УДК 539.374.1;539.42

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И ДИЛАТАНСИЯ СЕРОГО ЧУГУНА

Б.А. Рычков, И.В. Гончарова

Кыргызско-Российский славянский университет, Бишкек (Кыргызстан)

rychkovba@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

При чистом кручении тонкостенных трубок чугуна за пределом упругости возникает осевое удлинение образца, сопровождающееся остаточным увеличением его объема. Проявление дилатансии отмечается и при кручении с растяжением (сжатием) образцов. Сформулирована модель неупругой деформации такого полухрупкого материала, согласно которой в определенных случаях напряженно-деформированного состояния происходит плоскопластическая деформация, вызывающая (в соответствии с гипотезой В.В. Новожилова) всестороннее разрыхление (либо уплотнение) материала.

Ключевые слова: прочность, дилатансия, огибающая предельных кругов Мора, упругая и пластическая деформация.

У полухрупких [1] материалов (типа чугунов) пределы упругости и прочности при растяжении значительно меньше, чем при сжатии. Неупругая деформация у них включает в себя остаточное изменение объема материала. Не существует единой (не зависящей от вида напряженного состояния) кривой деформационного упрочнения в каких-либо общепринятых обобщенных координатах.

В настоящем исследовании на основе экспериментальных данных В.А. Паняева [2] раскрывается и моделируется механизм деформации чугуна СЧ 15-32.

При чистом кручении тонкостенного цилиндрического образца чугуна наблюдается его осевое удлинение. Учитывая большую разницу между пределами упругости на растяжение и сжатие, следует полагать, что при этом происходит плоскопластическая деформация в плоскости действия максимального касательного напряжения. Такая деформация может сопровождаться (в соответствии с гипотезой В.В. Новожилова) всесторонним разрыхлением материала. Действительно, полусумма экспериментально замеренных значений максимальной и минимальной главных деформаций за вычетом их упругих составляющих отлична от нуля и доставляет таким образом компоненту деформации разрыхления (Γ_p). Последняя почти точно равна зафиксированной в опыте осевой деформации ($\varepsilon_z > 0$), которая является результатом определяемого таким образом разрыхления.

Следовательно, полная деформация разделяется на упругую, чисто пластическую (не вызывающую изменения объема материала) и деформацию разрыхления. Правомочность такого разделения подтвердилась и при анализе результатов опытов на сжатие с кручением трубчатого образца. При отношении сжимающего главного напряжения (σ_3) к растягивающему главному напряжению (σ_1), равном 1.4, также отмечено осевое удлинение $\varepsilon_z > 0$. Складывая экспериментально замеренное значение деформации ε_z со значением упругой деформации e_z (вычисляемой по заданному напряжению $\sigma_z < 0$), получим, что их сумма ($\varepsilon_z + |e_z|$) опять (с той же точностью, как при кручении) равна расчетной деформации разрыхления Γ_p.

В опыте на сжатие с кручением трубки при $|\sigma_3|/\sigma_1 = 2$ изменение осевой деформации (ε_z) не было зафиксировано. Согласно предлагаемой модели деформации, в этом случае деформация ε_z практически оказалась равной деформации разрыхления.

Разрыхление возрастает при растяжении с кручением образцов при $\sigma_1/|\sigma_3| > 1$ (достигая максимального значения при одноосном растяжении), убывает по мере увеличения отношения $|\sigma_3|/\sigma_1$, и при некотором значении этого отношения сменяется уплотнением материала, которое становится максимальным при одноосном сжатии.

Если ввести коэффициент дилатансии (λ) как отношение деформации разрыхления Γ_p к компоненте чисто пластической главной деформации Γ_1, то в зависимости от коэффициента Лоде – Надаи для напряжений (μ_σ) он изменяется в рассмотренных случаях нагружения по линейному закону

$$\lambda = -0.5111\mu_\sigma + 0.3421,$$

причем λ не зависит от уровня напряженного состояния.

Так, например, при $|\sigma_3|/\sigma_1 = 4.9$ расчетное значение $\lambda = 0.04$, а при $|\sigma_3|/\sigma_1 = 9.8$ получено $\lambda = -0.06$. В этих случаях напряженного состояния наглядно подтверждается предположение о плоскопластической деформации: разница между значением максимальной главной деформации (Γ_1) и значением (по модулю) минимальной главной деформацией (Γ_3) составляет всего ±12%. Именно в силу такого механизма пластической деформации коэффициент дилатансии линейным образом зависит от коэффициента вида напряженного состояния. Это, в свою очередь, должно выполняться при инвариантной зависимости деформации максимального пластического сдвига ($\Gamma_{13} = \Gamma_1 - \Gamma_3$) от уровня максимального касательного напряжения (τ_{max}), превышающего его значение на пределе упругости (τ_{max}^T). Экспериментальным данным рассмотренного материала отвечает зависимость

$$\Gamma_{13} = k\left(\frac{\tau_{max}}{\tau_{max}^T} - 1\right)^\alpha \quad (k, \alpha = \text{const}),$$

где k и α – материальные параметры.

В расчетах предел текучести отождествлялся с пределом упругости. Значение предела текучести определялось из условия касания огибающей к соответствующим наибольшим кругам Мора. При этом, как и при рассмотрении горных пород [3], вид напряженного состояния характеризовался отношением максимального к минимальному главному напряжению ($c = \sigma_1/\sigma_3$). И так же, как и для горных пород, сжимающие напряжения считались положительными. При указанных условиях значение максимального напряжения ($\sigma_1 > 0$) определялось по следующей формуле:

$$\sigma_1 = \frac{c[1+(\sigma_c/\sigma_p)^2]}{2(1-c^2)(\sigma_c/|\sigma_p|)}\sigma_c + \\ + \frac{\sqrt{c^2[1-(\sigma_c/\sigma_p)^2]^2 + 4(\sigma_c/\sigma_p)^2}}{2(1-c^2)(\sigma_c/|\sigma_p|)}\sigma_c,$$

где σ_c, σ_p – соответственно пределы текучести при сжатии и растяжении.

Эта формула при вычислении предела текучести при чистом сдвиге (σ_1^c) преобразуется к виду:

$$\sigma_1^c = \frac{(\sigma_c/\sigma_p)^2}{1+(\sigma_c/\sigma_p)^2}|\sigma_p| \quad (\sigma_3^c = -\sigma_1^c).$$

Авторы выражают благодарность В.А. Паняеву за предоставленные первичные экспериментальные данные.

Список литературы

1. Леонов М.Я., Паняев В.А., Русинко К.Н. Зависимость между деформациями и напряжениями для полухрупких тел // Инж. журнал. МТТ. 1967. №6. С. 26–32.

2. Паняев В.А. О деформациях и разрушении полухрупких тел: Дисс. … канд. техн. наук. Фрунзе, 1970.

3. Жигалкин В.М. и др. О теоретическом и экспериментальном построении огибающей предельных кругов Мора // ФТПРПИ. 2010. №6. С. 25–36.

PLASTIC STRAIN AND DILATANCY OF GRAY CAST IRON

B.A. Rychkov, I.V. Goncharova

Axial elongation of cast iron thin-walled tubes occurs beyond the elastic limit at pure torsion and it is accompanied by a residual increase of its volume. Tension-torsion (tension-compression) is known to produce dilatancy. A model of inelastic deformation for such semi-brittle material is formulated. According to this model, plane-plastic strain is occurred in certain cases of the stress state, which (in accordance with the hypothesis of V.V. Novozhilov) causes overall loosening (or seal) of the material.

Keywords: strength, dilatancy, Mohr failure envelope, elastic and plastic deformation.