

Оценка поврежденности конструкционных сталей по параметрам рассеяния характеристик твердости материалов в нагруженном и разгруженном состояниях

А. А. Лебедев, В. П. Швец

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

Обсуждаются новые экспериментальные данные о твердости конструкционных сталей 25, 45 и 0Н9, полученные при исследовании плоских образцов, одновременно подвергнутых одноосному растяжению, в том числе с периодической разгрузкой при разных уровнях остаточной деформации. По результатам массовых (до 30) измерений установлены средние значения характеристики твердости материалов и параметры их рассеяния (по Гумбелю) при испытаниях образцов в нагруженном и разгруженном состояниях. Обоснована методика определения показателей чувствительности измеренных значений твердости материалов и степени их рассеяния к режиму нагружения, которые позволяют уточнить характеристики твердости материалов, определяемые на работающем оборудовании при его технической диагностике.

Ключевые слова: конструкционные стали, плоский образец, твердость, рассеяние свойств, коэффициент гомогенности, напряжение, деформация, разгрузка, чувствительность к напряженности материала.

Введение. Механические свойства любого материала (вещества) зависят от его природы и структурного состояния. Практически все существующие методы их определения включают испытание образца материала при заранее оговоренных температурно-силовых воздействиях.

К важной комплексной характеристике материала относится твердость, для определения которой могут быть использованы сравнительно простые и легко реализуемые методы испытаний, в том числе на изготовление специальных образцов.

Классические методы испытаний на твердость сводятся к определению силы сопротивления материала вдавливанию индентора в виде сферы, конуса или пирамиды. О твердости материала судят по размерам полученного отпечатка или по глубине погружения индентора [1, 2].

Твердость материала не относится к строго физически обоснованным параметрам его свойств, таким, как, например, характеристики упругости. Тем не менее в литературе опубликовано много результатов, свидетельствующих о наличии корреляций твердости с некоторыми механическими характеристиками конструкционных материалов [3, 4], подтверждена возможность по результатам испытаний на твердость строить диаграммы деформаций при растяжении, установлена связь параметров рассеяния характеристик твердости металлических материалов с вязкостью разрушения [5].

Наблюдаемая в отдельных случаях неустойчивость предложенных корреляций объясняется, как правило, недостаточной достоверностью определяемых характеристик твердости из-за отсутствия строгой регламентации условий проведения опытов, в том числе по уровню механической напря-

женности испытываемого образца. Повышение достоверности оценки влияния интенсивности и вида напряженного состояния материала на регистрируемые при измерениях твердости показатели, а также разработка обоснованных рекомендаций по мониторингу этого влияния для отдельных классов материалов приобрели особую актуальность в последнее время в связи с возросшим объемом измерений твердости материала на действующем оборудовании, когда эксплуатационные напряжения в нем могут достигать большой величины.

В существующих нормативных документах, регламентирующих методы определения твердости, возможное влияние этих факторов не оговорено, что в отдельных случаях может быть причиной снижения полученной информации о текущих свойствах материалов. Необходимость дальнейшего совершенствования стандартов на методы определения твердости и промышленные технологии, основанные на использовании этой важной характеристики, подтверждена результатами настоящего исследования.

Исследуемые материалы, образцы для испытаний, обработка опытных данных. В работе обсуждаются экспериментальные результаты, полученные при изучении твердости качественных углеродистых сталей 25 и 45 (ГОСТ 1050-74), а также специальной коррозионно-стойкой стали 0Н9 в исходном состоянии ($\varepsilon = 0$), при различных деформациях под напряжением при фиксированной нагрузке вдавливания и после разгрузки с определением некоторого аналога “восстановленной” твердости.

Выбор в качестве объекта исследования указанных сталей объясняется тем, что они обладают большинством характерных для сталей физико-механических свойств в различных сочетаниях. Так, при практически одинаковой пластичности ($\varepsilon_{\max} = 21...23\%$) они существенно различаются по характеристикам прочности. Стали 25 и 45, будучи качественно одинаковыми по природе, химсоставу и структуре, сильно отличаются от стали 0Н9 этими показателями, а стали 25 и 0Н9, обладая почти одинаковым (очень низким) деформационным упрочнением, значительно уступают по этому показателю сильно упрочняющейся стали 45. В исходном состоянии стали 25, 45 и 0Н9 имеют твердость HRB , равную соответственно 73,5; 87,4 и 108,6 МПа.

