

## Определение напряжений и деформаций в деформированном упруго-пластическом материале по характеристикам твердости

Н. Р. Музыка, В. П. Швец

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Рассматривается возможность определения напряжений и деформаций в деформированном упругопластическом материале по параметрам рассеяния значений твердости.*

**Ключевые слова:** напряжение, деформация, упругопластическая область, твердость, параметр рассеяния значений твердости.

**Введение.** В настоящее время задача определения текущих значений деформаций и напряжений при пластической деформации металла весьма актуальна, поскольку рассчитать эти характеристики методами теории пластичности достаточно сложно. Такие данные необходимы для определения напряжений в поверхностных слоях тела, оптимизации технологического процесса изготовления и повышения качества, а также для проектирования изделий оптимального веса.

Для определения напряжений в деформированном упругопластическом материале на различных стадиях изготовления изделий и контроля механических свойств при эксплуатации широко применяется метод статической и динамической твердости [1, 2]. Метод представляется как наиболее приемлемый в отношении простоты реализации, удобства, низкой стоимости и доступности приборного обеспечения, а также возможности проведения исследований без нарушения целостности изделия.

Задача данной работы заключается в дальнейшем развитии неразрушающих методов контроля с целью повышения достоверности определения по значениям твердости текущих напряжений в пластически деформируемом металле.

**Методика и результаты испытаний.** Известно, что твердость характеризует такие свойства материала, как прочность и пластичность, а также способность материалов оказывать сопротивление пластической деформации или хрупкому разрушению при местных контактных воздействиях с более твердым телом – индентором [1]. Располагая соответствующим тарировочным графиком зависимости значений твердости от уровня напряжений, предлагается напряжения в пластической области определять по распределению твердости [3].

Однако, несмотря на очевидные преимущества, метод твердости в его классическом варианте недостаточно информативен, поскольку твердость в большинстве случаев слабочувствительна ко многим видам трансформации структуры [4], а корреляция значений твердости с характеристиками других механических свойств не всегда устойчива и однозначна [5].

Анализ результатов выполненных исследований для технических приложений с использованием метода твердости показывает, что повысить достоверность корреляции значений твердости с характеристиками других механических свойств, в частности с пределами прочности и текучести материала, очень сложно [3, 6, 7]. Заметим, чем пластичнее материал, тем менее точными будут устанавливаемые соотношения между твердостью и прочностью.

Неоднозначность изменения твердости металла от уровня достигнутой деформации установлена экспериментально по результатам испытаний образцов сталей различных классов: Ст. 3, 20ХНЗ, 17Г1СА, 40Х, нержавеющей стали, титановые

сплавы и алюминиевый сплав В95 в условиях кратковременных статических, длительных и циклических нагружений. Твердость металлов при указанных видах нагружения изменяется незначительно, более того, она может как увеличиваться, так и уменьшаться [8–10]. Подобные результаты получены при исследовании металлоконструкций грузоподъемных машин в случае многоциклового усталости [11].

Можно отметить, что твердость как наиболее распространенная характеристика материала, определяющая его качество и возможность применения в конструкциях при различных условиях работы, неоднозначна в трактовании. Ее можно рассматривать как среднее контактное напряжение по площади отпечатка, измеренное при упругопластическом деформировании материала индентором [12], или как работу пластической деформации при внедрении индентора, приходящуюся на единицу объема полученного отпечатка [13]. Использование физических теорий твердого тела не позволяет описать твердость различных материалов из-за многообразия факторов, от которых она зависит. Поэтому значение твердости без указания метода и условий измерения является неопределенным, вследствие чего твердость нельзя отнести к физическим постоянным, характеризующим материал, она зависит не только от свойств материала, но и от условий и метода измерения [14].

Это нашло отражение в действующих стандартах измерения твердости методами Бринелля и Виккерса, в которых рекомендуется при обозначении твердости указывать параметры индентора, нагрузку и время выдержки под нагрузкой.

