

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 620.178.15/179.119

Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости

А. А. Лебедев, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Предложен метод оценки “деградации” структурного состояния материалов вследствие накопления повреждений в процессе наработки. В качестве параметра поврежденности принято рассеяние характеристик твердости, определяемых по результатам массовых испытаний. Приведены данные экспериментальных исследований рассеяния характеристик твердости материалов после наработки в условиях циклического, кратковременного и длительного статического нагружения.

Ключевые слова: поврежденность, деградация, рассеяние характеристик твердости, коэффициент гомогенности Вейбулла.

Процесс разрушения материалов практически при любых видах внешнего воздействия реализуется постадийно. Различают две основные стадии. Деформирование материала на первой стадии сопровождается глубокими изменениями структуры вследствие образования разрывов в субмикро- и микрообъемах, выделения новых фаз, появления текстуры, химических флуктуаций и т.п. Для описания этой стадии широко используют концепции кинетической теории накопления рассеянных повреждений.

Необратимые изменения структуры приводят к формированию макротрещины, развитие которой, соответствующее второй стадии разрушения, описывают с позиций механики трещин. Относительная долговечность материала на обеих стадиях зависит от его природы, свойств, условий и режима нагружения.

Образование микротрещин часто считают началом потери несущей способности конструкции, а мониторинг ее остаточного ресурса (до потери устойчивости) проводят по параметрам, характеризующим деградацию, т.е. степень поврежденности материала на первой стадии.

Смысл понятия “поврежденность” вряд ли можно точно определить. В качестве простейших мер поврежденности часто принимают плотность объемных или поверхностных дефектов, среднее расстояние между ними и т.п. К физическим параметрам, которые коррелируют с поврежденностью, относят внутреннее трение, дефект модуля упругости или разность между модулями при растяжении и сжатии, скорость прохождения звука, электросопротивление и т.д.

К наиболее представительным механическим показателям, определение которых, к тому же, не требует разрушения конструкции и изготовления образцов, относится твердость. С этой величиной в большей или меньшей мере коррелируют характеристики практически всех механических свойств материала.

Методы статической и динамической твердости нашли широкое применение в диагностике состояния металла действующих конструкций трубопроводов, сосудов давления, несущих металлоконструкций и т.п. Однако, несмотря на их очевидные достоинства (удобство и простота приборного обеспечения, особенно при использовании динамических твердомеров), метод твердости в его классическом варианте является слабочувствительным ко многим видам трансформации структуры, т.е. к степени поврежденности.

Как показали специально поставленные опыты, более представительными в отношении оценки состояния структуры следует считать не абсолютные значения определяемой характеристики материала, а некоторые производные от них, в частности рассеяние результатов измерений, выполненных на одинаковых образцах в идентичных условиях.

Физическое обоснование перспективности предложенной идеи состоит в том, что рассеяние по крайней мере механических характеристик, в том числе твердости, присуще всем материалам, а степень рассеяния сильно зависит от их структурного состояния. Следовательно, об изменении структурного состояния, т.е. о деградации материала в заданных условиях работы, в частности вследствие старения под нагрузкой, можно судить по рассеянию характеристик его механических свойств.

Механический аспект практического использования этой идеи заключается в выборе параметра, интегрально характеризующего структурное состояние материала в отношении его гомогенности, и в обосновании рационального метода обработки результатов массовых испытаний на твердость с целью его определения.

Оценку структурной неоднородности материала при наличии достаточно большой совокупности данных о его свойствах, которая отражает их рассеяние, можно провести только с привлечением методов математической статистики на основе физически обоснованных законов распределения. Очевидно, что нормальный закон распределения в этом случае неприемлем, так как он не исключает наличие образцов с отрицательной твердостью, что невозможно. В то же время есть большой опыт использования в механике материалов, в частности при построении статистических теорий прочности, распределения Вейбулла [1]:

$$P(\sigma) = 1 - e^{-(\sigma/k)^m}, \quad (1)$$

где m, k – параметры распределения, причем параметр m (коэффициент гомогенности, отражающий степень рассеяния характеристик исследуемого свойства) можно определить по формуле Гумбеля [2, 3], которая применительно к испытаниям на твердость имеет вид

$$m = \frac{d(n)}{2,30259S(\lg H)} \quad (2)$$

Здесь величину $d(n)$ определяют в зависимости от числа n измерений, при этом n должно быть не менее 15 (рис. 1), а величину $S(\lg H)$ – по результатам n измерений,

$$S(\lg H) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2}, \quad (3)$$

где $\overline{\lg H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg H_i$ – среднее значение логарифмов твердости.