Опыты проводили на плоских образцах толщиной 10^{-2} м и шириной $5 \cdot 10^{-2}$ м при одноосном растяжении в режиме повторно-статического нагружения с выдержкой под нагрузкой и в разгруженном состоянии (до 1 мин), достаточной для выполнения необходимого числа измерений твердости (шкала HRB) прибором “Computest” (Швейцария).

На рис. 1 приведены диаграммы деформации сталей, на которых цифрами со штрихами отмечены области реализации указанных выше циклов полной разгрузки и последующего нагружения образца. При нагружениях, предшествующих очередной разгрузке, и в разгруженном состоянии выполнено по 30 измерений твердости материала в пределах деформации, не включающей участок разупрочнения.

Использованная методика обеспечивала стабильность и надежность проводимых измерений, хотя режим разгрузки одного из образцов стали 45 при $\varepsilon = 5\%$ был нарушен, в результате чего получены не свойственные для нее значения параметров рассеяния характеристик твердости. Поэтому ре-

зультаты измерений этого образца, в том числе при последующих разгрузках (при $\varepsilon = 10$ и 15%), в дальнейших обсуждениях, естественно, не фигурируют.

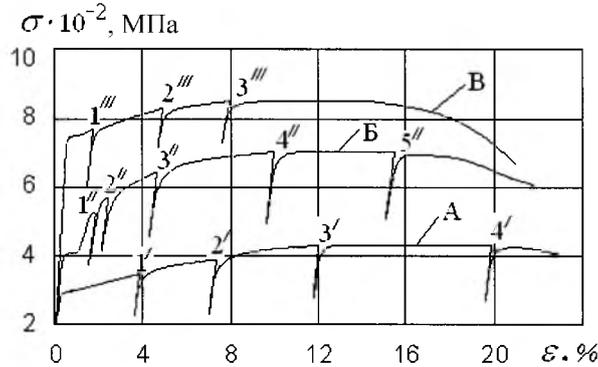


Рис. 1. Диаграммы деформации сталей 25 (А), 45 (В) и 0Н9 (В).

В соответствии с использованным методом оценки поврежденности материала (метод LM-твёрдости [6]) в качестве текущих экспериментальных данных приняты параметры рассеяния значений твёрдости по 30 измерениям, что позволило определить коэффициенты m гомогенности (по Вейбуллу), характеризующие степень стабильности полученных характеристик твёрдости сталей и их средние значения в каждом цикле до и после разгрузки. Коэффициенты m определяли по формуле Гумбеля [7, 8]

$$m = 0,4343 d_n \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2 \right]^{-1/2}, \quad (1)$$

где d_n – величина, зависящая от количества n измерений при $n = 30$, $d_n = 1,1124$; H_i – значение твёрдости (HRB) при i -м измерении; $\overline{\lg H}$ – среднее значение логарифма твёрдости по результатам n измерений.

Оценку степени разброса значений твёрдости можно проводить по другим статистическим критериям, например по коэффициенту ν вариации:

$$\nu = \frac{1}{\overline{H}} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (H_i - \overline{H})^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где n и H_i – то же, что и в формуле (1); \overline{H} – среднее значение твёрдости по результатам n измерений.

Для количественной оценки влияния степени напряженности материала от внешних воздействий на регистрируемые показатели твёрдости при данной наработке и соответствующие значения коэффициентов m , характеризующие их рассеяние и, следовательно, интенсивность накопленных в материале повреждений, предложены параметры:

$$\delta_H = \frac{\overline{H}_p - \overline{H}_H}{\overline{H}_H}; \quad \delta_m = \frac{m_p - m_H}{m_H}, \quad (3)$$

где \overline{H}_p , m_p – средняя твердость и коэффициент гомогенности, т.е. параметр ее рассеяния на исследуемой стадии деформирования при разгруженном образце; \overline{H}_H , m_H – то же для образца под нагрузкой, соответствующей той же стадии.

Параметры (3) имеют четкий физический смысл, а именно: δ_H – характеризует способность испытуемого объекта (образца материала) к перераспределению напряжений в зоне внедрения индентора, его величина зависит от геометрии объекта, характеристик упругости и пластичности материала, наличия градиента напряжений и других факторов; δ_m – характеризует изменение степени рассеяния характеристик твердости материала и, как следствие, его неоднородности за счет упругого обратимого раскрытия имеющихся дефектов под действием напряжений от внешних воздействий. Можно считать, что параметр δ_m является представительной характеристикой склонности материала к накоплению повреждений, интегрально отражающей темп этого процесса на разных стадиях развития деформаций. Значения параметров δ_H и δ_m изменяются в широких пределах в зависимости от характеристик действующего поля напряжений. Так, при растягивающих напряжениях δ_H и δ_m могут принимать значения от нуля при отсутствии влияния этого поля на твердость до бесконечности, когда твердость как свойство напряженного материала теряет смысл (она равна нулю).