Неоднозначна в трактовании и физическая природа твердости [15]. Наиболее обоснованным представляется рассмотрение твердости с позиции термодинамической энтропии как функции, характеризующей меру неупорядоченности термодинамической системы, т.е. неоднородности расположения и движения ее частиц [16].

Корреляционные соотношения, которые приведены в литературных источниках и рекомендованы нормативными документами [17, 18] для использования при расчетах напряжений по значениям твердости, не имеют достаточно полного физического обоснования и получены, как правило, на основе результатов обработки массива экспериментальных данных, поэтому по мере накопления последних они уточняются. Большинство из предложенных соотношений получено при испытаниях материалов одного класса. Так, для определения по значениям твердости пределов прочности и текучести только для сталей предложено более 20 уравнений с различными коэффициентами корреляции, не считая уравнений, включающих дополнительные параметры, определение которых требует постановки специальных опытов. Значения коэффициентов корреляции, полученные на основе данных сравнительных испытаний, варьируются в диапазоне 0,15...0,5 в зависимости от класса материала и термообработки [6, 19], при этом область применения этих коэффициентов четко не определена, что свидетельствует о не всегда прямой связи значений твердости с пределами текучести или прочности. Аналогичная ситуация имеет место при определении других характеристик механических свойств по значениям твердости.

Поэтому в некоторых нормативно-технических документах рекомендуемые формулы перевода величин твердости в характеристики механических свойств металла допускается применять только для косвенной (приближенной) оценки предела прочности или предела текучести [20, 21], а значения характеристик механических свойств материала, определенные по твердости, следует оговаривать как ориентировочные [22].

Отличие характеристик механических свойств конструкционных материалов, полученных по результатам стандартных испытаний на статическое одноосное растяжение, от таковых, определенных при внедрении индентора по известным методикам, обусловлено различным напряженным состоянием при испытаниях на растяжение и на твердость.

В зависимости от масштабного уровня – субмикро-, микро- и макроуровней, определяющих размер области воздействия индентора на поликристаллический материал, различают нано-, микро- и макротвердость [2, 23]. На наноуровне определяется твердость блоков мозаики в зернах и участков границ зерен, если она зависит от количества разорванных межатомных связей в субмикрообъемах, на микроуровне – твердость зерен, отдельных фаз и структурных составляющих. В этих случаях твердость характеризует отдельные участки микроструктуры, т.е. локальные свойства материала, а не структуру в целом, что является недостаточным для описания материалов со сложной неоднородной системой. Испытания на микротвердость [24] чаще всего имеют место при материаловедческих исследованиях. При измерении макротвердости (обычной твердости) размер отпечатка на порядок больше, чем линейный размер частиц микроструктуры, он превышает размер всех неоднородностей. Поэтому макротвердость является интегральной характеристикой твердости десятков зерен, оказывающих сопротивление внедрению индентора в материал. С учетом этого при оценке деформаций и напряжений в поликристаллическом материале реальных изделий проводились испытания на макротвердость.

Кроме того, отметим, что значения отдельных локальных измерений обычной твердости, даже определенные с высокой точностью, не могут использоваться в качестве исходных параметров для определения с помощью корреляционных уравнений характеристик механических свойств материала. Это предопределено тем, что структура реальных поликристаллических металлов и распределение ее дефектов различаются в пределах одного образца. Она неоднозначна для разных объемов одного образца и неодинакова для образцов из одного и того же материала с разным уровнем дефектности структуры по длине прутка или по площади листа в состоянии поставки, что обусловлено спецификой металлургических процессов, в частности проката. Поэтому получаемые при стандартных испытаниях образцов на одноосное растяжение характеристики механических свойств, являющиеся среднестатистическими величинами и представляющие суммарную, математически наиболее вероятную характеристику объема образца, будут отличаться от определяемых даже по очень точно измеренным значениям локальной твердости.

