

# Экспериментальное определение и математическое описание поверхности разрушения графита при непропорциональном нагружении

Ивашков И.А., Мартыненко М.Е., Садаков О.С.

*Челябинский государственный технический университет*

В испытаниях трубчатых образцов при сложном напряженном состоянии проверялось существование поверхности квазистатического разрушения графита в пространстве деформаций. Сопоставлены поверхность разрушения при монотонном и при циклическом нагружении. С точностью до естественного разброса экспериментальных данных можно полагать, что такая поверхность существует. Кроме сдвига поверхности относительно начала координат вследствие различного сопротивления растяжению и сжатию, обнаружено ее некоторое отличие от сферической.

Исследования, выполненные в лаборатории кафедры СМ и ДПМ Челябинского государственного технического университета, посвящены экспериментальному изучению прочностных и деформационных свойств графитовых материалов, в частности, ядерного графита марки ГР-280. Они выполнялись на специально сконструированной установке, обеспечивающей нагружение образцов по двум независимым каналам - кручение и растяжение-сжатие. Нагружение крутящим моментом осуществляется программно управляемым приводом, включающим электродвигатель, реверсивный редуктор и силовой червячный редуктор. Таким образом, тип нагружения по каналу кручения является практически кинематическим. Продольное усилие в образце создается грузом, воздействующим на рычажный механизм, что обеспечивает силовой тип нагружения. Конструкция механизма такова, что независимо от угла поворота рычага, вызванного накоплением продольной деформации, усилие на образце остается постоянным. Измерение деформаций сдвига и удлинения выполняется деформометром с упругими элементами, на которые наклеены тензометры сопротивления. База измерения перемещений составляет 30 мм. В испытаниях применялись трубчатые образцы, продольная ось которых параллельна оси прессования. Наружный диаметр  $D=40$  мм, внутренний -  $d=30$  мм, рабочая длина образца составляет 80 мм.

## 1. Результаты испытаний графита ГР-280 при непропорциональном нагружении

Выполнены два типа испытаний. В испытаниях первого типа на основании ранее полученных данных о статической прочности графита при чистом сдвиге  $t_B$ , растяжении  $S_{вр}$  и сжатии  $S_{вс}$  задавали некоторую величину нормального напряжения (в долях от  $S_{вр}$  и  $S_{вс}$ ) и при его постоянном значении нагружали образец крутящим моментом до разрушения. В других опытах также при наличии продольного усилия задавали размах крутящего момента (в отнулевом цикле) и доводили образец до разрушения.

Во всех опытах регистрировали диаграммы деформирования в осях "продольная нагрузка - удлинение" и "крутящий момент - угол закручивания". Значения продольного усилия (в долях от предела прочности при сжатии) в первой серии опытов составили 0,2; 0,4; 0,6 и 0,8 от  $S_{вс}$ . Во второй серии к испытаниям при сжатии добавлены данные при растяжении на уровне 0,2 - 0,4 от  $S_{вр}$ . В связи с разбросом характеристик прочности каждый из опытов проводили на серии из трех образцов, предварительно отобранных из всей партии. Отбор выполняли по кажущейся плотности материала, определенной

взвешиванием образцов. Для испытаний принимались лишь те образцы, вес которых был не ниже некоторого минимального значения.

По результатам испытаний построены поверхности разрушения в пространстве напряжений и деформаций (рис. 1). Темными точками представлены данные при монотонном нагружении, светлыми - при циклическом нагружении крутящим моментом. Отображающие точки на представленных диаграммах образует явно выраженную границу, определяющую условия разрушения материала. Характерной особенностью границы является ее несимметричность относительно оси ординат, соответствующая разноспротивлению растяжению и сжатию. Предел прочности при сдвиге  $t_B$  при отсутствии сжимающих напряжений оказывается ниже, чем при их наличии. Максимальное сопротивление разрушению при сдвиге наблюдалось при величине сжимающих напряжений, составляющих 0,4...0.6 от  $S_{BC}$ . Напротив, наличие растягивающих напряжений приводит к существенному снижению  $t_B$ .