Большим значениям коэффициента m соответствует низкий уровень рассеяния характеристик твердости и, следовательно, лучшая организация структуры, низкая степень поврежденности, меньшим значениям, наоборот, – высшая степень поврежденности. Заметим, что уровню рассеяния определяемого свойства, в том числе твердости, можно ставить в соответствие другие статистические критерии, например доверительный интервал, коэффициент вариации и т.д.

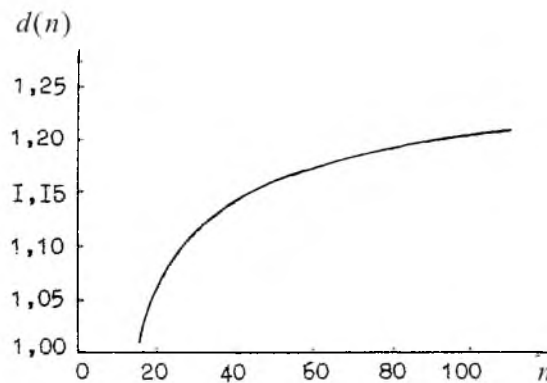


Рис. 1. Зависимость параметра $d(n)$ от числа измерений n .

Описанный выше метод может быть использован при исследовании накопления рассеянных повреждений в связи с наработкой в условиях длительного статического или циклического нагружения, а также в зависимости от уровня пластических деформаций при кратковременном нагружении. Об этом свидетельствуют приведенные ниже экспериментальные данные, полученные в процессе обработки метода.

Известно, что твердость, как и другие физико-механические свойства материала, может определяться на макро-, микро- и субмикроуровнях [4]. В зависимости от масштабного уровня, по аналогии с прочностью, различают соответственно макротвердость (или просто твердость), микротвердость и нанотвердость. Разработанные и достаточно достоверные методы их определения с незначительными усовершенствованиями использованы авторами

для получения данных, необходимых для определения степени представительности твердости на каждом из указанных масштабных уровней при оценке степени структурной неоднородности материала за счет накопленных в условиях наработки рассеянных повреждений.

Твердость и микротвердость определяли по стандартной методике на твердомерах Виккерса и с помощью прибора ПМТ-3 алмазной пирамидой с углом у вершины 136° при нагрузке на индентор соответственно 15 и 1 Н.

Нанотвердость определяли на приборе Nano Indenter-II, MTS Systems Inc. Режим испытаний: нагружение – трехгранным индентором Берковича с постоянной скоростью роста нагрузки, равной 5 мН/с, нагрузка – 0,12 Н, расстояние между отпечатками – $50 \cdot 10^3$ нм (50 мкм). Количество измерений на каждом образце составляло от 25 до 40.

Объектом исследования служили образцы из сталей, используемых для изготовления труб: сталь X46 (производство Франции) в исходном состоянии и после длительной (> 20 лет) эксплуатации трубы (внешний диаметр 355,6 мм, толщина стенки 7,92 мм) при номинальном давлении не более 10,5 МПа; трубная сталь 17Г1С в исходном состоянии и после наработки в условиях циклического нагружения при знакопеременном изгибе и углеродистая сталь Ст. 3 в исходном состоянии и после кратковременного статического деформирования при одноосном растяжении.

Результаты измерения макро-, микро- и нанотвердости* стали X46 представлены на рис. 2 в виде гистограмм средних значений твердости по данным 25 измерений на образцах в исходном состоянии и после наработки. Как видно, наработка приводит к повышению твердости на всех уровнях: на 7,9% – макротвердости (HV), на $\sim 20\%$ – микротвердости ($H\mu$) и нанотвердости (Hn). В то же время значение коэффициента гомогенности m , характеризующего степень однородности материала и рассчитанного по формуле (3), снизилось в процессе наработки более чем на 35%, а по данным измерений микро- и нанотвердости осталось практически без изменений.

Качественно мало отличающиеся результаты получены на образцах из стали X42, относящейся к тому же классу, что и сталь X46. Условия и длительность наработки у обеих сталей практически одинаковы.