Ограниченная информативность метода твердости и не всегда устойчивая корреляция чисел твердости с другими характеристиками механических свойств свидетельствуют о том, что твердость является обобщенной характеристикой, отражающей упругопластические свойства материала [16]. Как реакция на данный метод испытания, твердость представляет существенно случайную величину, поэтому установленное при эксплуатации конструкции или при технологическом процессе изготовления конструктивного элемента среднее значение твердости не дает достоверной информации, достаточной для определения уровня достигнутых рабочих напряжений и деформаций в материале изделия.

Одним из возможных путей решения проблемы повышения достоверности оценки уровня действующих напряжений и деформаций по твердости является подход, основанный на методе LM-твердости, в котором за параметр состояния металла приняты не абсолютные значения твердости, а степень рассеяния массовых измерений твердости [25]. Последняя существенно зависит от степени однородности структуры материала, о которой можно судить по величине параметров закона распределения. Согласно методу в качестве структурно-чувствительного параметра принят коэффициент гомогенности в распределении Вейбулла  $m$ , который коррелирует со структурным состоянием материала. Впервые данный подход был предложен для оценки уровня деградации металла при наработке [4].

Для реализации метода LM-твердости можно применять различные твердомеры, от класса точности которых зависит количество измерений, необходимое для расчета коэффициента гомогенности, учитывающего среднее значение твердости  $\overline{HRB}$ . Для

получения  $\overline{HRB}$  с заданной точностью при минимальном количестве измерений  $n$  за достоверное принимаем такое, которое исходя из точности твердомера (в данных исследованиях применялся твердомер COMPUTEST SC фирмы ERNST) с доверительной вероятностью  $\alpha = 0,95$  не будет отклоняться от среднего значения больше, чем на  $0,01 HRB$ . Определяя среднеквадратичное отклонение (стандартное отклонение)  $s$  по количеству  $n$  измерений твердости и постепенно их увеличивая, находим такое  $n$ , при котором  $ts/\sqrt{n} \leq 0,01 HRB$ , где  $t$  – критерий Стьюдента, зависящий от выбранной доверительной вероятности и количества измерений  $n$  [26]. При проведении испытаний с помощью прибора COMPUTEST SC минимальное значение  $n$  составляет 25 измерений. Естественно, чем больше  $n$ , тем ближе будет среднее значение твердости к истинному.

