УДК 539.3–034.1

МЕХАНИКА ДЕФОРМАЦИИ СЕРОГО ЧУГУНА ПРИ ПРОСТОМ НАГРУЖЕНИИ

Б.А. Рычков, И.В. Гончарова

По экспериментальным диаграммам осевого и окружного растяжений тонкостенных трубчатых образцов чугуна СЧ 15-32 установлены механические характеристики, отражающие его пластичность и свойство дилатансии.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние; упругость; пластичность; разрыхление; концепция скольжения; сопротивление сдвигу; пропорциональное нагружение.

MECHANICS DEFORMATION OF CAST IRON WITH A SIMPLE LOADING

B.A. Rychkov, I.V. Goncharova

According to experimental plots of the axial and circumferential tension walled tubular samples of SCh 15-32 cast iron the mechanical characteristics reflecting its plasticity and dilatancy property are established.

Key words: the intense deformed state; elasticity; plasticity; loosening; concept of sliding; resistance to shift; proportional loading.

1. Экспериментальные данные. Объектом исследования являлся серый чугун. В качестве образцов испытывались полые цилиндры, изготовленные из чугуна марки СЧ15-32[1]. Экспериментально определены главные осевая, окружная (на внешней и внутренней поверхностях), радиальная и объемная деформации при различных траекториях нагружения. При теоретическом отображении поведения материала в расчет принимались только исходные экспериментальные данные по осевой и окружной (“внешней”) деформации. Этих данных было достаточно для реализации поставленной задачи по моделированию неупругой деформации рассматриваемого материала.

2. Определение упругих постоянных. По начальному участку диаграммам деформации для осевого (рисунок 1) и окружного (рисунок 2) растяжений определялись упругие модули осевого и окружного растяжений (E_z, E_φ), а также соответствующие коэффициенты Пуассона:

$$E_z = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} = 52885 \text{ (МПа)}, \quad E_\varphi = \frac{\sigma_\varphi}{\varepsilon_\varphi} = 78947 \text{ (МПа)}.$$

$$\nu_{z\varphi} = \frac{|\varepsilon_\varphi|}{\varepsilon_z} = 0{,}1655\,, \quad \nu_{\varphi z} = \frac{|\varepsilon_z|}{\varepsilon_\varphi} = 0{,}2368\,.$$

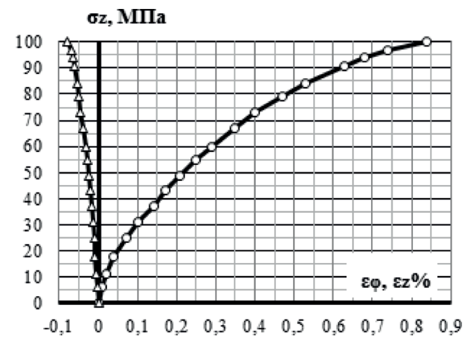

Рисунок 1 – Осевое растяжение (образец № 6)

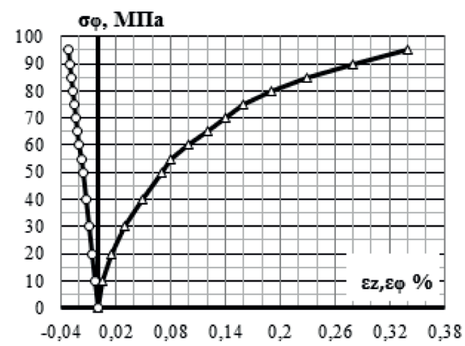

Рисунок 2 – Окружное растяжение (образец № 15)

По значениям найденных таким образом упругих констант видно, что предположение об исходной изотропии материала не выполняется

[1] Выражаем благодарность В.М. Жигалкину и О.М. Усольцевой за предоставленные первичные данные.

($E_z \uparrow E_\varphi$). Поэтому была сделана проверка условия ортотропии материала:

$$E_z \cdot \nu_{\varphi z} = E_\varphi \cdot \nu_{z\varphi} .$$

Это условие выполняется с точностью до 5 %. Так как упругие константы определяются примерно с такой же точностью, то можно считать, что данный материал является ортотропным.

