

## Оценка влияния напряженности материала на его повреждаемость при наработке

Н. Р. Музыка, И. В. Маковецкий, В. П. Швец

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

*Исследована степень влияния напряженности материала на его повреждаемость при эксплуатации по параметрам рассеяния характеристик твердости. Проанализировано влияние полных разгрузок на процесс накопления повреждений в материале.*

**Ключевые слова:** напряженность, твердость, пластическая деформация, полная разгрузка, повреждаемость структуры, коэффициент гомогенности.

**Введение.** Для оценки состояния материала изделия на разных стадиях наработки используются различные методы [1]. При реализации одних методов необходимо осуществить разгрузку находящегося в напряженном состоянии элемента конструкции и вырезать образец для исследований [2]. Согласно другим методам оценку состояния материала можно проводить, не повреждая изделие [3]. Большинство работ по диагностике технического состояния проводится, когда изделие находится в ненапряженном (разгруженном) состоянии. Получаемые при этом результаты не в полной мере отражают реальное состояние структуры материала, а также реакцию его структуры на спектр рабочих нагрузок.

Поэтому представляет интерес исследовать степень влияния напряженности материала на его повреждаемость при наработке, определить возможность применения данных о повреждаемости структуры ненапряженного материала для оценки его рабочего (напряженного) состояния. Кроме того, необходимо выяснить степень влияния на проводимые оценки вынужденных периодически выполняемых при проведении регламентных работ по диагностике изделия полных разгрузок. Это связано с тем, что частичные и полные разгрузки даже при низких уровнях напряжений, составляющих  $(0,6...0,7)\sigma_{0,2}$ , а также повторяющиеся разгрузки приводят к изменению механических характеристик структурно-чувствительных материалов [4, 5].

**Методика испытаний.** Образцы подвергали повторно-статическому деформированию при одноосном растяжении с одновременным измерением твердости в их рабочей части (в зоне равномерной деформации) в нагруженном и разгруженном состояниях при одинаковых уровнях пластической деформации. Однако использовать измеренные абсолютные значения твердости для оценки влияния напряженности материала на его повреждаемость затруднительно из-за слабой корреляции твердости со структурой материала [6]. Поэтому состояние структуры материала оценивали методом LM-твердости [7], согласно которому за степень повреждаемости принимается параметр, характеризующий рассеяние значений твердости при массовых замерах. В качестве такого параметра использовали коэффициент  $m$  гомогенности Вейбулла, рассчитываемый по формуле

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

где  $d_n$  – параметр, определяемый по количеству  $n$  измерений [8];  $H_i$  – значения твердости по результатам  $i$ -го измерения;  $\overline{\lg H}$  – среднее значение логарифма твердости по результатам  $n$  измерений.

Кроме того, для оценки повреждаемости структуры материала использовали показатель несплошности, характеризующий плотность накопленных в нем дефектов:

$$k_1 = m_p - m_n$$

( $m_p$  и  $m_n$  – коэффициенты гомогенности Вейбулла для материала в разгруженном и нагруженном состояниях), и показатель твердости

$$k_2 = HRB_p - HRB_n$$

( $HRB_p$  и  $HRB_n$  – твердость материала в разгруженном и нагруженном состояниях). В предельном случае (в момент разрушения материала) показатель несплошности  $k_1 \rightarrow 0$ , что свидетельствует о максимальной повреждаемости материала.

**Результаты исследования.** Испытания материалов на одноосное растяжение проводили на стандартных образцах [9] толщиной  $1 \cdot 10^{-2}$  м и шириной  $5 \cdot 10^{-2}$  м в рабочей части. Материал образцов – листовые углеродистые конструкционные стали 20 и 45, а также сталь 0Н9, применяемая в криогенной технике. Образцы нагружали ступенчато до предельной для каждого материала пластической деформации, соответствующей началу формирования шейки образца. На каждой ступени деформации  $\varepsilon_1 \dots \varepsilon_4$  проводили измерения твердости материала в рабочей зоне образца в нагруженном и разгруженном состояниях. Значения твердости определяли по 30 отпечаткам. Затем рассчитывали параметры рассеяния значений характеристик твердости. При незначительной повреждаемости структуры металла рассеяние этих значений небольшое, с повышением плотности структурных дефектов (поры, микротрещины, ямки и др.) оно увеличивается.

Исследованию подвергали четыре партии образцов. Образцы первой партии нагружали до  $\varepsilon_1$ , измеряли твердость материала, после чего производили полную разгрузку с измерением твердости, затем их снова нагружали до  $\varepsilon_1$  и измеряли твердость. Далее образцы, не разгружая, деформировали до следующей ступени  $\varepsilon_2$ , и твердость измеряли по описанной выше процедуре. Испытания на твердость второй партии образцов начинали со второго уровня пластической деформации  $\varepsilon_2$ , третьей и четвертой партий – соответственно с третьего  $\varepsilon_3$  и четвертого  $\varepsilon_4$  уровней.