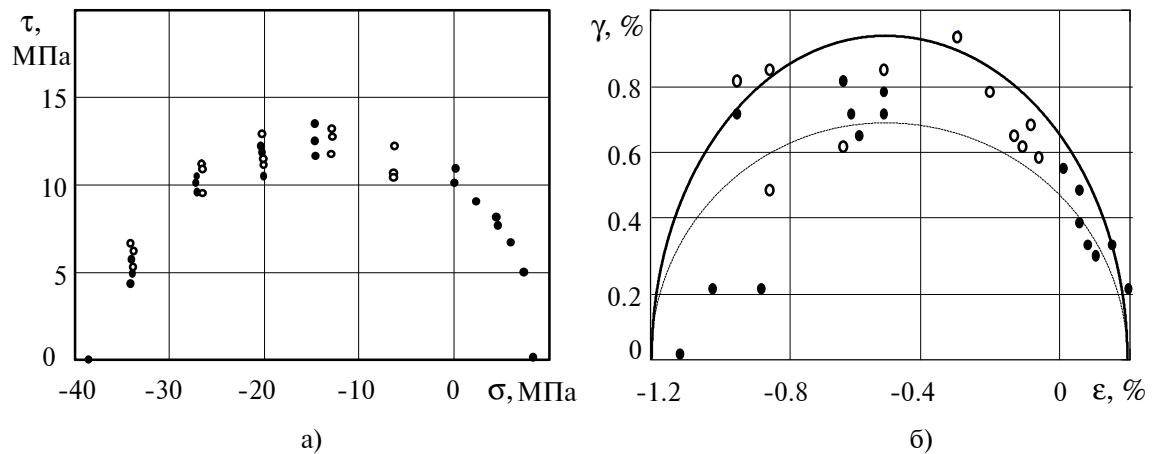


Рис. 1 Расположение опытных точек на плоскости  $S-t$  (а) и  $e-g$  (б)

## 2. Обработка результатов испытаний. Критерии разрушения

Для описания разрушения графита при однократном сложном нагружении авторы работ [1,2] предлагают использовать модифицированный критерий энергии деформации Элая:

$$S_{\text{экв}} = \sqrt{\bar{s}_1^2 + \bar{s}_2^2 + \bar{s}_3^2 + 2m(\bar{s}_1 \bar{s}_2 + \bar{s}_2 \bar{s}_3 + \bar{s}_3 \bar{s}_1)},$$

где  $s_j$  ( $j = 1,2,3$ ) - главные напряжения, (1)

$$\bar{s}_j = s_j \text{ если } s_j > 0 \text{ и } \bar{s}_j = s_j S_{\text{вр}}/S_{\text{вс}} \text{ если } s_j < 0;$$

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных при непропорциональном нагружении (рис 2) показывает существенное отклонение теории от эксперимента. Более адекватное соответствие демонстрирует критерий Кулона - Мора (прямая линия на рис. 2).

Обобщение критерия Колмогорова [3] на сложное напряженное состояние, модифицированного для хрупких материалов, имеет вид:

$$\frac{\epsilon_{iF}}{\epsilon_{iF}^p} = a \exp\left(b \frac{S_0}{S_i}\right) \tag{2}$$

где  $\epsilon_{iF}$  - интенсивность деформации в момент разрушения при рассматриваемом виде напряженного состояния,  $\epsilon_{i\Phi}$  - интенсивность деформации разрушения при линейном

напряженном состоянии (простое растяжение),  $\sigma_0$  - среднее напряжение,  $\sigma_i$  - интенсивность напряжений,  $a$ ,  $b$  - константы материала. Интенсивность напряжений и деформаций вычислялась по формулам:

$$s_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(s_1 - s_2)^2 + (s_2 - s_3)^2 + (s_3 - s_1)^2}, \quad (3)$$

$$e_i = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2}. \quad (4)$$

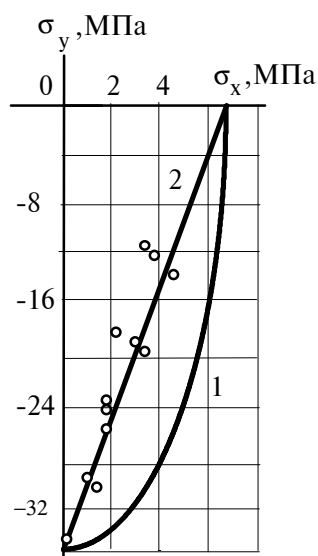


Рис. 2 Сопоставление данных эксперимента с критериями Элай (1) и Кулона-Мора (2)

