

## Развитие повреждений в сером чугуна при статическом деформировании

А. А. Лебедев, И. В. Маковецкий, В. П. Ламашевский, Н. Л. Волчек

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

*Рассмотрены результаты экспериментального исследования деградации структуры серого чугуна на разных этапах деформирования при статическом растяжении. Анализ процесса деформирования показал, что степень повреждаемости материала при нагружении может оцениваться как специальным деформационным параметром, так и рассеянием характеристик твердости или отношением дефекта модуля к текущему значению модуля упругости. Установлена корреляция между этими параметрами*

**Ключевые слова:** серый чугун, модуль упругости, дефект модуля, коэффициент Пуассона, коэффициент поперечной деформации, поврежденность, деградация структуры, рассеяние характеристик, твердость, коэффициент вариации, коэффициент гомогенности Вейбулла.

Среди конструкционных материалов, широко используемых в машиностроении, особое место занимают квазихрупкие материалы. Для многих из них характерны существенная макро- и микронеоднородность структуры и, как следствие, флуктуации механических свойств материала, возмущение полей напряжений, что предопределяет сильный масштабный эффект, разброс характеристик механических свойств, нелинейность соотношений между напряжениями и деформациями, наличие остаточных деформаций уже при незначительных напряжениях.

Типичные представители этой группы материалов – чугуны, в частности серые, у которых в большей или меньшей мере проявляются все перечисленные выше качества. Обзор соответствующих результатов изучения свойств этих материалов, в том числе в сопоставлении со свойствами углеродистых сталей, проведен в работах [1, 2]. Отмечалось, что у стали и чугуна из-за различного характера изменения соотношения работ, затрачиваемых в процессе деформирования на объемную деформацию и формоизменение, качественно по-разному изменяется коэффициент поперечной деформации. По мере развития пластических деформаций у стали этот коэффициент увеличивается, асимптотически приближаясь к своему предельному значению 0,5, при котором изменения объема не происходит. При деформировании чугунов растяжением коэффициент поперечной деформации существенно уменьшается, при деформировании сжатием – увеличивается.

Относительное изменение объема при деформировании будет

$$\theta = \theta_y + \theta_o, \quad (1)$$

где  $\theta$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_o$  – соответственно полная, упругая и остаточная объемные деформации. Остаточная объемная деформация в материале реализуется

только за счет необратимого роста пор (разрыхления материала), так как пластическое деформирование происходит без изменения объема.

Поэтому, если  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_y$  – полная и упругая деформации,  $\varepsilon_p$  – остаточная деформация разрыхления, а  $\mu$ ,  $\mu_y$ ,  $\mu_p$  – соответствующие коэффициенты поперечной деформации, то для одноосного нагружения на основании соотношения (1) получим

$$(1 - 2\mu)\varepsilon = (1 - 2\mu_y)\varepsilon_y + (1 - 2\mu_p)\varepsilon_p. \quad (2)$$

Деформация  $\varepsilon_y^p$  за счет упругого расширения пор (дефектов) является составляющей в общей деформации  $\varepsilon_y$ , которой ставится в соответствие коэффициент поперечной упругой деформации  $\mu_y$ , т.е. коэффициент Пуассона.

Можно высказать физически непротиворечивое предположение о том, что указанный необратимый рост пор происходит только в направлении приложенного усилия и поэтому не влияет на поперечную деформацию, т.е. можно принять  $\mu_p = 0$  и, следовательно,  $\theta_o = \varepsilon_p$ .

Достаточно высокая вероятность справедливости такого предположения убедительно подтверждается классическим примером деформирования пробкоподобных материалов, коэффициент поперечной деформации которых практически равен нулю.