На рис. 1–3 приведены диаграммы твердости и повреждаемости структуры исследуемых материалов. Там же представлены результаты измерения твердости материала в нагруженном состоянии и соответствующие расчет-

ные значения коэффициента  $m$  гомогенности Вейбулла. Для построения диаграмм твердости и коэффициента гомогенности для материала в ненагруженном состоянии использовали результаты испытаний образцов, у которых первые разгрузки проводили при соответствующих деформациях.

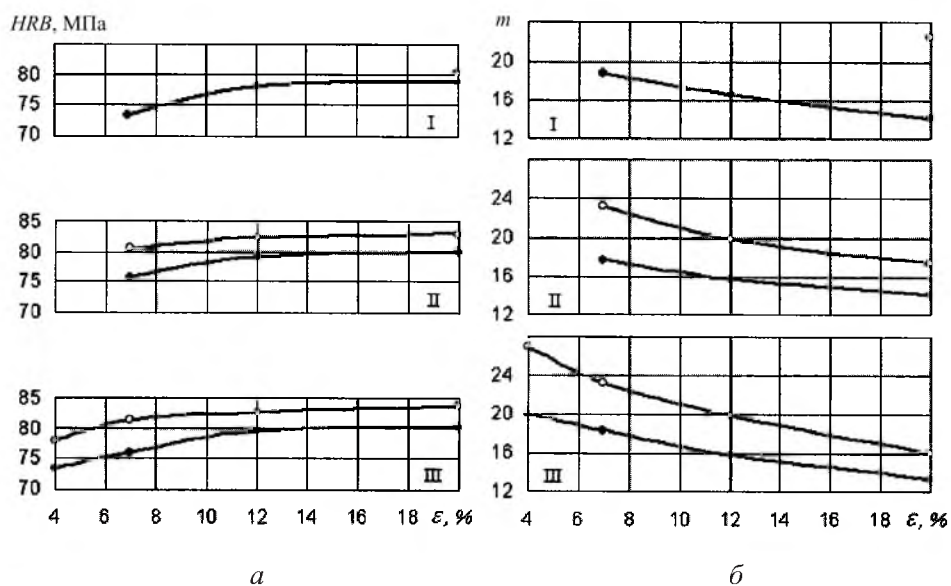


Рис. 1. Диаграммы твердости (а) и накопления повреждений (б) стали 20: I – без промежуточных полных разгрузок; II – после двух разгрузок при деформациях 7 и 12%; III – после трех разгрузок при деформациях 4, 7 и 12%. (Здесь и на рис. 2, 3: светлые точки соответствуют ненагруженному состоянию образца, темные – нагруженному.)

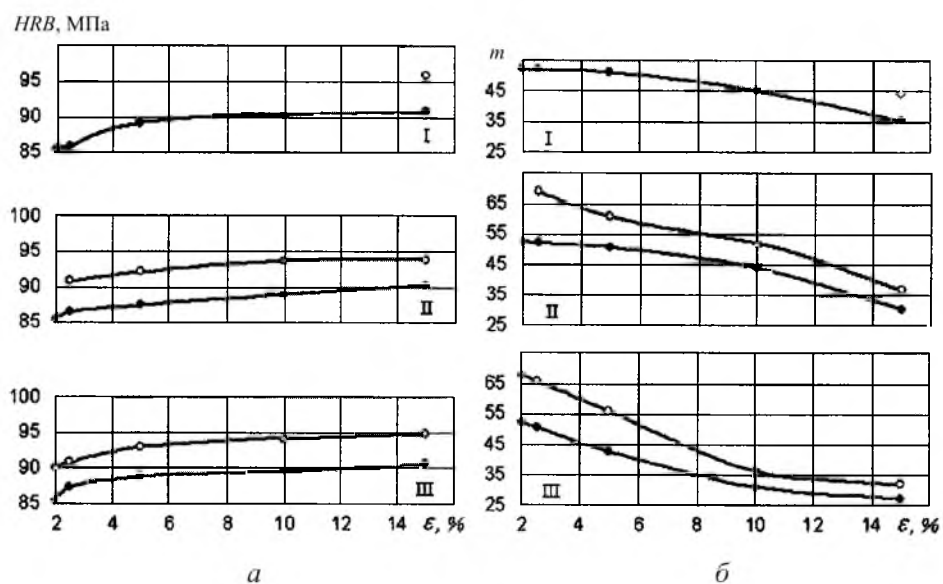


Рис. 2. Диаграммы твердости (а) и накопления повреждений (б) стали 45: I – без разгрузок; II – после трех разгрузок при деформациях 2,5; 5 и 10%; III – после четырех разгрузок при деформациях 2; 2,5; 5 и 10%.

