатия материала по результатам вдавливания индентора показал, что они в своем большинстве описывают методы в общем виде и в них отсутствует подробное пояснение по их реализации. Достаточно информации содержит инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости, так как в ней подробно описаны феноменологическая методика, методика Марковца и Окриджская методика пересчета диаграммы индентирования в диаграмму растяжения материала.

В стандартах по расчету механических характеристик по результатам индентирования материала предлагается использовать МКЭ для моделирования индентирования, но не указан алгоритм построения конечно-элементной модели, что является недостатком и усложняет применение предлагаемых численных расчетов.

В связи с этим необходима доработка существующих стандартов и развитие расчетных методов с подробным описанием методик пересчета диаграмм индентирования в механические характеристики материалов.

Библиографический список

1. Бузник В.М., Каблов Е.Н., Кошурина А.А. Материалы для сложных технических устройств арктического применения // Научно-технические проблемы освоения Арктики. М.: Наука, 2015. С. 275–285.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
4. Ерасов В.С., Орешко Е.И., Луценко А.Н. Площадь свободной поверхности как критерий хрупкого разрушения // Авиационные материалы и технологии. 2017. №2 (47). С. 69–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-69-79.
5. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Силовой, деформационный и энергетический критерии разрушения // Труды ВИАМ. 2017. №10 (58). Ст. 11. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 25.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-11-11.
6. Булычев С.И., Алехин В.П. Метод кинетической твердости и микротвердости в испытании вдавливанием индентора // Заводская лаборатория. 1987. №53. С. 76–80.

7. Соловьев В.В., Гоголинский К.В., Усеинов С.С. и др. Особенности применения метода наноиндентирования для измерения твердости на наномасштабе // Нанотехника. Инженерный журнал. 2008. №1 (13). С. 111–115.
8. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику. М.: Машиностроение, 2007. 496 с.
9. Терновский А.П., Алехин В.П., Шоршоров М.Х. и др. О микромеханических испытаниях материалов путем вдавливания // Заводская лаборатория. 1973. №10. С. 1242–1246.
10. Лебедева С.И. Микротвердость минералов. М.: Недра, 1977. 118 с.
11. Хасанов О.Л., Струц В.К., Соколов В.М. и др. Методы измерения микротвердости и трещиностойкости наноструктурных керамик: учеб. пособие. Томск: Томск. политех. ун-т, 2011. 101 с.
12. Boussinesq J. Applications des potentiels a l'etude de equilibre et du mouvement des solides elastiques. Paris: Gauthier-Villars, 1885. 734 p.
13. Давиденков Н.Н. Некоторые проблемы механики материалов. Л.: Лениздат, 1943. 152 с.
14. Дрозд М.С. Определение механических свойств металлов без разрушения. М.: Metallurgia, 1965. 171 с.
15. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. М.: Машиностроение, 1971. 200 с.
16. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. 3-е изд. М.: Оборонгиз, 1974. 367 с.
17. Давиденков Н.Н. Динамические испытания металлов. М.; Л.: Гос. изд-во, 1929. 366 с.
18. Марковец М.П. Исследования в области измерения твердости // Труды метрологических институтов СССР. 1967. Вып. 91 (151). С. 58.
19. Соловьев В.В., Гоголинский К.В., Усеинов С.С. и др. Методы измерения механических свойств материалов с нанометровым разрешением и их метрологическое обеспечение // Тр. науч. сессии НИЯУ МИФИ-2010. 2010. Т. 2. С. 233.
20. Tabor D. The hardness of metals. Oxford: Clarendon press, 1951. 171 p.
21. ГОСТ 22762–77. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара. М.: Изд-во стандартов, 1978. 12 с.
22. Марковец М.П. Определение механических свойств материалов по твердости. М.: Машиностроение, 1979. 191 с.
23. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // Journal of Materials Research. 1992. Vol. 6. P. 1564–1583.
24. Oliver W.C., Pharr G.M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // Journal of Materials Research. 2004. Vol. 19. No. 1. P. 3–20.
25. Lo R.Y., Bogy D.B. Compensating for elastic deformation of the indenter in hardness tests of very hard materials // Journal of Materials Research. 1999. Vol. 14. P. 2276–2282.
26. Hay J.C., Bolshakov A., Pharr G.M. A critical examination of the fundamental relations used in the analysis of nanoindentation data // Journal of Materials Research. 1999. Vol. 14. P. 2296–2305.
27. Veprék S., Mukherjee S., Mannling H.-D., He J. On the reliability of the measurements of mechanical properties of superhard coatings // Materials Science and Engineering. 2004. Vol. 340. P. 292–297.
28. Cao Y.P., Dao M., Lu J. A precise correcting method for the study of the superhard material using nanoindentation tests // Journal of Materials Research. 2007. Vol. 22. P. 1255–1264.
29. Veprék-Heijman M.G.J., Veprék R.G., Argon A.S. et al. Non-linear finite element constitutive modeling of indentation into super- and ultrahard materials: The plastic deformation of the diamond tip and the ratio of hardness to tensile yield strength of super- and ultrahard nanocomposites // Surface and Coatings Technology. 2009. Vol. 203. P. 3385–3391.
30. Hay J., Agee P., Herbert E. Continuous stiffness measurement during instrumented indentation testing // Experimental Techniques. 2010. No. 3. P. 86–94.
31. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. М.: Наука, 1980. 303 с.

