

Е. Е. Курчак

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНЫ ПЛАСТИЧНОСТИ У ФРОНТА ТРЕЩИНЫ НОРМАЛЬНОГО ОТРЫВА

*Институт механики им. С.П. Тимошенко НАНУ,  
ул. Нестерова, 3, 03057, Киев, Украина; e-mail: fract@inmech.kiev.ua*

**Abstract.** A distribution of the stress intensity near the front of a mode I crack in an elastic-plastic body is established. Using this distribution, the shape of plastic zone is estimated as well as its sizes in two mutually orthogonal directions are found.

**Key words:** elastic-plastic body, mode I crack, plastic zone, fracture process zone, stress intensity, hardness, experimental study.

### Введение.

Энергия, затрачиваемая на разрушение упругопластических тел с трещиной, почти полностью диссипируется в зоне пластичности, образующейся у фронта трещины [5]. Поэтому важно знать параметры зоны пластичности и деформации или напряжения в ее границах. Кроме того, знание параметров зоны пластичности необходимо для обоснования моделей трещины. Актуальной является также проверка решений краевых задач о состоянии предельного равновесия упругопластических тел с трещиной, для чего необходимы соответствующие данные. Вместе с тем, в источниках по механике разрушения содержится крайне мало данных, относящихся к зоне пластичности. Во многом это связано со значительными трудностями, возникающими при экспериментальном исследовании зоны пластичности.

К настоящему времени разработаны и получили широкое распространение методы определения характеристик разрушения различных тел с трещиной [16]. При экспериментальном исследовании зоны пластичности применяют, как правило, менее точные методы, а именно, методы травления [9, 10], фотоупругих покрытий [8], реплик [13] и сеток [15].

Изучение зоны пластичности с привлечением указанных методов требует сложного анализа результатов опытов. В самом деле, трудно разделить упругую и пластическую деформации. К тому же, указанные методы применимы исключительно для исследований на поверхности тел.

Представление о форме и размерах зоны пластичности можно получить, зная интенсивность напряжений в окрестности фронта трещины. Известен метод определения интенсивности напряжений по твердости [6]. Он основан на явлении изменения твердости тела при его пластическом деформировании. В этом методе предполагается, что зависимость между интенсивностью напряжений и твердостью не чувствительна к истории нагружения тела. В пользу этого предположения свидетельствуют результаты работы [7], согласно которым всестороннее сжатие оказывает слабое влияние на твердость.

Конечно, метод определения интенсивности напряжений по твердости сопряжен со всевозможными погрешностями. К их числу следует отнести, прежде всего, погрешность определения твердости. Обусловлена она, главным образом, наклепом поверхностного слоя, в связи с чем требуется полное его удаление. Вхождение инденто-

ра в тело вызывает локальную пластическую деформацию. Как показано в работе [6], влияние этой деформации на результат определения твердости незначительно, так что им можно пренебречь.

В работах [1 – 3] выполнено экспериментальное обоснование упомянутого выше предположения. Для рассмотренных случаев как простого, так и сложного нагружения разброс полученных данных не превысил 10%.

Предметом данной работы была зона пластичности возле фронта трещины нормального отрыва. Определению в опытах подлежала твердость. По твердости устанавливали распределение интенсивности напряжений и оценивали форму зоны пластичности. Находили также размеры зоны пластичности в некоторых направлениях.

### §1. Методы экспериментального исследования.

Экспериментальное исследование выполнено на плоских и компактных образцах из стали 12Х18Н10Т. На плоских образцах получены данные, необходимые для конкретизации зависимости между интенсивностью напряжений и твердостью. На компактных образцах определена твердость в окрестности фронта трещины.

Толщина плоских образцов равнялась  $3 \cdot 10^{-3}$  м, а компактных образцов –  $10 \cdot 10^{-3}$  м. В компактных образцах была создана трещина длиной  $11 \cdot 10^{-3}$  м.

Образцы нагружали на машине ЦДМУ-30Т. Погрешность задания нагрузки составляла  $\pm 1\%$ .