На основании вышеизложенного из соотношения (2) для деформации разрыхления получаем

$$\varepsilon_p = (1 - 2\mu)\varepsilon - (1 - 2\mu_y)\varepsilon_y. \quad (3)$$

Отметим, что у пластичных материалов упругие деформации  $\varepsilon_y$  несоизмеримо малы по сравнению с полной деформацией. Поэтому пренебрежение вторым членом уравнения (3) позволяет получить предложенное и экспериментально обоснованное ранее [3] соотношение

$$\varepsilon_p = (1 - 2\mu)\varepsilon. \quad (4)$$

Ниже приведены результаты экспериментального исследования процесса разрыхления серого чугуна типа СЧ 15, микроструктура которого показана на рис. 1. Механические испытания проводили на машине кинематического типа при скорости деформирования  $\dot{\varepsilon} \approx 0,0025 \text{ с}^{-1}$ . Продольные и поперечные деформации в процессе испытаний измеряли электромеханическими тензодатчиками, после разгрузки – на инструментальном микроскопе по реперным точкам. База измерений продольной деформации составляла 40 мм.

Испытывали вырезанные из одной заготовки образцы двух типов (рис. 2): одно- и четырехступенчатые. По результатам испытания одноступенчатых образцов в условиях монотонного нагружения до разрушения строили диа-

грамму деформирования и зависимость коэффициента поперечной деформации от степени деформирования (рис. 3). Данные испытаний с периодической неполной разгрузкой использовали для определения модулей упругости чугуна при разных степенях деформирования (рис. 4) и соответствующих им упругих и остаточных деформаций.



Рис. 1. Микроструктура серого чугуна (×100).

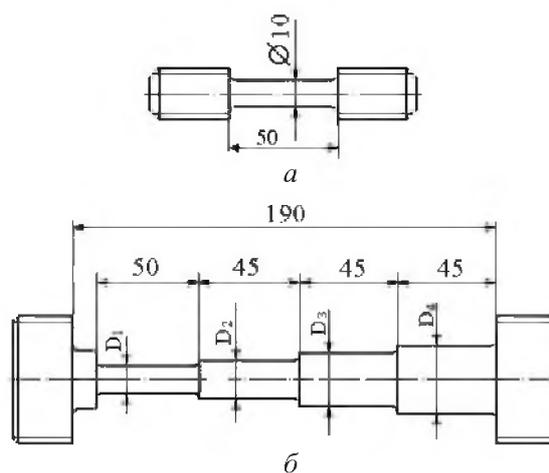


Рис. 2. Типы образцов для испытаний: *a* – одноступенчатый; *б* – четырехступенчатый ( $D_1 = 10$  мм;  $D_2 = 10,7$  мм;  $D_3 = 12,4$  мм;  $D_4 = 14,5$  мм).

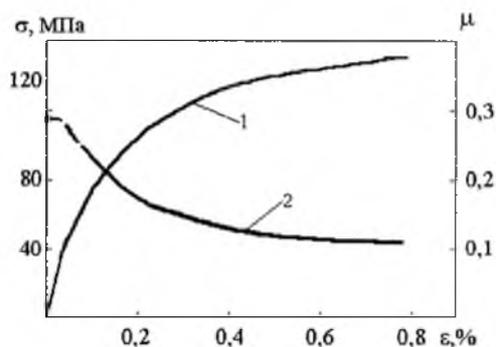


Рис. 3. Диаграмма деформирования (1) и кривая текущих значений коэффициента поперечной деформации (2) серого чугуна.

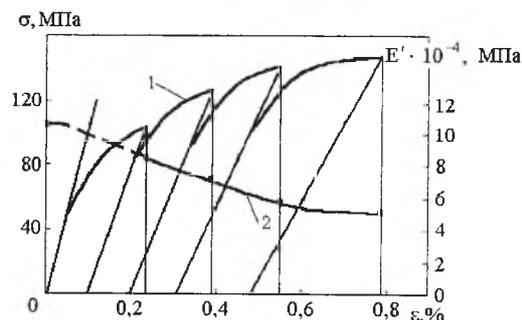


Рис. 4. Результаты испытания образцов чугуна с разгрузками: 1 – диаграмма  $\sigma(\epsilon)$ ; 2 – кривая текущих значений модуля упругости.