32. Sneddon I.N. Boussinesq's problem for a rigid cone // Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 1948. Vol. 44. P. 492–507.
33. Галанов Б.А., Дуб С.Н. Критические комментарии к методике Оливера–Фара для измерения твердости и упругого модуля посредством инструментального индентирования и уточнение ее базисных соотношений // Сверхтвердые материалы. 2017. №6. С. 3–24.
34. ГОСТ Р 8.748–2011 (ИСО 14577-1:2002) Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний. М.: Стандартинформ, 2013. 32 с.
35. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках (обзор) // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. Вып. 12. С. 2113–2142.
36. Haggag F.M. Small specimen test techniques applied to nuclear reactor vessel thermal annealing and plant life extension: ASTM STP 1204. American Society for Testing and Materials, 1993. P. 27–44.
37. Haggag F.M., Nastad R.K. Innovative approaches to irradiation damage, and fracture analysis // The American Society of Mechanical Engineers. 1989. P. 179–181.
38. Haggag F.M. Structural integrity evaluation based on an innovative field indentation microprobe // The American Society of Mechanical Engineers Pressure Vessels & Piping. 1989. Vol. 170. P. 101–107.
39. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. М.: Наука, 1976. 230 с.
40. ГОСТ 56232–2014. Определение диаграммы «напряжение–деформация» методом инструментального индентирования шара. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2014. 44 с.
41. Testing of metallic materials – Universal hardness test DIN 50359-1. German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung), 1997. 15 p.
42. Булычев С.И., Алехин В.П., Шоршоров М.Х. Исследование физико-механических свойств материалов в приповерхностных слоях и микрообъемах методом непрерывного вдавливания индентора (обзор) // Физика и химия обработки материалов. 1979. №5. С. 69–81.
43. Мощенок В.И., Тимофеева Л.А. Единый подход к определению поверхностной, проекционной и объемной твердости материалов в макро-, микро- и нанодиапазонах // Вестник ХНАДУ. 2011. Вып. 54. С. 7–12.
44. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / пер. с англ. М.: Мир, 1989. 510 с.
45. Зайцев Г.П. Твердость по Бринеллю как функция параметров пластичности металлов // Заводская лаборатория. 1949. №6. С. 704–717.
46. Огар П.М., Кушнарев В.С., Кобзова И.О., Чебыкин В.С. Применение энергетической твердости материала для определения диаграммы истинных напряжений // Systems Methods Technologies. Application of energy. 2019. №2 (42). P. 18–26.
47. Орешко Е.И., Уткин Д.А., Ерасов В.С., Ляхов А.А. Методы измерения твердости материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. №1 (85). Ст. 10. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 25.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-101-117.
48. Мощенок В.И., Костина Л.Л. Диаграмма индентирования и современные методы измерения твердости // Вестник КрНУ им. М. Остроградского. 2011. №5. С. 16–18.
49. Moshenok V.I. Modern methods of materials makro-, mikro-, nanohardness measuring // Engineering of Surface and Wares Renovation: 9th International Scientific and Technical Conference. Yalta; Kiev, 2009. P. 139–140.
50. Колмаков А.Г., Терентьев В.Ф., Бакиров М.Б. Методы измерения твердости. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Интермет Инжиниринг, 2005. 150 с.
51. Булычев С.И., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
52. Мильман Ю.В., Галанов Б.А., Чугунова С.И., Гончарова И.В. Определение механических свойств малопластичных материалов методом индентирования // Polish Ceramic Bulletin. 1996. Is. 50. No. 12. P. 95–102.