Твердость определяли с помощью прибора ПМТ-3. Следует отметить, что точность определения твердости зависит от нагрузки на индентор. Она тем выше, чем больше эта нагрузка. Наименьшая нагрузка на индентор, при которой точность определения твердости можно признать приемлемой, равна 0,049 Н. В данной работе твердость определена при нагрузке на индентор, равной 1,961 Н. Вследствии этого была обеспечена высокая точность определения твердости (погрешность ее определения составляла, в среднем, около  $\pm 1,5\%$ ).

В процессе определения твердости измеряли обе диагонали каждого отпечатка. Затем вычисляли среднее арифметическое результатов измерений и устанавливали твердость. Осуществляли это десятикратно. В последующем вычисляли среднее арифметическое значений твердости.

Далее остановимся на вопросе конкретизации зависимости между интенсивностью напряжений и твердостью.

Под интенсивностью напряжений  $X$  подразумевали квадратный корень из второго инварианта девиатора напряжений. В записи через первый и второй инварианты тензора напряжений  $S$  величина  $X$  определяется формулой

$$X = \sqrt{A - \frac{\Theta^2}{3}}, \quad (1.1)$$

где использованы обозначения

$$\Theta = g_{\alpha\beta} S^{\alpha\beta}; \quad A = g_{\alpha\gamma} g_{\beta\delta} S^{\alpha\beta} S^{\gamma\delta}. \quad (1.2)$$

В инвариантах (1.2)  $S^{\alpha\zeta}$  – контравариантные компоненты тензора  $S$ .

Система координат  $x^1, x^2, x^3$ , связанная с образцами, являлась прямоугольной декартовой. Стало быть имеем

$$g_{\alpha\zeta} = \begin{cases} 1 & (\alpha = \zeta); \\ 0 & (\alpha \neq \zeta). \end{cases} \quad (1.3)$$

Заметим, что оси  $x^1$  и  $x^2$  были сориентированы вдоль продольной и поперечной осей образцов, соответственно (рис. 1, а).

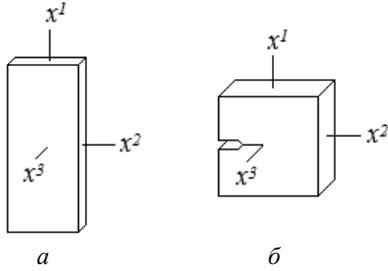


Рис. 1

Итак, из компонент тензора  $S$  только компонента  $S^{11}$  отличалась от нуля, т.е. имеем равенства

$$S^{\varepsilon\zeta} = 0 \quad (\varepsilon = \zeta = 2, 3; \varepsilon \neq \zeta). \quad (1.4)$$

Согласно равенствам (1.3) и (1.4), инварианты (1.2) будут

$$\Theta = S^{11}; \quad A = S^{11}S^{11}. \quad (1.5)$$

В соответствии с инвариантами (1.5) формула (1.1) принимает вид

$$X = \sqrt{2/3} S^{11}. \quad (1.6)$$

Опыты проведены на четырех образцах. К каждому образцу прикладывали определенную нагрузку. При этом индикатором МИГ-1 измеряли (с точностью до  $\pm 0,5 \cdot 10^{-6}$  м) уменьшение поперечного размера образцов (размера по оси  $x^2$ ). С учетом этого компонента  $S^{11}$  была равна:  $254,08 \cdot 10^6$  Па;  $290,98 \cdot 10^6$  Па;  $323,92 \cdot 10^6$  Па;  $394,59 \cdot 10^6$  Па.

На основе значений компоненты  $S^{11}$  по формуле (1.6) устанавливали величину  $X$ . После этого на каждом образце определяли (по плоскости  $x^3 = 0$ ) твердость  $H$ .

Введем величины  $\dot{X}$  и  $\dot{H}$  по формулам

$$\dot{X} = X \cdot 10^{-6}; \quad \dot{H} = H \cdot 10^{-9}. \quad (1.7)$$

На основе значений величин  $X$  и  $H$  по формулам (1.7) установлены величины  $\dot{X}$  и  $\dot{H}$ . Их значения приведены в табл. 1.

