

## Влияние вида нагружения на процесс накопления повреждений в материале

Н. Р. Музыка, В. П. Швец

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

*Приведены результаты экспериментального исследования процесса накопления повреждений в различных материалах в условиях одноосных растяжения и сжатия, а также кручения. Показано, что в зависимости от вида нагружения материала порядок расположения кривых твердости отличается от такового кривых поврежденности. Сжимающие напряжения замедляют кинетику развития повреждаемости материала, а касательные при чистом сдвиге приводят к более интенсивному накоплению повреждений в материале.*

**Ключевые слова:** вид нагружения, твердость, коэффициент гомогенности, накопление повреждений.

**Введение.** Среди факторов, влияющих на кинетику и интенсивность накопления повреждений в процессе статического нагружения за пределами упругости, наиболее значимым является вид нагружения материала [1, 2]. Один и тот же материал может проявлять различные механические свойства при разных видах нагружения, что связано с большим многообразием механизмов зарождения и роста пор. Известные концепции Давиденкова, Фридмана и других о двух видах разрушения, а также параметры жесткости  $\sigma_{cp}/\sigma_i$ , где  $\sigma_{cp}$  – среднее напряжение;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений, и  $\tau_{max}/\sigma_{max}$ , характеризующие различные напряженное состояние и условия накопления повреждений в материале [3, 4 и др.], не дают понять, какому механическому параметру, который можно определить из эксперимента, отвечает степень поврежденности материала в процессе эксплуатации изделия.

Известные в настоящее время экспериментальные данные не позволяют достоверно описать процесс накопления рассеянных повреждений при деформировании материалов разных классов при различных видах нагружения [5]. Это обусловлено рядом причин, среди которых, прежде всего, следует выделить различные механизмы накопления повреждений в реальных конструкционных материалах в зависимости от вида напряженного состояния и исходной структуры, а также недостаточное количество экспериментальных данных. Однако способность к накоплению повреждений при эксплуатации изделия является одним из показателей надежности работы материала. В этой связи представляет интерес выяснить влияние вида нагружения на развитие процесса накопления повреждений при пластическом деформировании металлических материалов.

**Методика и результаты испытаний.** Изменение механических свойств металлов и сплавов, обусловленное накоплением повреждений, зависит от вида кристаллической решетки и несовершенства ее строения, размера зерен, включений атомов легирующих элементов, фазового состава. На их прочность и пластичность особое влияние оказывают действующие в кристаллической решетке система скольжения, количество и распределение примесей, упорядоченность дислокационной структуры.

Объектом исследования служили материалы различного класса: стали марок 45 и 20К с кристаллической решеткой в виде объемно-центрированного куба (ОЦК), сталь 12Х18Н10Т с ферритно-аустенитной структурой кристаллической решетки, металлы с решеткой в виде гранецентрированного куба (ГЦК) – алюминиевые

сплавы Д16Т, АМг6, а также медь марки М1. Сплав Д16Т системы алюминий–медь–магний является термически упрочняющимся (закалка + искусственное старение), сплав АМг6 системы алюминий–магний – деформируемый и термически неупрочняющийся с повышенной прочностью и пониженной пластичностью, медь М1 – бескислородная медь с низким содержанием примесей (99,90% Cu).

Из указанных материалов изготавливали трубчатые образцы с наружным диаметром 28 мм, длиной рабочей части 70 мм и толщиной стенки 1 мм. Образцы подвергали одноосным растяжению, сжатию, а также кручению по стандартным методам [6, 7]. Для измерения осевой деформации при растяжении и сжатии использовали П-образные тензометры, при кручении – тензометрический датчик угла закручивания.

Как известно [8], одним из важных показателей изменения физико-механических свойств металла, подвергнутого пластическому формоизменению в холодном состоянии, является твердость. Однако, несмотря на некоторую неопределенность физической природы твердости, она широко используется для оценки механических свойств благодаря простоте измерения и корреляции с пределами текучести и прочности [9–11].

При всех видах испытаний образцы подвергали повторно-статическому деформированию до одинаковых значений интенсивности пластической деформации  $\varepsilon_i = 0,4; 0,6$  и 2%. При каждом уровне деформации измеряли твердость материала в рабочей части образца по глубине вдавливания индентора на приборе Computest [12] при одинаковых уровнях пластической деформации как в разгруженном состоянии, так и под нагрузкой. Это дало возможность оценить реальное состояние поврежденности материала. Развитая боковая поверхность испытуемых образцов и выбранная толщина стенки позволили в процессе испытаний проводить многократные измерения твердости, при этом соблюдались требования стандарта на метод измерения твердости по Роквеллу [13].