Методика испытаний четырехступенчатых образцов и обработка их результатов состояла в следующем. Образцы деформировали в том же режиме монотонного нагружения, что и одноступенчатые. В момент разрушения образца напряжения в металле первой ступени ( $d = 10$  мм) были равны пределу прочности материала, в металле остальных ступеней уровни действующих напряжений были обратно пропорциональны площадям их поперечного сечения. Соответствующие этим напряжениям модули упругости, полные и остаточные деформации легко определить по диаграмме  $\sigma(\epsilon)$ . Схематично эта процедура для  $i$ -й ступени показана на рис. 5.

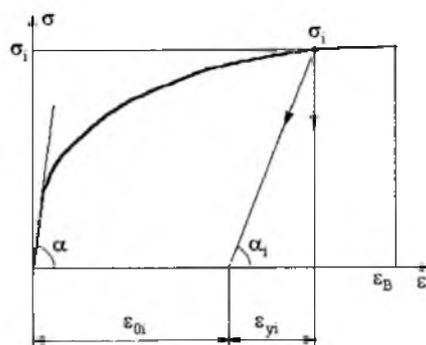


Рис. 5. Схема определения полных и остаточных деформаций  $i$ -й ступени.

Полученные экспериментальные данные и результаты их обработки приведены в табл. 1. Модуль упругости и коэффициент Пуассона чугуна в исходном состоянии составляли:  $E = 10,6 \cdot 10^4$  МПа,  $\mu = 0,28$ .

На рис. 6 представлены зависимости упругой  $\epsilon_y$  и остаточной  $\epsilon_o$  деформаций от общей деформации  $\epsilon$  в процессе монотонного статического нагружения. Как видно, зависимости линейны. При этом остаточные деформации начинают развиваться только при полных деформациях, достигающих примерно 0,05%, однако благодаря более высокому темпу их развития уже при общих деформациях около 0,33% они начинают опережать упругие и к моменту разрушения превышают их приблизительно в 1,5 раза, что составляет около 60% общей деформации.

Т а б л и ц а 1

## Результаты механических испытаний чугуна

| № образца | $\sigma$ , МПа | $\varepsilon$ , % | $\varepsilon_0$ , % | $\varepsilon_y$ , % | $E' \cdot 10^{-4}$ , МПа | $\Delta E' \cdot 10^{-4}$ , МПа | $\frac{\Delta E'}{E'}$ | $\mu'$ | $\varepsilon_p$ , % |
|-----------|----------------|-------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------------|------------------------|--------|---------------------|
| 1         | 75,4           | 0,110             | 0,280               | 0,082               | 9,2                      | 1,4                             | 0,15                   | 0,220  | 0,026               |
| 2         | 106,0          | 0,224             | 0,097               | 0,127               | 8,3                      | 2,3                             | 0,28                   | 0,170  | 0,092               |
| 3         | 117,0          | 0,220             | 0,091               | 0,143               | 8,2                      | 2,4                             | 0,29                   | 0,165  | 0,084               |
| 4         | 130,0          | 0,385             | 0,200               | 0,185               | 7,0                      | 3,6                             | 0,51                   | 0,135  | 0,200               |
| 5         | 140,0          | 0,548             | 0,312               | 0,237               | 5,9                      | 4,7                             | 0,79                   | 0,125  | 0,307               |
| 6         | 143,2          | 0,590             | 0,330               | 0,260               | 5,7                      | 4,9                             | 0,86                   | 0,120  | 0,334               |
| 7         | 149,0          | 0,780             | 0,460               | 0,320               | 5,0                      | 5,6                             | 1,12                   | 0,115  | 0,460               |
| 8         | 150,0          | 0,773             | 0,470               | 0,303               | 4,9                      | 5,7                             | 1,163                  | 0,115  | 0,462               |

Примечание. Образцы № 1, 3, 6, 7 – ступенчатые, № 2, 4, 5, 8 – гладкие.

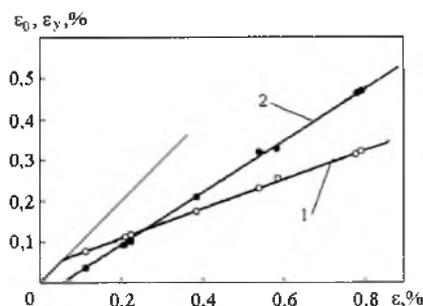


Рис. 6. Изменение уровней упругой (1) и остаточной (2) деформаций в процессе нагружения чугуна.