Пусть зависимость между величинами  $\dot{X}$  и  $\dot{H}$  может быть представлена параболой  $n$ -го порядка [4]

$$\begin{aligned} \dot{X} = & C_0\varphi_0(\dot{H}) + C_1\varphi_1(\dot{H}) + \\ & + C_2\varphi_2(\dot{H}) + \dots + C_n\varphi_n(\dot{H}), \end{aligned} \quad (1.8)$$

где  $\varphi_0(\dot{H})$ ,  $\varphi_1(\dot{H})$ ,  $\varphi_2(\dot{H})$ , ...,  $\varphi_n(\dot{H})$  – полиномы Чебышева.

мы Чебышева.

Принимая, что  $\varphi_0(\dot{H}) = 1$ , остальные полиномы определим так:

$$\begin{aligned} \varphi_j(\dot{H}) = & b_{j,0}\varphi_0(\dot{H}) + b_{j,1}\varphi_1(\dot{H}) + b_{j,2}\varphi_2(\dot{H}) + \\ & + \dots + b_{j,j-1}\varphi_{j-1}(\dot{H}) + \dot{H}^j \quad (j = 1, 2, \dots, n), \end{aligned} \quad (1.9)$$

где использованы обозначения

$$b_{j,k} = - \frac{[\dot{H}^j \varphi_k(\dot{H})]}{[\varphi_k(\dot{H}) \varphi_k(\dot{H})]} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, j-1). \quad (1.10)$$

Для оценок коэффициентов  $C_i$  имеем формулы

$$\tilde{C}_i = \frac{[\dot{X} \varphi_i(\dot{H})]}{[\varphi_i(\dot{H}) \varphi_i(\dot{H})]} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n). \quad (1.11)$$

В результате вычислений по формулам (1.8) – (1.11) (на основе значений величин  $\dot{X}$  и  $\dot{H}$ ) установлено, что зависимость между величинами  $\dot{X}$  и  $\dot{H}$  достаточно точно аппроксимирует парабола 2-го порядка, имеющая вид

$$\dot{X} = 677,40508 - 701,06581\dot{H} + 257,44010\dot{H}^2. \quad (1.12)$$

Далее осветим вопрос определения твердости в окрестности фронта трещины.

Поскольку изменение твердости тела происходит при его пластическом деформировании, то в поле зрения была окрестность фронта трещины, не превосходящая по своим размерам зону пластичности.

Попыты проведены на трех образцах. Прикладываемая к образцам нагрузка  $N$  была равна: 4903,32 Н (для первого образца); 5393,65 Н (для второго образца); 5883,99 Н (для третьего образца).

В первом и во втором образцах трещина осталась неподвижной. В третьем образце она струнулась.

С этими образцами связана прямоугольная декартова система координат  $x^1, x^2, x^3$ , причем ось  $x^2$  сориентирована в направлении трещины, плоскость  $x^3 = 0$  совмещена со срединной плоскостью образцов, а начало координат помещено в вершину трещины (рис. 1, б).

Твердость определяли по плоскостям  $x^3 = 0$ ,  $x^3 = 2 \cdot 10^{-3}$  м и  $x^3 = 4 \cdot 10^{-3}$  м.

Очевидно, что в плоскости  $x^3 = 0$  имеет место плоская деформация. Ввиду этого результаты, полученные для данной плоскости, вызывают наибольший интерес.

Перед определением твердости поверхность образцов у вершины трещины обследовали на сканирующем электронном микроскопе BS-301. Было выявлено, что страгиванию трещины предшествует образование зоны предразрушения – области деструкции, в которой наблюдаются микротрещины, поры и расслоения (рис. 2).