Однако использовать измеренные абсолютные значения твердости для оценки влияния вида нагружения на повреждаемость материала затруднительно из-за слабой чувствительности метода твердости ко многим видам трансформации структуры, что приводит к изменению степени его поврежденности [14]. Как показали исследования, выполненные в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, более представительными в отношении корреляции с состоянием структуры являются не абсолютные значения твердости материала, а некоторые их производные, в частности рассеяние результатов измерений, выполненных одинаковыми приборами на одинаковых образцах в идентичных условиях. В этой связи влияние вида нагружения на повреждаемость материалов оценивали с помощью метода ЛМ-твердости, описывающего степень рассеяния характеристик исследуемого свойства [15]. Согласно методу такая оценка проводилась по статистическому критерию – коэффициенту гомогенности  $m$ , который определялся по результатам 30 измерений твердости. Большим значениям коэффициента гомогенности  $m$  соответствует низкий уровень рассеяния характеристик твердости и, следовательно, лучшая организация структуры (малая степень поврежденности), меньшим значениям  $m$ , наоборот.

Поскольку кинетика структурных трансформаций зависит от множества факторов, в том числе от вида напряженного состояния, это предопределяет необходимость перехода к обобщенным деформациям.

На рис. 1–4 приведены зависимости твердости  $HRB$  и коэффициента гомогенности  $m$  от интенсивности деформации  $\varepsilon_i$  при разных видах нагружения образца.

Качественно подобные результаты, свидетельствующие о высокой чувствительности метода ЛМ-твердости к изменению вида приложения нагрузки, получены

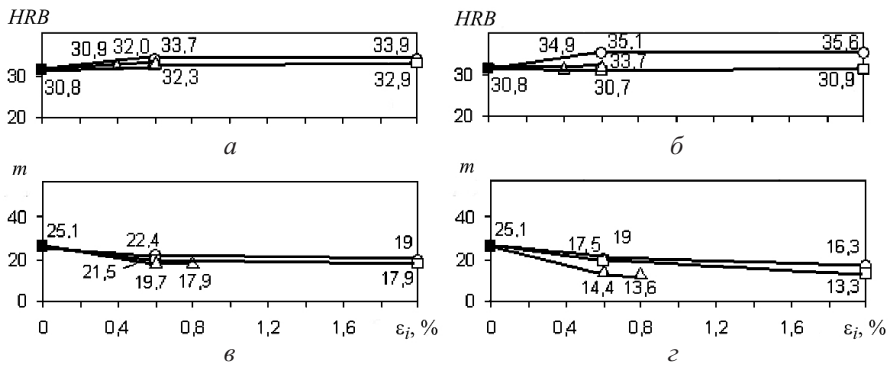


Рис. 1. Зависимость твердости  $HRB$  ( $a, б$ ) и коэффициента гомогенности  $m$  ( $в, г$ ) от интенсивности деформации  $\epsilon_i$  при разных видах нагружения образца меди М1. (Здесь и на рис. 2–4:  $a, в$  – без нагрузки;  $б, г$  – под нагрузкой (○ – сжатие, □ – растяжение, △ – кручение).)

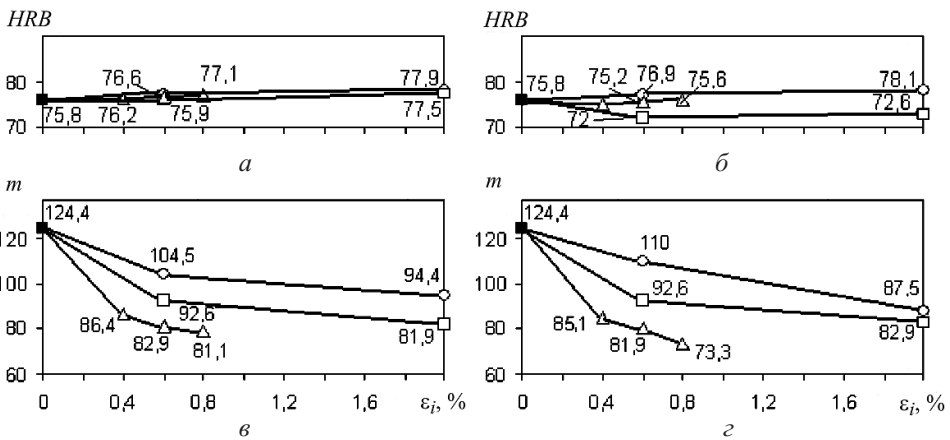


Рис. 2. Зависимость твердости  $HRB$  ( $a, б$ ) и коэффициента гомогенности  $m$  ( $в, г$ ) от интенсивности деформации  $\epsilon_i$  при разных видах нагружения образца сплава Д16Т.