Согласно обобщенному закону Гука в рассматриваемом случае напряженно-деформированного состояния при наличии ортотропной симметрии компоненты тензора упругих деформаций определяются по формулам:

$$e_z = \frac{1}{E_z} \cdot \sigma_z - \frac{\nu_{\varphi z}}{E_\varphi} \cdot \sigma_\varphi ; \; e_\varphi = \frac{1}{E_\varphi} \cdot \sigma_\varphi - \frac{\nu_{z\varphi}}{E_z} \cdot \sigma_z . \quad (1)$$

3. Моделирование неупругой деформации. Как показал эксперимент В.А. Паняева [1, 2], трубчатый образец такой же марки чугуна (но изотропного в исходном состоянии) при испытании на чистое кручение за пределом упругости удлинялся в осевом направлении. Эта осевая деформация (как показано в [3, 4]) является результатом разрыхления, которое подчиняется гипотезе В.В. Новожилова [5] (подтвержденной экспериментально [6]), согласно которой оно развивается одновременно и равномерно во всех направлениях.

Полные неупругие деформации в осевом и в окружном направлении определяются по формулам:

$$\Gamma_z = \varepsilon_z - e_z , \; \Gamma_\varphi = \varepsilon_\varphi - e_\varphi , \quad (2)$$

где $\varepsilon_z, \varepsilon_\varphi$ – суммарные (замеренные в опыте) деформации.

Деформация дилатансии принимается равной полусумме неупругих деформаций Γ_z и Γ_φ:

$$\Gamma_d = \frac{\Gamma_z + \Gamma_\varphi}{2} . \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что чисто пластическая деформация ($\Gamma_z^{пл}$, $\Gamma_\varphi^{пл}$) определяется по формулам:

$$\Gamma_z^{пл} = \Gamma_z - \Gamma_d, \Gamma_\varphi^{пл} = \Gamma_\varphi - \Gamma_d. \quad (4)$$

По исходным табличным данным образцов № 4, 6, 7, и 15 построены соответствующие диаграммы деформации $\varepsilon(\sigma)$, определены их (расчетные) упругие и неупругие деформации.

Используя полученные данные, определены их пределы текучести по допуску 0,025 % на остаточную максимальную главную деформацию: при осевом растяжении $\sigma_z^T = 26$ МПа; при окружном растяжении $\sigma_\varphi^T = 60$ МПа; при двухосном растяжении, когда $k = \frac{\sigma_z}{\sigma_\varphi} = 2$, $\sigma_z^T = 51$ МПа; при $k = 0,53$, $\sigma_\varphi^T = 57$ МПа.

По этим значениям пределов текучести построена поверхность текучести (рисунок 3), которая характеризует прочность материала в начальный период развития пластической деформации. На рисунке 3 видно, что у исследуемого чугуна двухосная прочность оказалась существенно выше одноосной в осевом направлении, когда реализуется состояние чистого сдвига при $\sigma_z = 2\sigma_\varphi$; такая ситуация характерна для подобных анизотропных материалов [7, 8].

Рисунок 3 – Поверхность текучести

По представленным выше формулам были определены компоненты неупругой деформации. Затем была проверена гипотеза, имеется ли единая зависимость для чисто пластической максимальной главной деформации в зависимости от разности между наибольшим главным напряжением и его значением на пределе упругости (который отождествляется с пределом текучести), т. е. зависимость в координатах $\Gamma_i^{пл} \sim \left(\sigma_i - \sigma_i^T\right)$. Здесь σ_i^T ($i = z, \varphi$) – главное напряжение, соответствующее развитию главной пластической деформации от скольжения по площадке Π_{ij} ($j = z, \varphi, r$) действия главного касательного напряжения $\tau_{ij} = 0,5\left(\sigma_i - \sigma_j\right)$, на которой превышается предел текучести σ_i^T при заданном напряженном состоянии.