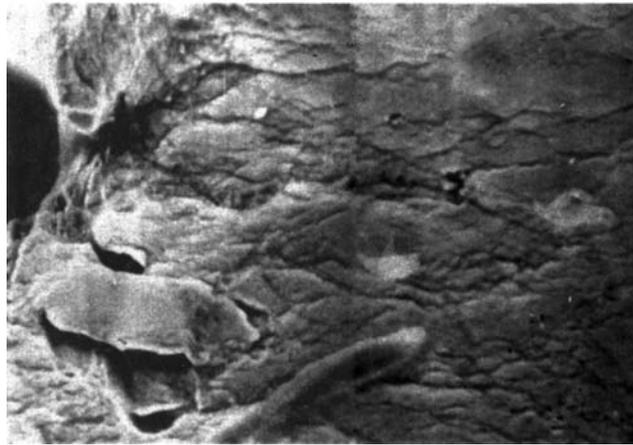


Рис. 2

Подчеркнем, что зона предразрушения должна быть учтена при постановке краевых задач механики разрушения [11, 12, 14].

## §2. Анализ полученных результатов.

Проанализируем результаты, полученные на третьем образце для плоскости  $x^3 = 0$ .

На основе значений твердости по второй из формул (1.7) установлена величина  $\dot{H}$ . На основе значений величины  $\dot{H}$  по формуле (1.12) установлена величина  $\dot{X}$ . Значения величин  $\dot{H}$  и  $\dot{X}$  приведены в табл. 2 (верхние и нижние значения, соответственно).

Таблица 2

$x^1 \cdot 10^3, \text{ м}$	$x^2 \cdot 10^3, \text{ м}$					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,2	2,19625	2,05175	1,90731	1,77760	1,70603	1,68312
	379,45	322,73	276,77	244,66	230,65	226,72
0,4	2,23044	2,13021	1,97756	1,85378	1,80246	1,72940
	394,44	352,19	297,78	262,47	250,14	234,94
0,6	2,23044	2,14644	1,97756	1,92106	1,84074	1,78996
	394,44	358,68	297,78	280,69	259,21	249,35
0,8	2,11416	2,02158	1,93495	1,89371	1,81509	1,76536
	345,91	312,24	284,74	273,00	253,05	242,08
1,0	1,99207	1,96320	1,88025	1,84074	1,78996	1,74126
	302,44	293,28	269,36	259,21	247,35	237,22
1,2	1,89371	1,88025	1,85378	1,81509	1,76536	1,71765
	273,00	269,36	262,47	253,05	242,08	232,75
1,4	1,81509	1,81509	1,78996	1,76536	1,74126	1,70603
	253,05	253,05	247,35	242,08	237,22	230,65
1,6	1,76536	1,77760	1,75325	1,74126	1,70603	1,68312
	242,08	244,66	239,60	237,22	230,65	226,72
1,8	1,71765	1,71765	1,72940	1,70603	1,68312	1,66068
	232,75	232,75	234,94	230,65	226,72	223,14

На основе значений величины  $\dot{X}$  по первой из формул (1.7) установлена величина  $X$ . Значения величины  $X$  были использованы при построении графиков, представленных на рис. 3. Для кривых, показанных на этих графиках, координата  $x^1$  такова: 1 –  $0,2 \cdot 10^{-3}$  м; 2 –  $0,4 \cdot 10^{-3}$  м; 3 –  $0,6 \cdot 10^{-3}$  м; 4 –  $0,8 \cdot 10^{-3}$  м; 5 –  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м; 6 –  $1,2 \cdot 10^{-3}$  м; 7 –  $1,4 \cdot 10^{-3}$  м; 8 –  $1,6 \cdot 10^{-3}$  м; 9 –  $1,8 \cdot 10^{-3}$  м.