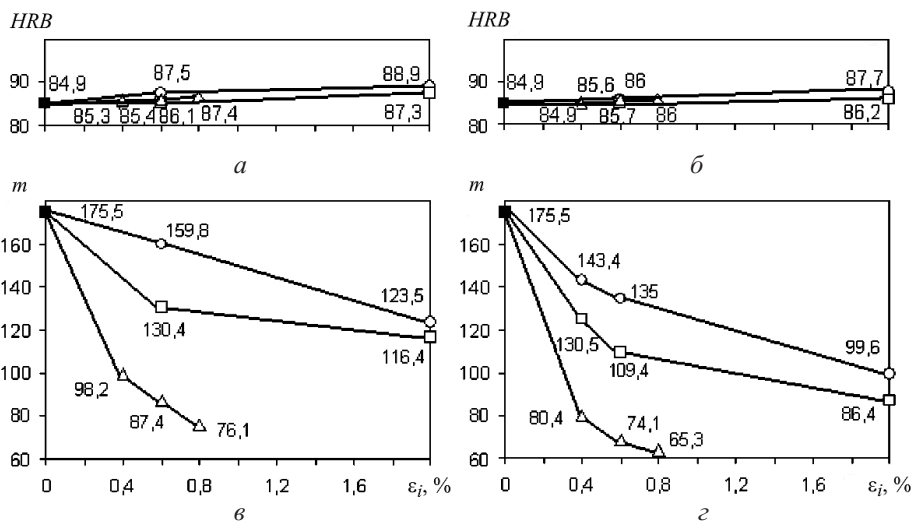


Рис. 3. Зависимость твердости  $HRB$  ( $a, б$ ) и коэффициента гомогенности  $m$  ( $в, г$ ) от интенсивности деформации  $\epsilon_i$  при разных видах нагружения образца стали 45.

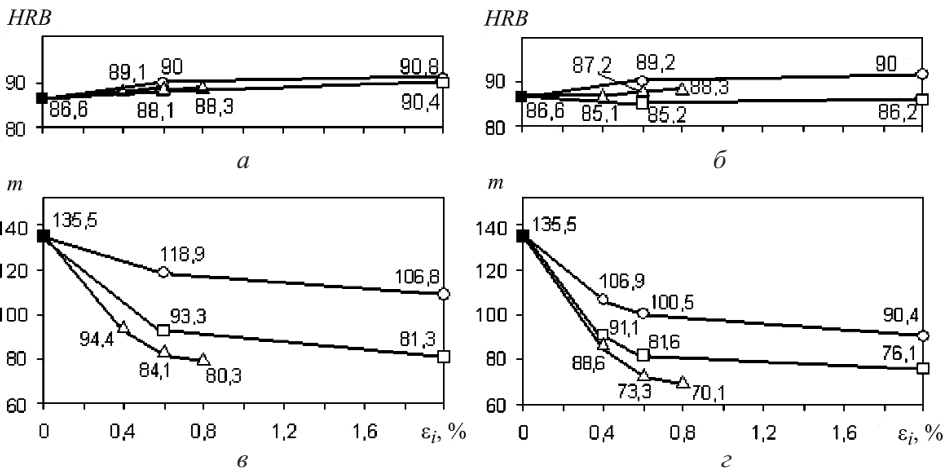


Рис. 4. Зависимость твердости *HRB* (а, б) и коэффициента гомогенности *m* (в, г) от интенсивности деформации  $\epsilon_i$  при разных видах нагружения образца стали 12X18H10T.

также для стали 20К (аналогично для стали для 45) и алюминиевого сплава АМгб (аналогично для сплава Д16Т).

Видно, что в процессе деформирования образцов при реализованных видах нагружения твердость изменяется незначительно, тогда как поврежденность структуры увеличивается, на что указывает уменьшение коэффициентов гомогенности Вейбулла *m*, описывающих трансформацию структуры материала по рассеянию характеристик твердости [15].

Анализ приведенных зависимостей показывает, что при всех реализуемых видах нагружения более высокие уровни деградации структуры материала и интенсивности изменения параметра *m* соответствуют состоянию материала под нагрузкой, при этом в большей мере проявляется и влияние схемы нагружения.