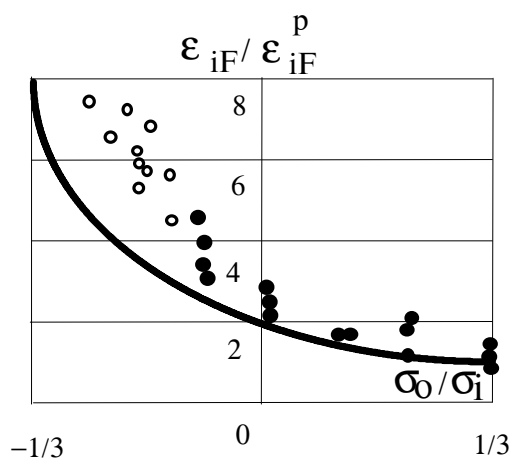


Рис. 3 Графическая интерпретация критерия Колмогорова

○ - однократное нагружение,  
● - циклическое нагружение

На кривую (рис. 3), соответствующую критерию (2), нанесены точки, характеризующие результаты проведенных испытаний. Как видим, удовлетворительное согласие теории и эксперимента наблюдается лишь при малых (меньших  $0.4\sigma_{BC}$ ) сжимающих напряжениях. При  $\sigma > 0.4\sigma_{BC}$  экспериментальные данные существенно отклоняются от теоретической кривой.

Представленные сопоставления показывают, что известные критерии разрушения не вполне адекватно описывают условия разрушения графита при непропорциональном нагружении. Объяснить это можно тем, что данные критерии выдвигались для описания разрушения малопластичных материалов в условиях пропорционального нагружения, а практически полное отсутствие экспериментальных данных по непропорциональному нагружению не позволило авторам проверить и модернизировать их для новых условий. Однако имеющийся опытный материал позволяет хотя бы формально предпринять попытку описания обсуждаемого явления. Примером тому может служить накопленный опыт в описании поведения пластичных материалов с позиций различного рода теорий пластического течения (т.н. инкрементальных теорий пластичности), оперирующих с понятием "поверхности пластичности". Простейшим видом такой поверхности является поверхность Мизеса, описывающая поведение изотропного материала при однократном нагружении; более сложными оказываются теории "трансляционного" типа, описывающие условия возникновения пластических деформаций при повторно-переменном нагружении, эффект Баушингера. В нашем случае имеет место ярко выраженная прочностная анизотропия графита (пределы прочности при растяжении и сжатии отличаются в 5-6 раз), и простейшим ответом могла бы быть деформация исходной сферы: увеличение ее радиуса при наличии сжимающих напряжений и

соответствующее уменьшение его при растяжении. Однако опыт показывает, что на самом деле это не так: при изменении знака нормальных напряжений существенно изменяется величина предела прочности при сдвиге - действие сжимающих напряжений на уровне 0.4...0.6 от предела прочности при сжатии вызывает сопротивление разрушению при сдвиге в 1.2...1.4 раза; напротив, приложение растягивающих нагрузок снижает его почти вдвое. Таким образом, имеет место не только деформация поверхности разрушения в связи с прочностной анизотропией, но и ее смещение в направлении сжатия.

С другой стороны, поверхность разрушения графита следует строить не в пространстве напряжений, а в пространстве деформаций: при циклическом мягком нагружении траектория напряжений замкнута (напряжения повторяются без разрушения), но вследствие циклической ползучести накапливается односторонняя деформация, траектория деформации не замкнута; в момент разрушения она "выходит" на некоторую поверхность, которая, повидимому, и представляет поверхность квазистатического разрушения.

Для изотропного материала поверхность текучести имеет вид  $\epsilon_i = R$ , где  $R$  - радиус поверхности текучести. При деформировании образцов в наших опытах замерялась продольная деформация  $e_z$  и сдвиговая  $\gamma$ . Если в первом приближении принять, что а) при одноосном растяжении две поперечные деформации одинаковы (как для изотропного тела), б) при растяжении со сдвигом это равенство сохраняется (как в случае справедливости постулата изотропии) и, наконец, в) что неупругая деформация относительно невелика, т.е. коэффициент поперечной деформации мало отличается от коэффициента Пуассона  $\mu$ , то средняя деформация может быть определена из выражения

$$e_o = (e_z - \mu e_z - \mu e_z) / 3 = \frac{1 - 2\mu}{3} e_z \quad (5)$$

и интенсивность деформаций - из выражения

$$\begin{aligned} e_i^2 &= 3e_{ij}e_{ij} = 3(e_z^2 + (e_z / 2)^2 + (e_z / 2)^2 + (g / 2)^2 + (g / 2)^2) = \\ &= \frac{9}{2}e_z^2 + \frac{3}{2}g^2 = \frac{9}{2}(e_z - \frac{1 - 2\mu}{3}e_z)^2 + \frac{3}{2}g^2 = \frac{1}{2}(2(1 + \mu)e_z)^2 + \frac{3}{2}g^2 \end{aligned} \quad (6)$$