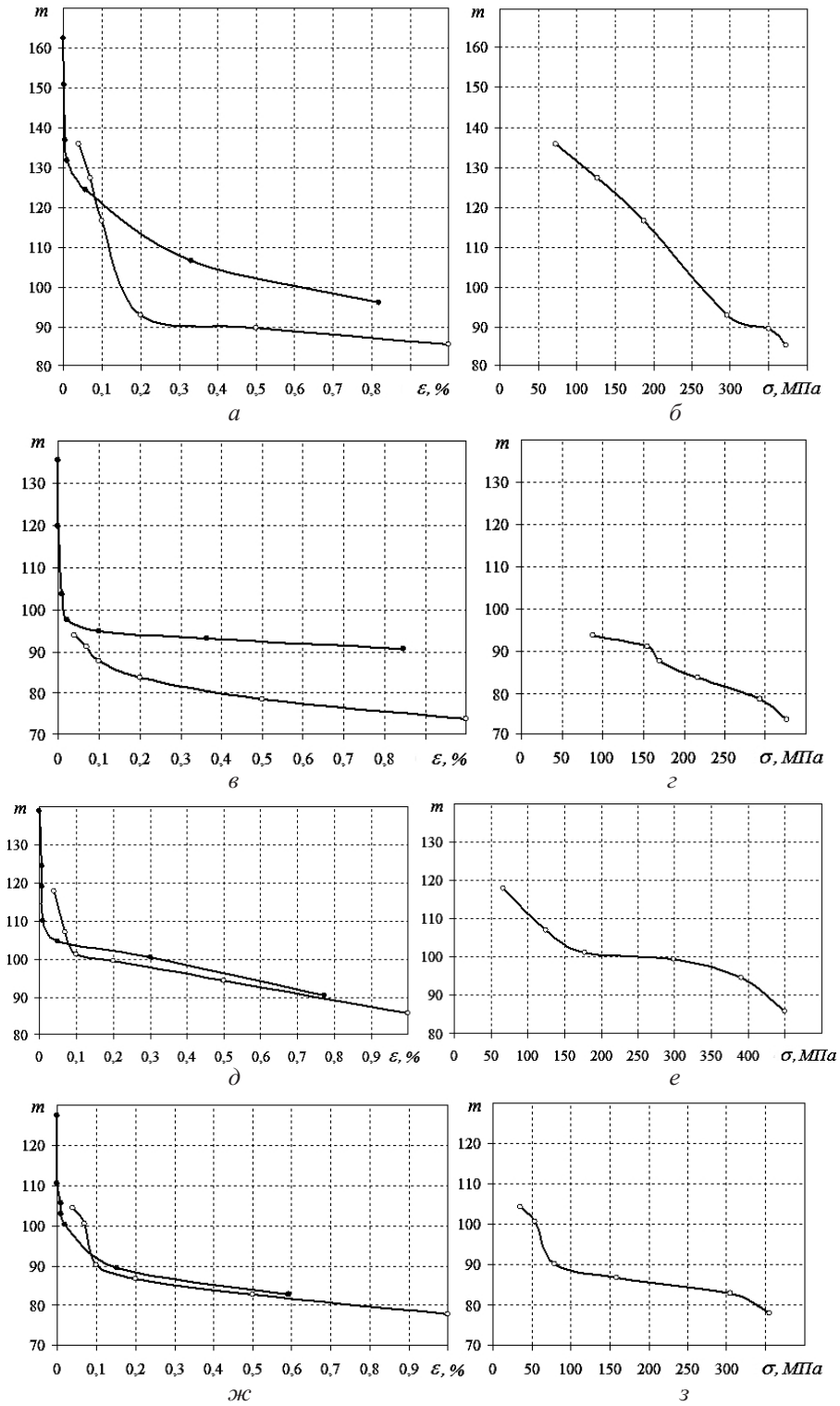
Испытанию подвергались образцы алюминиевого сплава Д16Т, нержавеющей стали 12Х18Н10Т и конструкционной стали 20К при одноосном растяжении согласно стандарту [27]. Режим испытаний – повторно-статический. На каждой ступени нагружения образца определялись напряжения  $\sigma$ , деформации  $\epsilon$  и остаточная деформация  $\epsilon_{ост}$ , а также выполнялись массовые замеры твердости  $HRB$  материала, находящегося в нагруженном и разгруженном состоянии, по которым рассчитывались параметры рассеяния значений твердости – коэффициенты гомогенности Вейбулла  $m$  [28].

Результаты исследования приведены в таблице, где  $m_p$  и  $m_n$  – коэффициенты гомогенности материала соответственно в разгруженном и нагруженном состоянии;  $\epsilon_n$  – деформация под нагрузкой;  $\overline{HRB}_p$  и  $\overline{HRB}_n$  – средние значения твердости материала в разгруженном и нагруженном состоянии.