Анализируя влияние вида нагружения на изменение значений твердости в процессе пластического деформирования, можно заключить, что для всех исследуемых материалов при одном и том же уровне интенсивности деформации наибольшие значения твердости отмечаются при сжатии, наименьшие – при растяжении, а промежуточные – при кручении.

Рассматриваемые материалы можно отнести к нестабильным при пластической деформации. Для них кривые деформирования, а следовательно, и твердости из-за корреляции между твердостью и механическими характеристиками материала при разных схемах приложения нагрузки могут существенно различаться вследствие разной кинетики развития в нагруженном материале одновременно протекающих процессов перемещения зерен и термоактивированных процессов накопления несплошностей (субмикрo- и микротрещин, пор) [16].

Указанные выше зависимости соответствуют классификации схем напряженного состояния по коэффициенту “мягкости”  $\alpha$ , который определяет условия для развития пластической деформации:  $\alpha = \tau_{\max} / \sigma_{\max}$ , где  $\tau_{\max} = (\sigma_i - \sigma_3) / 2$  – максимальное касательное напряжение;  $\sigma_{\max} = \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)$  – наибольшее приведенное главное нормальное напряжение [3]. Принимая для исследуемых материалов в упругой области среднее значение коэффициента поперечной деформации  $\mu \cong 0,25$ , параметр  $\alpha$  применительно к испытаниям на одноосное растяжение будет ( $\sigma_1 = \sigma$ ,  $\sigma_2 = 0$ ,  $\sigma_3 = 0$ )  $\alpha_p = 0,5$ , на кручение ( $\sigma_1 = \sigma$ ,  $\sigma_2 = 0$ ,  $\sigma_3 = -\sigma$ ) –  $\alpha_{кр} = 0,8$  и на одноосное сжатие ( $\sigma_1 = 0$ ,  $\sigma_2 = 0$ ,  $\sigma_3 = -\sigma$ ) –  $\alpha_{сж} = 2,0$ . В условиях развитой пластичности при принятом среднем значении  $\mu \cong 0,5$  соответственно имеем  $\alpha_p = 0,5$ ,  $\alpha_{кр} = 0,7$ ,

$\alpha_{сж} = 1,0$ . Это отвечает характеру изменения значений твердости при изменении вида нагружения образца (рис. 1–4).

Однако порядок расположения кривых меняется при использовании для оценки поврежденности структуры материала структурно-чувствительного параметра  $m$ . При одном и том же уровне интенсивности деформации наибольшее значение интенсивности накопления повреждений в оценке параметром  $m$  наблюдается при кручении, наименьшее – при сжатии, промежуточное – при растяжении. Поэтому параметр мягкости  $\alpha$  не может рассматриваться как некоторая общая закономерность при определении кинетики накопления повреждений в материале.

Известно, что пластическая деформация, обусловленная касательными напряжениями, способствует разрыхлению материала и разрыву, а нарушение его сплошности происходит под действием нормальных растягивающих напряжений [4].

Полученные результаты оценки повреждаемости материалов показывают, что для широко используемых конструкционных сталей и сплавов касательные напряжения являются причиной менее интенсивного накопления повреждений при малых уровнях пластической деформации, чем при действии нормальных напряжений. Наибольшую повреждаемость материалов при чистом кручении можно объяснить с помощью физически обоснованного механизма деформирования, согласно которому разрыхление обусловлено сдвиговыми деформациями в плоскостях, близких к плоскости действия максимального касательного напряжения [17]. Считается, что при скольжении материал разрыхляется. Это проявляется в наблюдаемом при испытаниях на кручение трубчатых тонкостенных образцов их существенном удлинении. Компоненты деформации, обусловленные разрыхлением, составляют деформацию разрыхления. Таким образом, полная деформация материала представляется в виде суммы трех слагаемых: упругой, чисто пластической и разрыхления. В зависимости от вида нагружения и природы материала вклад каждой из трех составляющих может различаться, в частности для рассматриваемых материалов не только упругая, но и деформация разрыхления становятся соизмеримы с пластической деформацией.

Кривые, характеризующие изменение коэффициента  $m$  в зависимости от интенсивности деформации (рис. 1, в, г), свидетельствуют о способности материала к накоплению повреждений при разных схемах приложения нагрузки. Различие в ходе кривых, характеризующих изменение твердости и поврежденности структуры, можно объяснить чувствительностью твердости к упрочнению материала, уровень и характер которого зависят от схемы нагружения, т.е. по твердости можно судить о перестройке структуры под действием нагрузки, заключающейся в изменении формы зерен, их ориентации относительно оси приложения нагрузки, дроблении и др. Однако, как отмечалось выше, твердость малочувствительна к поврежденности структуры материала вследствие накопления рассеянных повреждений, насыщения структуры микротрещинами, порами и др.