Данные о характере изменения коэффициента поперечной деформации в процессе деформирования позволяют по соотношению (3) определить степень разрыхления материала на разных стадиях нагружения. Из сопоставления полученных расчетных значений деформации разрыхления  $\varepsilon_p$  (табл. 1) с соответствующими значениями остаточной деформации  $\varepsilon_0$  следует, что они практически совпадают. Следовательно, процесс разрыхления исследуемого чугуна связан только с ростом пор и практически не сопровождается пластическим деформированием матрицы. Это также подтверждает положенную в основу уравнения (3) гипотезу о направленности развития пор (поры растут в направлении деформирования без заметного изменения их поперечного сечения), согласно которой  $\mu_p = \frac{\varepsilon_{\text{поп}}}{\varepsilon_{\text{прод}}} \rightarrow 0$ .

Представляет интерес также характер изменения модуля нормальной упругости  $E$  при деформировании, обусловленный ростом дефекта модуля:

$$\Delta E' = E - E',$$

где  $E, E'$  – исходное и текущие значения модуля упругости.

Как видно из рис. 7, в процессе деформирования дефект модуля возрастает с затухающей скоростью, а текущее значение модуля, естественно, уменьшается, при этом весьма показательным оказалось отношение

$$e_p = \frac{\Delta E'}{E'}$$

которое линейно связано с общей деформацией и с точностью до коэффициента равно  $\varepsilon_p$ , а именно:  $e_p = 2,5\varepsilon_p$ .

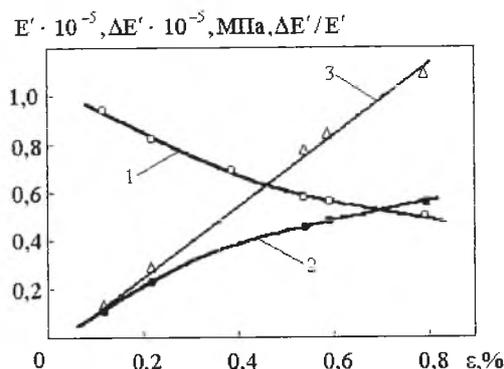


Рис. 7. Зависимость модуля нормальной упругости  $E'$  (1), дефекта модуля  $\Delta E'$  (2) и отношения  $\Delta E'/E'$  (3) для чугуна от деформации.

Полученная корреляция между параметрами  $\varepsilon_p$  и  $e_p$ , определяемыми на основе разных исходных предпосылок, свидетельствует о физической непротиворечивости последних и достоверности результатов проведенного анализа.

Рассматриваемая методика исследования кинетики накопления повреждений является достаточно трудоемкой, при этом требуется изготавливать специальный ступенчатый образец, размеры которого следует выбирать в зависимости от свойств материала (пластичность, степень деформационного упрочнения и др.), и проводить высокоточные измерения.

В этом отношении для оценки поврежденности материала в зависимости от наработки более эффективным может оказаться метод LM-твёрдости [4, 5], позволяющий оценить степень деградации материала на разных стадиях эксплуатации. Возможность использования указанного метода для оценки повреждений структуры серого чугуна при кратковременном статическом деформировании подтверждается следующими результатами.

После испытания ступенчатых образцов по описанной выше методике проводили измерения твердости металла на каждой ступени, т.е. деформированного с разной степенью. По результатам 25–30 измерений твердости деформированного металла определяли характеристики рассеяния их значений: коэффициент гомогенности по Вейбуллу  $m$  и коэффициент вариации  $v$ . Соответствующие данные, а также средние значения твердости по результатам измерений на каждой ступени представлены в табл. 2.