53. Гончарова И.В. Определение методом индентирования физико-механических свойств материалов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Киев: Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича, 2017. 171 с.
54. Джулли А., Пал С. Библиотека Keras – инструмент глубокого обучения. М.: ДМК Пресс, 2018. 294 с.
55. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. М.: Финансы и статистика, 2004. 13 с.
56. Примеры работ // Mubatec.com. URL: <http://mubatec.com/portfolio> (дата обращения: 05.11.2020).
57. ГОСТ Р 57172–2016. Определение поверхностных остаточных напряжений методом инструментального индентирования. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.
58. Инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости: РД ЭО 0027-2005 / ФГУП Концерн «РОСЭНЕРГОАТОМ». URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293828/4293828800.pdf> (дата обращения: 05.11.2020).
59. Матюшин В.М., Марченков А.Ю., Волков П.В., Демидов А.Н. Диагностика механических свойств материалов по диаграммам индентирования на разных масштабных уровнях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. №4. С. 47–52.
60. Syngellakis S., Habbab H., Mellor B.G. Finite element simulation of spherical indentation experiments // The International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements. 2018. Vol. 6. No. 4. P. 749–763.
61. Басов К.А. Графический интерфейс комплекса ANSYS. М.: ДМК Пресс, 2006. 248 с.
62. Боровков А.И. Возможности системы конечно-элементного моделирования ANSYS/LS-DYNA // Сб. материалов I Междунар. конф. пользователей программного обеспечения ANSYS E. М.: EMT–ANSYS-центр, 2003. С. 128–136.
63. Коллеров М.Ю., Гусев Д.Е., Орешко Е.И. Экспериментально-теоретическое обоснование выбора метода и имплантатов для устранения воронкообразной деформации грудной клетки // Научные труды (Вестник МАТИ). 2012. №19 (91). С. 331–336.
64. Antipov V.V., Oreshko E.I., Erasov V.S., Serebrennikova N.Y. Hybrid laminates for application in north conditions // Mechanics of Composite Materials. 2016. Vol. 52. No. 5. P. 973–990.
65. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Крылов В.Д. Построение трехмерных диаграмм деформирования для анализа механического поведения материала, испытанного при различных скоростях нагружения // Авиационные материалы и технологии. 2018. №2 (51). С. 59–66. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-59-66.
66. Коллеров М.Ю., Усиков В.Д., Куфтов В.С., Гусев Д.Е., Орешко Е.И. Медико-техническое обоснование использования титановых сплавов в имплантируемых конструкциях для стабилизации позвоночника // Титан. 2013. №1 (40). С. 39–45.
67. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н. Критические напряжения потери устойчивости в гибридных слоистых пластинах // Материаловедение. 2016. №11. С. 17–21.
68. Ерасов В.С., Автаев В.В., Орешко Е.И., Яковлев Н.О. Преимущества «жесткого» нагружения при испытаниях на статическое и повторно-статическое растяжение // Труды ВИАМ. 2018. №9 (69). Ст. 10. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 25.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-92-104.
69. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: справочное пособие. М.: Машиностроение-1, 2004. 512 с.
70. Котов А.Г. Основы моделирования в среде ANSYS: учеб. пособие. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2008. 200 с.
71. Кравчук А.С., Смалюк А.Ф., Кравчук А.И. Электронная библиотека механики и физики: лекции по ANSYS с примерами решения задач: в 5 ч. Минск: БГУ, 2013. Ч. 5. С. 105.
72. Колеров М.Ю., Егорова М.В., Орешко Е.И. и др. Экспериментально-теоретическое обоснование алгоритма раннего ортодонтического лечения детей с односторонней расщелиной губы и неба несъемными аппаратами // Стоматология детского возраста и профилактика. 2011. Т. X. №1 (36). С. 23–27.

73. Орешко Е.И., Ерасов В.С. Численные исследования устойчивости пластин с шарнирно закрепленными поперечными кромками // Деформация и разрушение материалов. 2018. №6. С. 7–11.
74. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Ястребов А.С. Прогнозирование прочностных и деформационных характеристик материалов при испытаниях на растяжение и ползучесть // Материаловедение. 2019. №2. С. 3–8.
75. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Качан Д.В., Лашов О.А. Исследования устойчивости стержней и пластин при сжатии с защемленными поперечными кромками // Труды ВИАМ. 2018. №9 (69). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-61-70.
76. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Лашов О.А., Подживотов Н.Ю., Качан Д.В. Расчет напряжений в слоистом материале // Труды ВИАМ. 2018. №10 (70). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-93-106.
77. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Лашов О.А., Подживотов Н.Ю., Качан Д.В. Численное исследование несущей способности слоистого материала // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2019. №3. С. 16–21.
78. Орешко Е.И., Уткин Д.А., Яковлев Н.О., Ерасов В.С. Исследование процессов деформирования металлических и полимерных композиционных материалов при индентировании // XII Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат». М.: ВИАМ, 2020. С. 326–342.
79. Журавков М.А., Романова Н.С. Определение физико-механических свойств биоматериалов на основе данных наноиндентирования и моделей дробного порядка // Российский журнал биомеханики. 2016. Т. 20. №1. С. 8–27.