Обращает на себя внимание относительно высокая степень повышения при наработке средних значений микро- и нанотвердости. Как показали дальнейшие исследования, этот факт является, скорее, исключением, чем общей закономерностью. В дополнительных опытах наблюдалась слабая чувствительность твердости к наработке, а при оценке микротвердости, более того, даже противоположные эффекты – заметное снижение этой характеристики. Поэтому анализ результатов других измерений, проведенных в рамках настоящей работы, ограничен ниже только данными по твердости исследуемых материалов.

Качественно аналогичные результаты, свидетельствующие о более высокой чувствительности к наработке характеристик рассеяния твердости, чем осредненные значения ее абсолютных величин, получены на материалах, работавших при переменных нагрузках. На рис. 3 приведены гистограммы, построенные по результатам испытаний трубной стали 17Г1С в

* Опыты по измерению нанотвердости проведены канд. техн. наук С. Н. Дубом.

исходном состоянии и после наработки в условиях знакопеременного изгиба до разрушения при $\sigma_H = 35$ МПа и $N = 0,57 \cdot 10^7$ цикл и без разрушения при $\sigma_H = 28$ МПа и $N = 10^7$ цикл. Из рис. 3,а видно, что при наработке в условиях циклического нагружения, как и в случае длительного статического нагружения, наблюдается незначительное увеличение твердости, причем на ее прирост в большей степени влияет уровень напряжений, чем длительность наработки. Это является принципиальным при изучении кинетики деградации свойств материала и требует более детального исследования.

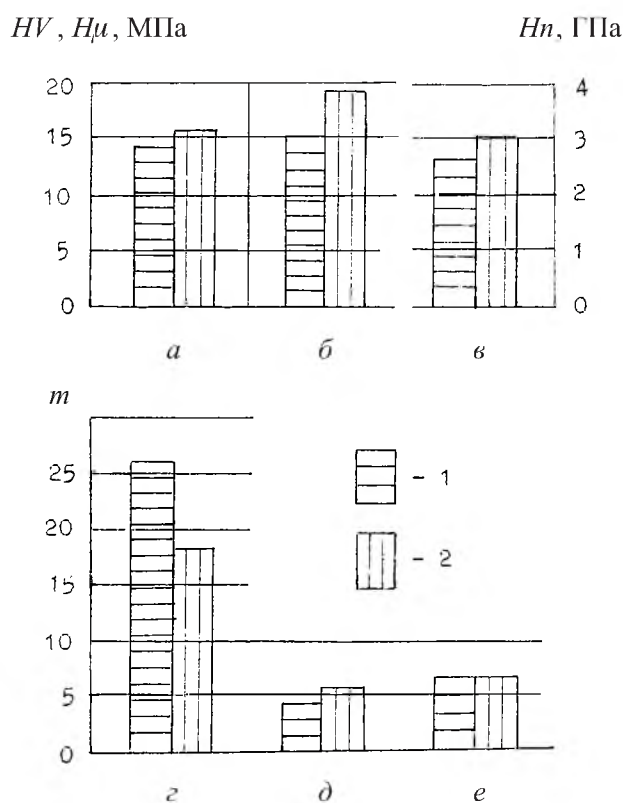


Рис. 2. Результаты испытаний стали X46: а, б, в – макро-, микро- и нанотвердость стали соответственно; г, д, е – коэффициенты гомогенности по макро-, микро- и нанотвердости (1 – исходное состояние материала, 2 – после наработки).

В данном случае заслуживает внимания сравнительно низкая чувствительность твердости к наработке, что указывает на слабую корреляцию этой важной механической характеристики и структурного состояния металла при усталостном нагружении. В то же время изменения коэффициента гомогенности Вейбулла (рис. 3,б) более заметны. Это свидетельствует о том, что процесс накопления повреждений протекал значительно интенсивнее при напряжении 35 МПа, достиг своего критического значения и в момент разрушения составлял почти половину исходного. При напряжении 28 МПа он снизился не более чем на 10%, хотя материал был подвержен 10^7 циклам нагружений (без разрушения).