Обсуждение результатов. На рис. 2–4 представлены результаты измерений твердости сталей, полученные на образцах, находящихся под соответствующим напряжением и после разгрузки. Приведенные данные и результаты аналогичных испытаний при малом числе циклов нагружения показали, что ограниченное число предшествующих периодических разгрузок образцов практически не влияет на характеристики твердости сталей (рис. 2,а–4,а), показатели m их рассеяния (рис. 2,б–4,б) и значения коэффициентов δ_H и δ_m (рис. 2,в–4,в), отражающих степень чувствительности характеристик твердости (абсолютных значений и их рассеяния) материалов к уровню механических нагрузок, воспринимаемых материалом во время измерения твердости. Установленная инвариантность характеристик твердости исследованных сталей и ее производных (m , δ) подтверждается небольшим разбросом экспериментальных точек, полученных при испытаниях материала, предварительно подвергнутого разному количеству разгрузок. Поэтому в дальнейшем результаты испытаний каждой стали рассматриваются, не связывая их с числом циклов, которое претерпел материал.

Заметим, что отсутствие влияния циклов разгрузки и последующего нагружения на твердость и рассеяние ее значений свидетельствует о том, что структурные трансформации, происходящие при реализации цикла, являются обратимыми. Они связаны с упругими деформациями структурных фрагментов различного уровня и их обратимыми перемещениями, не оказывающими влияния на общую остаточную макродеформацию металла, возникающую в результате его течения и разрушения.

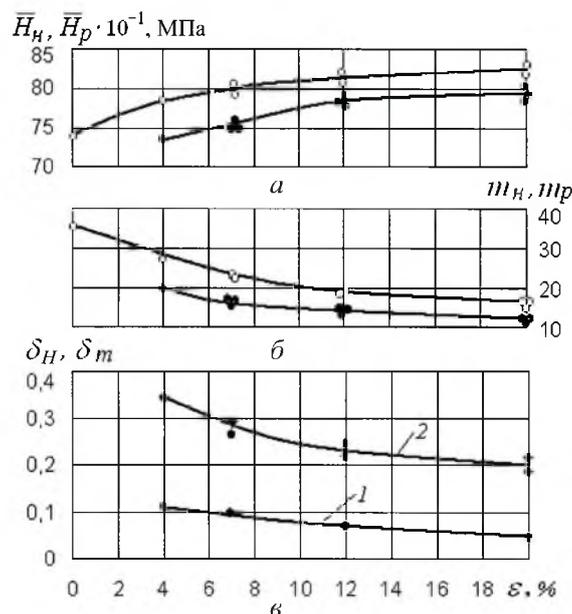


Рис. 2. Зависимости твердости (а), коэффициента гомогенности (б) и показателей δ_H (1), δ_m (2) чувствительности стали к напряженности материала (в) от степени деформации образца стали 25. (Темные точки – под напряжением; светлые – после разгрузки.)

Неизбежно появляющаяся при одноосном растяжении кристаллических материалов, к которым относятся исследуемые стали, направленная структура также не приводит к изменению твердости стали, что подтверждает высказываемое в литературе мнение о том, что твердость, как и упругость, является структурно-независимым свойством материала.

Обсуждаемые результаты получены путем внедрения индентора в материал плоского образца, подвергнутого одноосному растяжению. Наличие растягивающих напряжений, как и следовало ожидать, приводит к снижению сопротивления материала внедрению индентора, уменьшению регистрируемых значений твердости и увеличению их рассеяния (снижению коэффициента m). При этом закономерности изменения с ростом деформации материала его твердости (HRB) и гомогенности (коэффициента m) остаются качественно одинаковыми.

Интересно отметить, что степень чувствительности исследуемых сталей к уровню растягивающих напряжений при измерениях твердости в оценке показателем δ_H практически не изменяется с увеличением деформации, оставаясь близкой к $\delta_H = 0,1$ при всех исследованных уровнях деформаций в интервале $\varepsilon \geq 2 \dots 4\%$. Это связано с тем, что боковое давление на внедренный индентор со стороны нагруженного материала распределено по периметру неравномерно. Оно значительно меньше в направлении растяжения и остается практически таким же, что и в ненагруженном материале, в перпендикулярном направлении. Это приводит к уменьшению общего сопротивления материала и, как следствие, к снижению регистрируемых показателей твердости. Небольшое различие в значениях показателя δ_H у всех сталей можно объяснить идентичностью использованных инденторов,

образцов материала и режимов испытаний, а также незначительным отличием сталей по характеристикам упругости и пластичности, т.е. по основным свойствам, контролирующим взаимодействие и кинетику перераспределения полей контактных и наложенных растягивающих напряжений в зоне внедрения индентора.