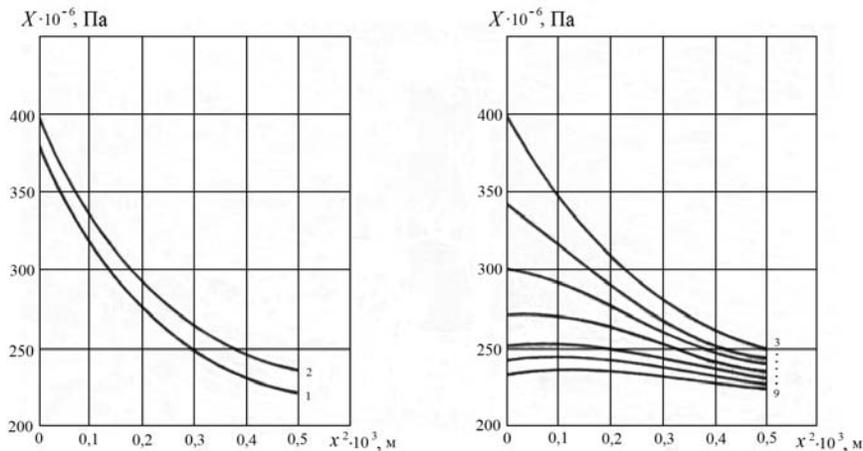


Рис. 3

Заслуживает внимания то, что при  $x^1 < 0,2 \cdot 10^{-3}$  м и  $x^2 < 0,5 \cdot 10^{-3}$  м интенсивность напряжений оказалась заметно заниженной. Это может быть объяснено наличием у вершины трещины зоны предразрушения.

Представляется интересным поведение интенсивности напряжений по мере увеличения координаты  $x^1$ . Так, с увеличением координаты  $x^1$  от  $0,2 \cdot 10^{-3}$  м до  $0,4 \cdot 10^{-3}$  м интенсивность напряжений повышается. С увеличением координаты  $x^1$  от

$0,6 \cdot 10^{-3}$  м до  $1,8 \cdot 10^{-3}$  м интенсивность напряжений понижается. Последнее справедливо при условии, что  $x^2 < 0,5 \cdot 10^{-3}$  м.

По графикам, представленным на рис. 3, определены координаты  $x^1$  и  $x^2$  точек, в которых интенсивность напряжений принимает равные значения. Эти координаты были использованы при построении графика, представленного на рис. 4. Для кривых, показанных на этом графике, величина  $X$  такова: 1 –  $280 \cdot 10^6$  Па; 2 –  $260 \cdot 10^6$  Па.

Как видно, зона пластичности вытянута в направлении оси  $x^1$ . Это согласуется с численным решением краевой задачи о равновесии упругопластического тела, содержащего трещину нормального отрыва [5].

Размеры зоны пластичности по осям  $x^\alpha$  ( $\alpha = 1, 2$ ) обозначены  $d^{(\alpha)}$ . Они определены как расстояния от начала координат до точек на осях  $x^1$  и  $x^2$ , в которых  $X = 213,02 \times 10^6$  Па.

Увеличение размеров зоны пластичности в зависимости от нагрузки  $N$  иллюстрируют графики, представленные на рис. 5. Кривые, показанные на этих графиках, имеют одинаковый вид. Однако скорости увеличения размеров зоны пластичности по осям  $x^1$  и  $x^2$  существенно различаются. Действительно, скорость увеличения размера  $d^{(1)}$  намного превосходит скорость увеличения размера  $d^{(2)}$ . Это вполне объяснимо, так как размер  $d^{(1)}$  значительно превосходит размер  $d^{(2)}$ . В плоскостях  $x^3 = 2 \cdot 10^{-3}$  м и  $x^3 = 4 \cdot 10^{-3}$  м зона пластичности оказалась более вытянутой в направлении оси  $x^2$ . Размеры зоны пластичности по осям  $x^1$  и  $x^2$  увеличились.

#### Заключение.

Выполнено экспериментальное исследование зоны пластичности возле фронта трещины нормального отрыва. В результате определения твердости установлено распределение интенсивности напряжений. Обнаружена зона предразрушения, примыкающая к трещине. Показано влияние этой зоны на распределение интенсивности напряжений. По распределению интенсивности напряжений оценена форма зоны пластичности. Определены также размеры зоны пластичности в двух взаимно ортогональных направлениях.

Полученные результаты могут быть использованы для обоснования моделей трещины и проверки решений краевых задач о состоянии предельного равновесия упругопластического тела с трещиной нормального отрыва.