На рисунке 4 приведены графики зависимости $\Gamma_i^{пл}\left(\sigma_i - \sigma_i^T\right)$ для четырех исходных случаев пропорционального нагружения. Для случая осевого растяжения такая зависимость построена в координатах $\Gamma_z^{пл} \sim \left(\sigma_z - \sigma_z^T\right)$; для случая окружного растяжения – в координатах $\Gamma_\varphi^{пл} \sim \left(\sigma_\varphi - \sigma_\varphi^T\right)$. В случае, когда $k = 2$, то $\sigma_1 = \sigma_z$ и, соответственно $\Gamma_1^{пл} = \Gamma_z^{пл}$; когда $k = 0,53$: $\sigma_1 = \sigma_\varphi$ и $\Gamma_1^{пл} = \Gamma_\varphi^{пл}$.

Полученные значения пластических деформаций $\Gamma_i^{пл}$ представлены в виде единого ряда как функция от $\left(\sigma_i - \sigma_i^T\right)$. Эта функция аппроксимирована с помощью линии тренда ($y = \Gamma_i^{пл}$, $x = \sigma_i - \sigma_i^T$), как показано на рисунке 4.

Согласно проведенной таким образом аппроксимации уравнение для чисто пластической деформации имеет вид:

$$\Gamma_i^{пл} = 2 \cdot 10^{-5} \left(\sigma_i - \sigma_i^T\right)^2 + 0,24 \cdot 10^{-3} \left(\sigma_i - \sigma_i^T\right). \quad (5)$$

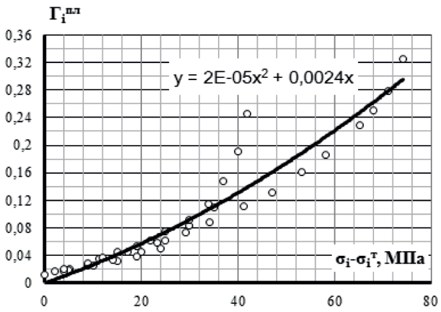

Рисунок 4 – Аппроксимация единой зависимости чисто пластической деформации

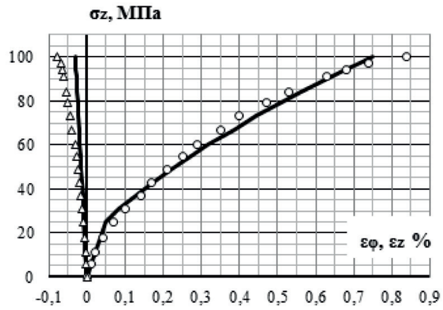

Рисунок 5 – Осевое растяжение (образец №6)

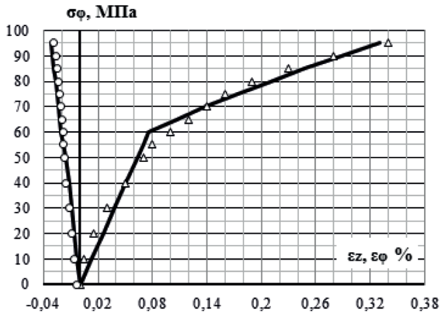

Рисунок 6 – Окружное растяжение (образец №15)

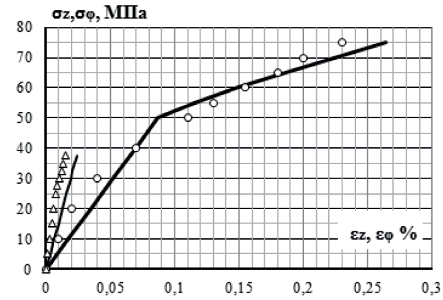

Рисунок 7 – Растяжение с внутренним давлением, $\sigma_z = 2 \cdot \sigma_\varphi$ (образец №7)