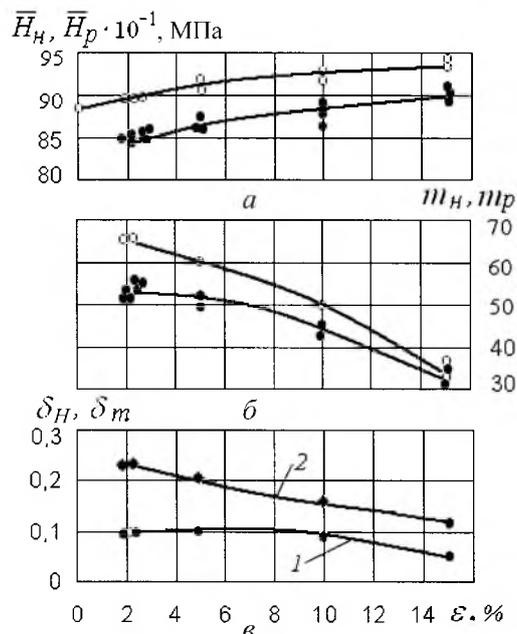


Рис. 3. Зависимости твердости (а), коэффициента гомогенности (б) и показателей δ_H (1), δ_m (2) чувствительности стали к напряженности материала (ϵ) от степени деформации образца стали 45. (Обозначения те же, что и на рис. 2.)

Отмеченные особенности распределения напряжений в зоне контакта при испытаниях напряженного материала заметно влияют на величину рассеяния характеристики твердости. Степень этого влияния в оценке показателем чувствительности δ_m у сталей разная и имеет качественную корреляцию с их прочностью. У малоуглеродистой пластичной стали 25 (рис. 2) при деформации 4% показатель δ_m достигает 0,35, снижаясь по мере роста деформации почти до 0,2 при $\epsilon = 20\%$. Аналогичная тенденция, но в меньшей мере проявляется у среднеуглеродистой стали 45 средней прочности (рис. 3): показатель δ_m снижается от 0,23 при $\epsilon = 2\%$ до 0,13 при $\epsilon = 15\%$. Самую низкую чувствительность, характеризуемую показателем δ_m , к напряженности имеет высокоупругая сталь 0Н9 (рис. 4): от 0,1 при $\epsilon = 2\%$ с незначительным увеличением до 0,13 с ростом деформации при $\epsilon = 8\%$. Такое поведение сталей можно объяснить особенностями их природы и структурного состояния, приводящими к разной реакции материалов на изменения условий взаимодействия материала с внедряемым индентором.

Естественно предположить, что сопротивление стали внедрению индентора, т.е. его регистрируемая при испытаниях твердость, зависит не только от степени напряженности материала, но и от вида напряженного состояния. Так, при одноосном сжатии твердость должна быть выше, чем при тех же

напряжениях в условиях одноосного растяжения. Различие в результатах измерений твердости может оказаться еще более заметным при сопоставлении твердости материала, подверженного трехосному растяжению и трехосному сжатию.

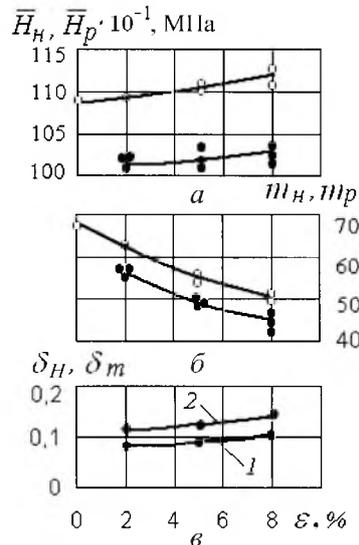


Рис. 4. Зависимости твердости (а), коэффициента гомогенности (б) и показателей δ_N (1), δ_m (2) чувствительности стали к напряженности материала (в) от степени деформации образца стали 0Н9. (Обозначения те же, что и на рис. 2.)

Постановка таких экспериментов представляет большие трудности. Однако имеющиеся опытные данные, полученные при испытаниях конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии, дают основание полагать, что к инвариантам напряженного состояния, в первую очередь влияющих на результаты измерений твердости, следует отнести первый инвариант тензора и второй инвариант девиатора напряжений. Не исключено также влияние третьего инварианта тензора, роль которого при описании процессов деформирования и прочности конструкционных материалов доказана [8] и подтверждена экспериментально [9].