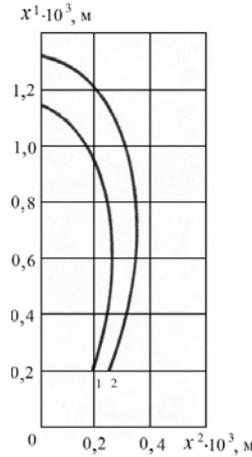


Рис. 4

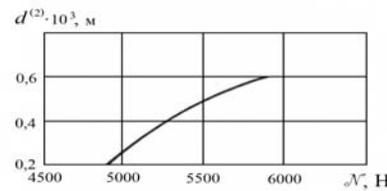
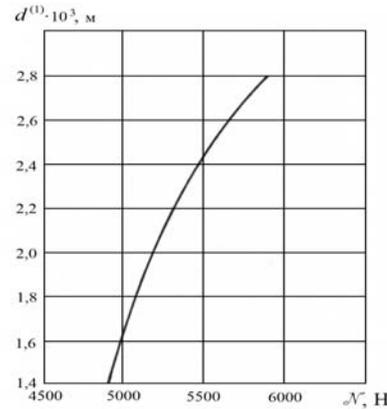


Рис. 5

РЕЗЮМЕ. Знайдено розподіл інтенсивності напружень біля фронту тріщини нормального відриву в пружно-пластичному тілі. За цим розподілом оцінено форму зони пластичності, а також визначено її розміри у двох взаємно ортогональних напрямках.

1. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. – М.: Машиностроение, 1971. – 200 с.
2. Дель Г.Д., Спиридонов Л.К., Темник И.Н., Цукублина К.Н. О связи между твердостью и напряжением в пластической области // Механика твердого тела. – 1970. – № 6. – С. 157 – 159.
3. Дель Г.Д. Твердость деформируемого металла // Известия АН СССР. Металлы. – 1967. – № 4. – С. 97 – 102.
4. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. – М.: Физматгиз, 1958. – 334 с.
5. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. – М.: Наука, 1985. – 504 с.
6. Розенберг А.М., Хворостухин Л.А. Твердость и напряжение в пластически деформированном теле // Журнал технической физики. – 1955. – 25, № 2. – С. 313 – 322.
7. Bridgman P.W. The compressibility of thirty metals as a function of pressure and temperature // Proceedings of the Academy of Arts and sciences. – 1923. – 58, N 5. – P. 166 – 242.
8. Gerberich W.W., Swedlow J.L. Plastic strains and energy density in cracked plates // Exper. Mech. – 1964. – 4, N 11. – P. 335 – 344.
9. Hahn G.T., Hoagland R.G., Rosenfield A.R. Local yielding attending fatigue crack growth // Met. Trans. – 1972. – N 3. – P. 1189 – 1196.
10. Hahn G.T., Rosenfield A.R. Local yielding and extension of a crack under plane stress // Acta Met. – 1965. – 13, N 3. – P. 293 – 306.
11. Kaminsky A.A., Kurchakov E.E. Influence of Tension along a Mode I Crack in an Elastic Body on the Formation of a Nonlinear Zone // Int. Appl. Mech. – 2015. – 51, N 2. – P. 130 – 148.
12. Kaminsky A.A., Selivanov M.F. Modeling Subcritical Crack Growth in a Viscoelastic Body under Concentrated Forces // Int. Appl. Mech. – 2017. – 53, N 5. – P. 538 – 544.
13. Rooke D.P., Bradshaw F.J. A study of crack tip deformation and derivation of fracture energy // Proc. of the 2 Int. Conf. on Fracture. – London: Chapman and Hall, 1969. – P. 46 – 57.
14. Selivanov M.F. Slow Growth of a Crack with Contacting Faces in Viscoelastic Body // Int. Appl. Mech. – 2017. – 53, N 6. – P. 617 – 622.
15. Shalffer B.J., Liu H.W., Ke J.S. Deformation and the strip necking zone in a cracked steel sheet // Exper. Mech. – 1971. – 11, N 4. – P. 286 – 292.
16. Voitovich L.V., Malezhik M.P., Chernyshenko I.S. Photoelastic Modeling of the Fracture of Viscoelastic Orthotropic Plates with a Crack // Int. Appl. Mech. – 2010. – 46, N 6. – P. 677 – 682.

Поступила 31.08.2016

Утверждена в печать 10.10.2017