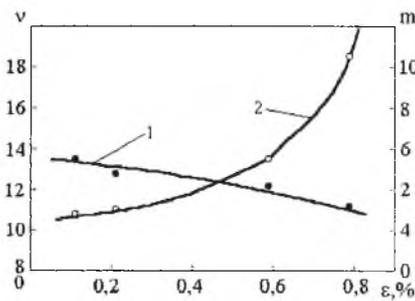
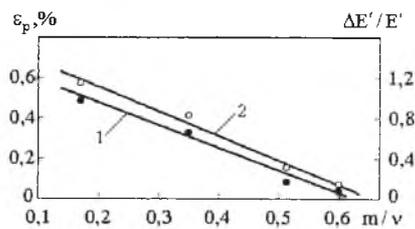
Т а б л и ц а 2

## Твердость и параметры рассеяния ее характеристик для чугуна

| № образца | $HV \times 10^{-2}$ , МПа | $\nu$ | $m$  | $m/\nu$ |
|-----------|---------------------------|-------|------|---------|
| 1         | 18,1                      | 8,95  | 5,36 | 0,60    |
| 3         | 18,2                      | 9,48  | 4,84 | 0,51    |
| 6         | 16,6                      | 11,65 | 4,13 | 0,35    |
| 7         | 17,6                      | 16,35 | 3,01 | 0,18    |

**Примечание.** Значения  $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_y$  для соответствующих образцов приведены в табл. 1.

На рис. 8 показаны зависимости коэффициентов  $m$  и  $\nu$  от величины полной остаточной деформации. Как видно, зависимости существенно нелинейны. При этом диапазон изменения коэффициента вариации  $\nu$  при росте общей деформации  $\varepsilon$  до предельной, соответствующей разрушению образца, более чем в три раза превышает диапазон изменения коэффициента гомогенности по Вейбуллу  $m$ . Это свидетельствует о большей инвариантности коэффициента  $\nu$  к росту повреждений. Интересно отметить, что отношение  $m/\nu$  имеет линейную корреляцию с параметрами повреждаемости  $\varepsilon_p$  и  $\Delta E'/E'$  (рис. 9).

Рис. 8. Характер изменения параметров  $m$  (1) и  $\nu$  (2) в процессе деформирования чугуна.Рис. 9. Зависимость параметров  $\varepsilon_p$  (1) и  $\Delta E'/E'$  (2) от отношения  $m/\nu$ .

Таким образом, степень необратимого деформирования чугуна (разрыхления), происходящего вследствие однонаправленного роста исходных и вновь зарождающихся пор, может быть оценена параметром  $\varepsilon_p$ , который определяется по уравнению (3). Разрыхление сопровождается снижением однородности материала, увеличением рассеяния характеристик механических

ких свойств и уменьшением модуля упругости. Для качественной и количественной оценки этих эффектов предложено использовать соответственно коэффициент вариации  $\nu$ , коэффициент гомогенности по Вейбуллу  $m$  и отношение дефекта модуля  $\Delta E'$  к текущему значению модуля  $E'$ . Полученные экспериментальные данные позволили установить характер изменения параметров  $\varepsilon_p$ ,  $\nu$ ,  $m$  и  $\Delta E'/E'$  с ростом деформации, а также корреляцию между ними.

## **Резюме**

Розглянуто результати експериментального дослідження деградації структури сірого чавуну на різних етапах деформування при статичному розтязі. Аналіз процесу деформування показав, що при навантажуванні ступінь пошкодженості матеріалу може оцінюватися як спеціальним деформаційним параметром, так і розсіюванням характеристик твердості або відношенням дефекту модуля до поточного значення модуля пружності. Установлено кореляцію між цими параметрами.

1. *Леонов М. Я.* Основы механики упругого тела. – Фрунзе: Изд-во АН Киргиз. ССР, 1963. – 328 с.
2. *Писаренко Г. С., Лебедев А. А.* Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наук. думка, 1976. – 216 с.
3. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Недосека С. А., Богинич И. О.* Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении // Пробл. прочности. – 1995. – № 7. – С. 31 – 40.
4. *Патент України № 52107А.* Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання. “Метод ЛМ-твердості” / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, Н. Л. Волчек. – Опубл. 15.01.03. Бюл. № 1.
5. *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.

Поступила 19. 05. 2003