Создание физически достоверных моделей, позволяющих проводить качественные и количественные оценки влияния уровня и вида напряженного состояния материала на его сопротивление внедрению более твердого индентора, т.е. на регистрируемые значения характеристик твердости, относится к категории сложных, но очень важных задач физики и механики материалов, имеющих большое практическое значение.

Заключение. На характеристики твердости исследованных сталей, определяемые методами вдавливания в испытуемое тело конического индентора, оказывают влияние степень механической напряженности материала, которая приводит к изменению регистрируемых значений твердости и степени их рассеяния. После снятия нагрузки твердость сталей восстанавливается, что свидетельствует об обратимости процессов, контролирующих изменения твердости и рассеяние ее значений, регистрируемых при массовых измерениях.

Предварительные разгрузки на разных стадиях деформирования практически не влияют на твердость сталей и рассеяние ее значений, определяемых при испытаниях материала как в нагруженном, так и в разгруженном состояниях, или при других фиксированных во время измерения твердости напряженно-деформированных состояниях материала.

Для оценки влияния напряженности материала на регистрируемые значения твердости и их рассеяние, связанное с особенностями напряженного состояния и процесса деформирования фрагментов структуры в зоне внедрения индентора в результате взаимодействия контактных напряжений и полей напряжений от внешних воздействий, предложены простые, но физически достоверные показатели чувствительности материала к напряженно-деформированному состоянию испытываемого образца на всех стадиях деформирования. Эти показатели имеют широкий диапазон изменения. Так, если при одноосном растяжении материал нечувствителен к напряжениям, то $\delta_H = \delta_m = 0$, если напряженность материала приводит к снижению твердости до нуля, то $\delta_H = \delta_m = \infty$.

Рассмотренные результаты и их анализ свидетельствуют о наличии больших резервов по дальнейшему совершенствованию методов и средств испытания материалов на твердость, а также по разработке эффективных технологий, основанных на ее использовании. К одному из путей расширения области применения метода твердости относится повышение его точности, в том числе за счет полного исключения (или различных форм учета при обработке результатов испытаний) влияния на регистрируемые параметры напряженности исследуемого материала.

Резюме

Обговорюються нові експериментальні дані про твердість конструкційних сталей 25, 45 та 0Н9, що отримано на зразках, які одночасно піддавали одноосному розтягу, у тому числі з періодичним розвантаженням за різних рівнів залишкової деформації. За результатами приблизно 30 вимірювань встановлено середні значення характеристик твердості матеріалів і параметри їх розсіяння (за Гумбелем) при випробуваннях зразків у навантаженому та розвантаженому станах. Обґрунтовано методику визначення показників чутливості вимірних значень твердості сталей та ступеня їх розсіяння в залежності від напруженості матеріалу, що дозволяє уточнити характеристики твердості матеріалів, які визначаються на обладнанні, що працює, при його технічній діагностиці.

1. *О'Нейл*. Твердость металов и ее измерение. – М.; Л.: Металлургия, 1940. – 376 с.
2. *Колмаков А. Г., Терентьев В. Ф., Бакиров М. Б.* Методы измерения твердости: Справочное издание. – М.: Интермет инжиниринг, 2000. – 126 с.
3. *Марковец М. П.* Определение механических свойств материалов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 192 с.

4. *Матюнин В. М.* Методы и средства безобразцовой экспресс-оценки механических свойств конструкционных материалов. – М.: Изд. МЭИ, 2001. – 94 с.
5. *Патент № 13952*, МКІ7 G01 N3/00, G01 N3/40. Україна. Визначення в'язкості руйнування матеріалів / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, В. П. Швець. – Опубл. 17.04.2006. Бюл. № 4.
6. *Патент № 52107А*, МКІ7G01N3/100, G013/40. Україна. Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання, “LM-метод твердості” / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, Н. Л. Волчек. – Опубл. 15.01.2003. Бюл. № 1.
7. *Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л.* Метод диагностики состояния материала по параметрам рассеяния характеристик твердости // Завод. лаб. – 2003. – № 12. – С. 49 – 51.
8. *Писаренко Г. С., Лебедев А. А.* Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наук. думка, 1976. – 416 с.
9. *Lebedev A. A., Koval'chuk B. I., Giginyak F. F., and Lamashevsky V. P.* Handbook of Mechanical Properties of Structural Materials at a Complex Stress State / Ed. by Prof. A. A. Lebedev. – New York: Begell House, 2002. – 550 p.

Поступила 09. 10. 2007