Если ввести коэффициент дилатансии λ как отношение деформации дилатансии Γ_d к компоненте чисто пластической главной деформации $\Gamma_i^{пл}$, то в общем случае он будет зависеть от вида напряженного состояния. Однако как показал проведенный анализ, в первом приближении для случаев одноосного и двухосного растяжений можно полагать $\lambda = 1$. Тогда, считая, что во всех случаях вида напряженного состояния происходит плоскопластическая деформация, имеем:

- при осевом растяжении:

$$\Gamma_z = 2\Gamma_z^{пл},\ \Gamma_\varphi = 0,\ \Gamma_d = \Gamma_z^{пл}, \tag{6}$$

- при окружном растяжении:

$$\Gamma_\varphi = 2\Gamma_\varphi^{пл},\ \Gamma_z = 0,\ \Gamma_d = \Gamma_\varphi^{пл}, \tag{7}$$

- при двухосном растяжении, $k = 0,53$:

$$\Gamma_z = 2\Gamma_z^{пл},\ \Gamma_\varphi = 0,\ \Gamma_d = \Gamma_z^{пл}, \tag{8}$$

- при двухосном растяжении, $k = 0,53$:

$$\Gamma_\varphi = 2\Gamma_\varphi^{пл},\ \Gamma_z = 0,\ \Gamma_d = \Gamma_\varphi^{пл}. \tag{9}$$

В результате при таком соотношении между деформацией дилатансии и чисто пластической деформацией, полная деформация ε_i ($i = z, \varphi$), расчитаная с использованием приведенных формул, достаточно хорошо отражает поведение испытанных образцов при всех четырех программах пропорционального нагружения. Экспериментальные (точки) и расчетные (сплошные линии) зависимости деформации от напряжения представлены на рисунках 5–8.

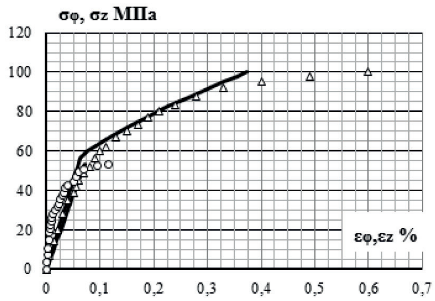

Рисунок 8 – Растяжение с внутренним давлением, $\sigma_z = 0,53 \cdot \sigma_\varphi$ (образец №4)

Литература

1. *Леонов М.Я., Паняев В.А., Русинко К.Н.* Зависимость между деформациями и напряжениями для полухрупких тел / М.Я. Леонов, В.А. Паняев, К.Н. Русинко // Инж. журнал. МТТ. 1967. № 6. С. 26–32.
2. *Паняев В.А.* О деформациях и разрушении полухрупких тел: дис. … канд. техн. наук / В.А. Паняев. Фрунзе, 1970.
3. *Рычков Б.А., Гончарова И.В.* Пластическая деформация и дилатансия серого чугуна / Б.А. Рычков, И.В. Гончарова // Вестник Нижего-

родского ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4 (4). С. 1743–1744.
4. *Рычков Б.А., Паняев В.А., Гончарова И.В.* Упругость и неупругость серого чугуна / Б.А. Рычков, В.А. Паняев, И.В. Гончарова // Вестник КРСУ. 2012. Т. 12. № 10. С. 70–75.
5. *Новожилов В.В.* О пластическом разрыхлении / В.В. Новожилов // ПММ. 1965. Т. 29. Вып. 4. С. 681–689.
6. *Рыбакина О.Г., Сидорин Я.С.* Экспериментальное исследование закономерностей пластического разрыхления металлов / О.Г. Рыбакина, Я.С. Сидорин // Инженерный журнал. МТТ. 1966. № 5. С. 103–111.
7. *Бабел Х., Эйтман Д., Макайвер Р.* Двухосное упрочнение анизотропных титановых сплавов / Х. Бабел, Д. Эйтман, Р. Макайвер // Теоретические основы инженерных расчетов. 1967. № 1. С. 15–23.
8. *Hill R.* Constitutive modeling of orthotropic plasticity in sheet metals / R. Hill // J. Mech. and Phys. Solids. 1990. V. 38. No. 3. P. 405–417.