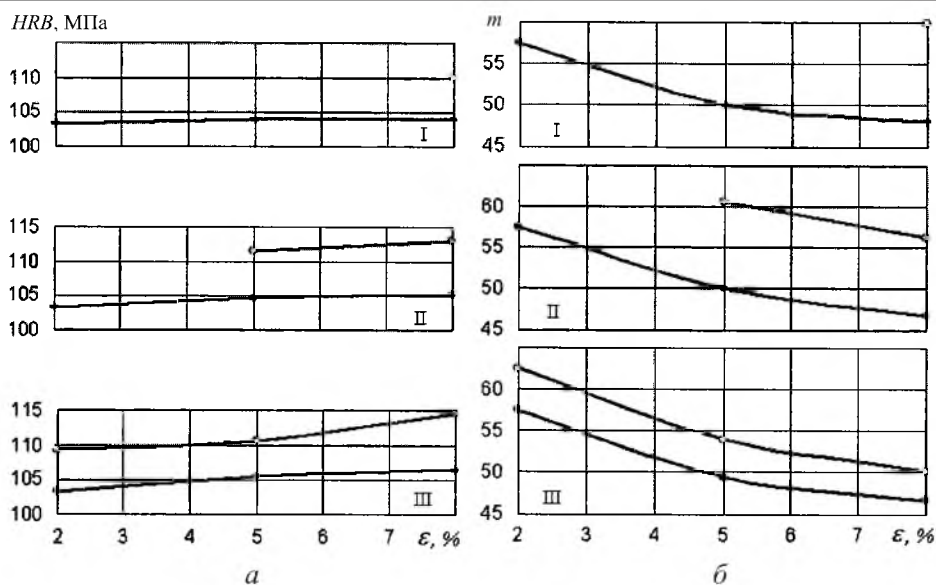


Рис. 3. Диаграммы твердости (*a*) и накопления повреждений (*б*) стали 0Н9: *I* – без разгрузок; *II* – после одной разгрузки при деформации 5%; *III* – после двух разгрузок при деформациях 2 и 5%.

Видно, что с увеличением деформации твердость сталей 20 и 45 возрастает, причем для металла под нагрузкой она ниже, чем в разгруженном состоянии. Это обусловлено тем, что под нагрузкой поры и другие несплошности материала, скрытые в разгруженном материале, проявляются. Рост кривой твердости в напряженном состоянии происходит пропорционально увеличению нагрузки в результате повышения сопротивления материала (перемычек между порами) деформированию индентором. Однако пластическая деформация не для всех материалов приводит к повышению твердости. Если для углеродистых сталей твердость заметно увеличивается, то для пластичной коррозионно-стойкой стали 0Н9 с повышенным содержанием никеля при деформировании без промежуточных разгрузок она практически не изменяется. Аналогичный характер изменения твердости от уровня пластической деформации отмечен для стали Ст. 3 [8].

В процессе деформирования повреждаемость структуры сталей 20, 45 и 0Н9 увеличивается, коэффициент  $m$  гомогенности Вейбулла уменьшается, причем в нагруженном состоянии его значение меньше, чем в разгруженном, при одном и том же уровне деформации. С помощью коэффициента  $m$  можно также оценить склонность исследуемых сталей к накоплению повреждений. Стали можно расположить в такой последовательности: 20, 45 и 0Н9.

Исследования влияния двух и более полных промежуточных разгрузок на повреждаемость сталей 20 и 45 показывают, что они слабо влияют на изменение твердости в области развитых пластических деформаций. Разгрузки при невысоких уровнях деформаций (до  $\varepsilon = 7\%$ ), судя по сходимости кривых  $m$  для материала в нагруженном и разгруженном состояниях, приводят к увеличению повреждаемости материала, в то время как при повышенных уровнях деформаций ( $\varepsilon > 10\%$ ) они не оказывают на нее заметного

влияния. С увеличением количества разгрузок происходит некоторый рост накапливаемых повреждений. Для стали 0Н9 разгрузки и их количество практически не влияют на предельный уровень несплошности материала в нагруженном состоянии, тогда как в разгруженном состоянии с увеличением количества промежуточных разгрузок все в большей мере проявляются скрытые несплошности. Таким образом, полные разгрузки оказывают наибольшее влияние на процесс накопления повреждений в материалах, имеющих способность к упрочнению.