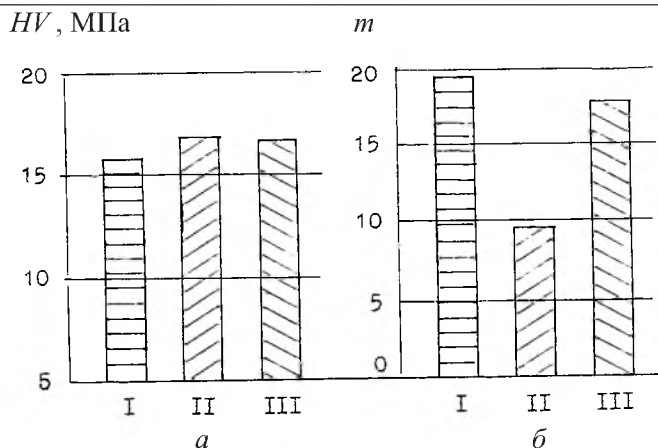


Рис. 3. Результаты измерений твердости (а) и коэффициент гомогенности (б) при испытании стали 17Г1С: I – исходное состояние; II – после наработки до разрушения при $\sigma = 35$ МПа; III – после наработки до $N = 10^7$ цикл при $\sigma = 28$ МПа.

Накопление повреждений в материале хорошо коррелирует с параметром Вейбулла и при кратковременном статическом нагружении стали. Как и при описанных выше условиях длительного статического и циклического нагружения, твердость в процессе статического кратковременного деформирования (рис. 4) практически не изменяется при существенном изменении характеристики рассеяния ее значений – параметра Вейбулла, интенсивность уменьшения которого с увеличением относительного сужения, т.е. степени деформации, растет.

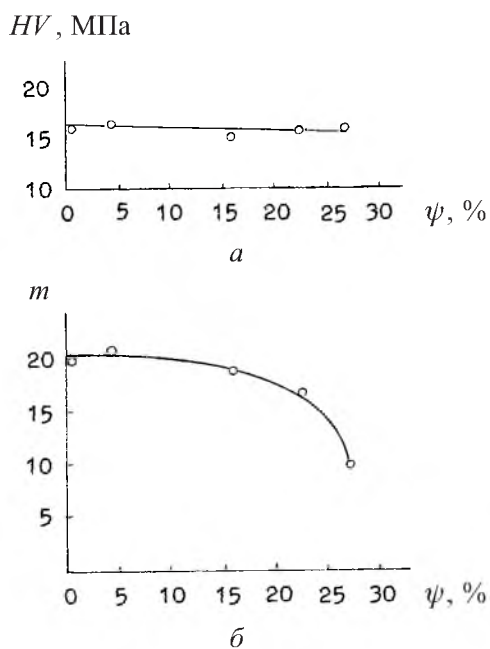


Рис. 4. Зависимость твердости (а) и коэффициента гомогенности (б) стали Ст. 3 от относительного сужения при одноосном статическом деформировании.

Таким образом, можно заключить, что обычно применяемый метод твердости является слабочувствительным к трансформации структуры в процессе наработки, т.е. к изменениям поврежденности материала. Более представительными параметрами в отношении информативности и достоверности следует считать характеристики рассеяния абсолютных значений твердости, массив сведений о которых получен в одинаковых условиях измерений с помощью одинаковых твердомеров. Из полученных данных следует, что такой характеристикой может быть коэффициент гомогенности Вейбулла, определяемый по результатам массовых испытаний с использованием метода Гумбеля.

Предлагаемый метод прост и может быть реализован непосредственно на испытуемом элементе конструкции.

Резюме

Запропоновано метод оцінки деградації структурного стану матеріалів внаслідок накопичення пошкоджень у процесі напрацювання. За параметр пошкоженості прийнято розсіяння характеристик твердості, які визначаються за результатами масових випробувань. Наведено результати експериментальних досліджень розсіяння характеристик твердості матеріалів після напрацювання в умовах циклічного, короткочасного і тривалого статичного навантаження.

1. *Weibull W.* A statistical discription function of wide applicability // *J. Appl. Mech.* – 1951. – **18**, No. 3. – P. 293 – 297.
2. *Gumbel E. J.* *Statistical Theory of Extreme Values and Some Practical Applications.* – Washington: National Bureau of Standards, 1954. – 472 p.
3. *Махутов Н. А., Зацаринный В. В., Базарас Ж. Л. и др.* Статистические закономерности малоциклового разрушения. – М.: Наука, 1989. – 253 с.
4. *Григорович В. К.* Твердость и микротвердость металлов. – М.: Наука, 1976. – 230 с.

Поступила 04. 02. 2002