Анализируя порядок и ход кривых поврежденности материала по изменению параметра гомогенности  $m$ , можно заключить, что напряженность материала влияет на уровень накопления повреждений, но не изменяет относительное расположение кривых для разных видов нагружения.

В условиях растяжения и сжатия для сплавов АМг6, Д16Т и меди М1 при уровне деформации, начиная с  $\varepsilon_1 = 1\%$  и больше, а для остальных исследованных материалов при  $\varepsilon_2 = 2\%$ , поврежденность достигает некоторого насыщения, при котором наступает временное квазиравновесное структурное состояние материала, а образование новых пор компенсируется “залечиванием” ранее образовавшихся дефектов [5].

Из диаграмм, приведенных на рис. 1–4, следует, что наблюдаемое различие в расположении кривых для разгруженных состояний при растяжении и сжатии отмечается также для металлокерамических материалов в работе [18], в которой показано,

что в условиях одноосного растяжения процесс накопления повреждений протекает более интенсивно, чем при сжатии.

**Заключение.** На основании результатов экспериментальных исследований по оценке влияния схемы нагружения на процесс накопления повреждений в различных материалах показано, что при одном и том же уровне интенсивности деформации наибольшее значение интенсивности накопления повреждений в оценке параметром  $m$  имеет место при кручении, наименьшее – при сжатии, промежуточное – при растяжении.

Порядок расположения кривых твердости отличается от порядка расположения кривых поврежденности: при одном и том же уровне интенсивности деформации наибольшее значение твердости отмечается при сжатии, наименьшее – при растяжении, промежуточное – при кручении.

Сжимающие напряжения по сравнению с растягивающими в большей мере способствуют проявлению пластичности, что замедляет кинетику развития повреждаемости материала, касательные напряжения при чистом сдвиге приводят к более интенсивному накоплению повреждений в материале.

## Резюме

Наведено результати експериментального дослідження процесу накопичення пошкоджень у різних матеріалах в умовах одновісних розтягу і стиску та кручення. Показано, що в залежності від виду навантаження матеріалу порядок розташування кривих твердості відрізняється від порядку розташування кривих пошкоджуваності. Стискальні напруження уповільнюють кінетику розвитку пошкоджуваності матеріалу, а дотичні при чистому зсуві призводять до більш інтенсивного накопичення пошкоджень у матеріалі.

1. Богатов А. А., Мижирицкий О. И., Смирнов С. В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.
2. Worswick M. J. and Pick R. J. Void growth and constitutive softening in a periodically voided solid // J. Mech. Phys. Solids. – 1990. – 38. – P. 601 – 625.
3. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. В 2 ч. Ч. 1: Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.
4. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наук. думка, 1976. – 415 с.
5. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2004. – 133 с.
6. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 01.01.86.
7. ГОСТ 3565-80. Металлы. Метод испытания на кручение. – Введ. 01.01.81.
8. Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
9. Матюнин В. М. Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 216 с.
10. Бакиров М. Б., Потапов В. В. Феноменологическая методика определения механических свойств корпусных сталей ВВЭР по диаграмме вдавливания шарового индентора // Завод. лаб. – 2000. – 66, № 12. – С. 35 – 44.
11. РД ЭО 0027-94. Инструкция по определению характеристик механических свойств металла оборудования атомных электростанций безобразцовыми методами по характеристикам твердости. – М.: Концерн Росэнергоатом, 1994. – 68 с.

12. *Computest SC* – Ernst Digital Portable Hardness Tester. – Lamone, Switzerland.
13. *ГОСТ 9013-59*. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. – Введ. 01.01.69.
14. *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.
15. *Пат. 52107А Україна*, МКИ 7 G01N 3/00, G01N 3/40. 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.
16. *Петров М. Г., Равикович А. И.* О деформировании и разрушении алюминиевых сплавов с позиции кинетической концепции прочности // Прикл. механика и техн. физика. – 2004. – **45**, № 1. – С. 151 – 161.
17. *Леонов М. Я.* Прочность и устойчивость механических систем: актуальные задачи нелинейной механики. – Фрунзе: Илим, 1987. – 246 с.
18. *Романова В. А., Балахонов Р. Р.* Влияние формы включений и прочностных свойств интерфейсов на механизмы разрушения металлокерамического композита на мезоуровне // Физ. мезомеханика. – 2007. – **10**, № 6. – С. 77 – 88.

Поступила 17. 09. 2012