Характер изменения повреждаемости исследуемых сталей в результате полных промежуточных разгрузок показан на рис. 4 и 5 в виде гистограмм показателей несплошности материала  $k_1$  и твердости  $k_2$ . С уменьшением коэффициента  $k_1$  повреждаемость сталей увеличивается. В то же время проведение подобной оценки по абсолютным значениям твердости затруднено из-за их неоднозначности.

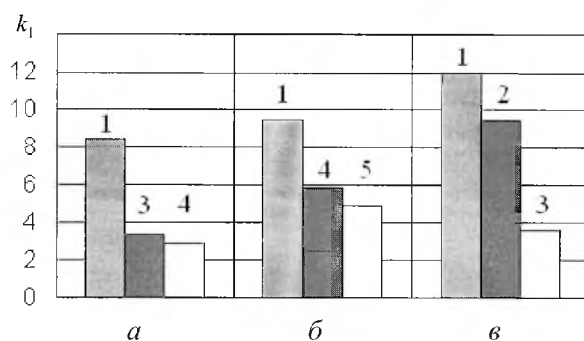


Рис. 4. Гистограммы зависимостей показателя несплошности материала  $k_1$  от вида испытаний для сталей 20 (а), 45 (б) и 0Н9 (в): 1 – без разгрузок; 2, 3, 4, 5 – соответственно с одной, двумя, тремя и четырьмя разгрузками.

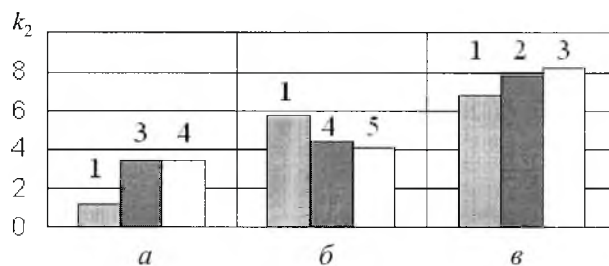


Рис. 5. Гистограммы зависимостей показателя твердости материала  $k_2$  от вида испытаний для сталей 20 (а), 45 (б), 0Н9 (в). (Обозначения те же, что и на рис. 4).

**Заключение.** Показано, что реальное состояние повреждаемости структуры поликристаллического материала проявляется под нагрузкой. Значения параметров рассеяния характеристик твердости, полученные для материала в нагруженном состоянии, меньше, чем в разгруженном, что свидетельствует о более высоком уровне несплошности материала в нагруженном состоянии. Поэтому оценку повреждаемости структуры материала элементов работающей конструкции более корректно проводить в нагруженном состоянии, отражающем реальное состояние структуры материала.

Установлено влияние полных разгрузок на процесс накопления повреждений в материале в зависимости от уровня деформаций, при которых эти разгрузки осуществляли: разгрузки при невысоких уровнях деформаций способствуют увеличению повреждаемости структуры материала, в то время как при повышенных уровнях деформаций они не оказывают заметного влияния. С увеличением числа полных промежуточных разгрузок при повторно-статическом нагружении ускоряется процесс накопления повреждений в исследуемых сталях.

### Резюме

Досліджено вплив напруженого стану матеріалу на оцінку пошкодження його структури під час експлуатації за параметрами розсіювання характеристик твердості. Проаналізовано вплив повних розвантажень на процес накопичення пошкоджень у матеріалі.

1. *Статическая прочность и механика разрушения стали: Сб. науч. трудов / Пер. с нем. под ред. В. Даля, В. Антона. – М.: Металлургия, 1986. – 566 с.*
2. *Гогоберидзе Д. Б. Твердость и методы измерения. – М.; Л.: Машгиз, 1952. – 319 с.*
3. *Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л., Недосека С. А. Контроль текущего состояния металла труб действующих газопроводов. Метод исследования и результаты // Пробл. прочности. – 2003. – № 2. – С. 29 – 36.*
4. *Зубчанинов В. Г., Гараников В. В. Влияние разгрузки материала на ползучесть сплавов 01570 и АМг6 // Там же. – 1990. – № 9. – С. 33 – 34.*
5. *Жуков А. М. Поведение металлов при разгрузке и повторной нагрузке // Инж. журнал. – 1961. – I, № 5. – С. 124 – 128.*
6. *Лебедев А. О., Музыка М. Р. Технічна діагностика стану матеріалу методом ЛМ-твердості // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 97 – 101.*
7. *Патент № 52107А, МКИ 7G 01 N 3 / 00, G01 N 3 / 40. Україна. Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання, “ЛМ-метод твердості” / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, Н. Л. Волчек. – Чинний з 15.01.2003. Бюл. № 1.*
8. *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.*
9. *ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Изд-во стандартов. – 1990.*

Поступила 17. 03. 2007