**Значения твердости и коэффициента гомогенности при разных уровнях деформации материалов**

Материал	$m_p$	$m_n$	$\epsilon_n, \%$	$\epsilon_{ост}, \%$	$\sigma, \text{МПа}$	$\overline{HRB}_p$	$\overline{HRB}_n$
Сталь 45	162,5	–	0	–	–	88,2	–
	150,6	135,8	0,04	0,0035	73,5	88,4	88,3
	124,3	92,9	0,2	0,0575	295,5	88,9	88,3
	96,0	85,6	1,0	0,8171	373,2	90,2	89,7
Сталь 20К	135,2	–	0	–	–	75,5	–
	119,6	93,7	0,04	0,0009	88,5	75,6	74,5
	94,7	83,9	0,2	0,1015	216,1	75,8	74,0
	90,6	73,9	1,0	0,8455	326,6	76,0	74,7
Сталь 12Х18Н10Т	138,8	–	0	–	–	86,9	–
	124,4	117,7	0,04	0,0066	66,3	87,4	87,0
	104,5	99,3	0,2	0,049	298,6	88,8	85,9
	100,5	94,4	0,5	0,302	391,1	89,2	87,9
Сплав Д16Т	127,2	–	0	–	–	79,2	–
	110,4	104,2	0,04	0,0003	35,3	79,2	79,0
	100,1	86,6	0,2	0,0203	158,4	79,7	78,9
	82,8	77,9	1,0	0,5934	355,8	80,3	79,7

На рисунке представлены тарировочные зависимости между рассеянием значений твердости, напряжением, деформацией и остаточной деформацией для сталей 45, 20К, 12Х18Н10Т и алюминиевого сплава Д16Т.



Экспериментальная зависимость коэффициента гомогенности  $m$  от деформации и напряжений для сталей 45 (а, б), 20К (в, г), 12Х18Н10Т (д, е) и сплава Д16Т (ж, з). (Светлые точки – материал в нагруженном состоянии, темные – без нагрузки.)

Как видно, твердость по мере увеличения уровня деформации образца практически не изменяется, о чем свидетельствуют приводимые в литературных источниках данные о слабой чувствительности твердости к изменению структуры материала, тогда как параметры рассеяния измеренных значений твердости металла (коэффициенты гомогенности Вейбулла  $m$ ) на ступенях упругопластического деформирования существенно изменяются.

По полученным данным были построены тарировочные зависимости коэффициента гомогенности от уровней напряжения и деформации для образца в разгруженном состоянии и под нагрузкой.

Наличие растягивающих напряжений приводит к снижению сопротивления материала внедрению индентора и увеличению рассеяния значений твердости – снижению коэффициента  $m$ .

Анализ приведенных на рисунке данных свидетельствует об идентичности характера зависимостей  $\sigma = f(m)$  независимо от класса материала, что позволяет путем сопоставления полученных значений коэффициентов гомогенности, рассчитанных по результатам массовых замеров твердости материала, с соответствующими тарировочными зависимостями определять без нарушения целостности изделия значения действующих напряжений и отвечающие им деформации при изготовлении детали или при контроле действующих напряжений (деформаций) в конструктивном элементе оборудования, находящегося в эксплуатации.

**Заключение.** Показана возможность определения напряжений и деформаций в изделии методом индентирования по параметрам рассеяния характеристик твердости при упругопластическом деформировании металла в условиях одноосного растяжения. Представленная методика позволяет определять уровни напряжений и деформаций в материале изделия под нагрузкой при выполнении технологических операций изготовления, уровни достигнутого напряжения и остаточных деформаций в материале изделия, которое находится в ненагруженном состоянии, контролировать его состояние при эксплуатации путем обнаружения зон, подверженных пластической деформации металла при одноосном растяжении, и определять уровень напряжений случайных перегрузок.

## Резюме

Розглядається можливість визначення напруження і деформації у тілі, що знає пружно-пластичного деформування, за параметрами розсіяння характеристик твердості.

1. Григорович В. К. Твердость и микротвердость металлов. – М.: Наука, 1976. – 230 с.
2. Колмаков А. Г., Терентьев В. Ф., Бакиров М. Б. Методы измерения твердости: Справочное издание. – М.: Интермет инжиниринг, 2000. – 126 с.
3. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. – М.: Машиностроение, 1971. – 199 с.
4. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Пробл. прочности. – 2002. – № 4. – С. 5 – 11.
5. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л., Недосека С. А. Контроль текущего состояния металла труб действующих газопроводов. Метод исследования и результаты // Там же. – 2003. – № 2. – С. 29 – 36.
6. Марковец М. П. Определение механических свойств материалов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – С. 40 – 43.