или

$$e_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(2(1 + \mu)e_z)^2 + (\sqrt{3}g)^2} \quad (7)$$

Условие  $\epsilon_i = R$  определяет окружность в координатах  $2(1 + \mu)e_z - \sqrt{3}g$  радиусом  $R\sqrt{2}$  с центром в точке  $e_z = g = 0$ . Для учета различия в предельных значениях деформаций на растяжение и сжатие сместим эту поверхность в сторону сжатия; на плоскости  $e_z - g$  это определит поверхность

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(2(1 + \mu)(e_z + a))^2 + (\sqrt{3}g)^2} = R \quad (8)$$

где  $a$  - характеристика материала, которая определяет степень разносопротивляемости. Значения параметров  $a$  и  $R$  найдем, зная две точки поверхности разрушения  $e_z = e_{op}$  и  $e_z = -e_{oc}$  при  $g = 0$ . Подставив эти значения в (8), получим

$$e_z = \pm(R' - a), \quad R' = \frac{\sqrt{2}}{2(1 + \mu)} R \quad (9)$$

которые следует приравнять  $e_{op}$  и  $-e_{oc}$ . Отсюда

$$\begin{aligned} R' &= (e_{\sigma p} + e_{\sigma c}) / 2, \quad a = (e_{\sigma c} - e_{\sigma p}) / 2, \\ R &= \sqrt{2}(1+m)(e_{\sigma c} + e_{\sigma p}) / 2 \end{aligned} \quad (10)$$

(величины  $e_{\sigma p}$  и  $e_{\sigma c}$  считаются положительными).

Для проверки, выполняется ли условие прочности, можно ввести эквивалентную деформацию  $e_{экв}$  выражение для которой, базируясь на концепции смещенной поверхности разрушения (8), имеет вид:

$$\begin{aligned} e_{экв} &= \sqrt{Ae_z^2 + Bg^2} - Ce_z = R, \\ A &= 2\left(\frac{R^2}{R^2 - b^2} + \left(\frac{Rb}{R^2 - b^2}\right)^2(1+m)^2\right), \quad B = \frac{3}{2}\frac{R^2}{R^2 - b^2}, \\ C &= \frac{b}{R}\frac{R^2}{R^2 - b^2}\sqrt{2}(1+m), \\ R &= \sqrt{2}(1+m)(e_{\sigma c} + e_{\sigma p}) / 2, \quad b = \sqrt{2}(1+m)(e_{\sigma p} - e_{\sigma c}) / 2. \end{aligned} \quad (11)$$

Сопоставление расчета по формуле (11) с результатами эксперимента представлено на рис 1 сплошной линией. Видно, что положение опытных точек не вполне отвечает сфере (ошибка не в запас прочности), поэтому следует ввести некоторый корректирующий множитель  $|$  в выражение (11), заменив величину  $B$  на  $B' = | B$ . Штриховая линия на рис 1 построена для значения  $| = 0.7$ , что демонстрирует более адекватное соответствие эксперименту. Таким образом, к константам материала, характеризующим квазистатическое разрушение, кроме характеристик  $e_{\sigma p}$  и  $e_{\sigma c}$ , следует причислить константу  $|$ , характеризующую отклонение поверхности разрушения от круговой.

## Литература

1. Ely R.E. Strength of magnesium silicate and graphite under biaxial stresses// Ceramic Bulletin.- 1968.- Vol.47.-№ 5.- p.489- 492
2. Brocklehurst J. E. Fracture in polycrystalline graphite//Chemistry and Physics of Carbon.- 1977.- Vol. 13.- p. 146 - 279
3. Колмогоров В. Л. Напряжения. Деформации. Разрушение.- М. Металлургия, 1970.- 230 с