7. Матюнин В. М. Методы и средства безобразцовой экспресс-оценки механических свойств конструкционных материалов. – М.: Изд. МЭИ, 2001. – 94 с.
8. Гонкало А. П., Музыка Н. Р., Рутковский А. В., Швец В. П. Влияние PVD-покрытий на сопротивление деформации и малоциклового усталости нержавеющей стали и титановых сплавов // Пробл. прочности. – 2011. – № 6. – С. 23 – 39.
9. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. Новый метод оценки деградации материала в процессе наработки // Залізничний транспорт України. – 2003. – № 5. – С. 30 – 33.
10. Лебедев А. А., Маковецкий И. В., Музыка Н. Р. и др. Оценка поврежденности материала по рассеянию характеристик упругости и статической прочности // Пробл. прочности. – 2006. – № 2. – С. 5 – 14.
11. Стариков М. А., Никифоров Ю. А. Оценка остаточного ресурса металлоконструкций грузоподъемных машин // Там же. – 2012. – № 1. – С. 147 – 155.
12. Барон А. А. Оценка хладноломкости стали по твердости при низких температурах // Завод. лаб. – 1990. – № 1. – С. 65 – 68.
13. Шоршоров М. Х., Булычев С. И., Алехин В. П. Работа упругой и пластической деформации при вдавливании индентора // Докл. АН СССР. – 1981. – 259, № 4. – С. 839 – 842.
14. Асланян Э. Г. Метрологическое обеспечение измерений твердости // Измерительная техника. – 2005. – № 1. – С. 45 – 50.
15. Акчурин М. Ш., Регель В. Р. Исследование особенностей деформационной структуры, образующейся при воздействии на кристаллы сосредоточенной нагрузки. Обзор // Завод. лаб. – 1999. – № 5. – С. 17 – 28.
16. Комаровский А. А. Физическая природа твердости // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 1. – С. 41 – 43.
17. РД ЭО 0027-94. Инструкция. Определение характеристик механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости. – М.: Росэннергоатом, 1994. – 68 с.
18. М-11-03-98. Методика определения механических свойств металла труб и трубопроводов с использованием переносного твердомера. – М.: ИЦ “Ресурсдиагностика”, 1998. – 12 с.
19. Дрозд М. С. Определение механических свойств металла без разрушения. – М.: Металлургия, 1972. – 216 с.
20. РД 153-34.0-17.464-00. Методические указания по контролю металла и продлению срока службы трубопроводов II, III и IV категорий. – Введ. 01.07.2001.
21. ДСТУ 4046-2001. Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. Технічне діагностування. – Київ: Держстандарт України, 2001. – С. 9 – 14.
22. Богачев И. Н., Вайнштейн А. А., Волков С. Д. Введение в статистическое металловедение. – М.: Металлургия, 1972. – С. 24.
23. Булычев С. И., Алехин В. П. Определение предела текучести по фактической площади контакта сферического индентора при нано-, микро- и макроиндентировании // Деформация и разрушение материалов. – 2007. – № 1. – С. 30 – 36.
24. Федосов С. А., Пешек Л. Определение механических свойств материалов микроиндентированием (современные зарубежные методики – обзор). – М.: МГУ, 2004. – 98 с.

25. Пат. 52107А Україна, МПК7 G01N3/00, G01N3/40. Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання. “LM-метод твердості” / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, Н. Л. Волчек. – Опубл. 16.12.2002. Бюл. № 12.
26. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятности и математической статистики (для технических приложений). – М.: Наука, 1969. – 512 с.
27. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 01.01.1986.
28. Музыка Н. Р., Маковецкий И. В., Швец В. П. Оценка влияния напряженности материала на его повреждаемость при наработке // Пробл. прочности. – 2008. – № 4. – С. 102 – 107.

Поступила 20.09.2013.