

УДК 620.169

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЛЕЧИВАНИЯ ПОР В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

С.Ю.Веселков\*, Ю.М.Даль\*, В.И.Бетехтин, А.Г.Кадомцев, А.Ю.Кипяткова.

\* Гоударственный Университет, 198904, С.-Петербург, Библиотечная пл. 2.  
ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН, 194021, С.-Петербург, Политехническая ул. 26.

Рассматривается нелинейная задача теории упругости для тела с эллиптическими порами. Приведены формулы, определяющие деформированную конфигурацию пор. Описаны экспериментальные данные по их залечиванию под действием гидростатического давления в пористой меди и аморфных сплавах.

1. Анализ напряженно-деформированного состояния тела конечных размеров, ослабленного системой пор и трещин, исключительно сложен и трудоемок. Можно с уверенностью утверждать, что в настоящее время эта проблема не поддается решению аналитическими методами механики деформируемого тела. Основным и непревзойденным результатом и ныне являются теоретические формулы Г.В.Колосова [1] для упругой бесконечной плоскости с эллиптическим отверстием. Так, в случае всестороннего нагружения (на бесконечности) плоскости гидростатическим давлением интенсивности  $p$  имеем:

$$l = l_0 - 2 \cdot (1 - \nu^2) \frac{h_0 p}{E}, \quad h = h_0 - 2 \cdot (1 - \nu^2) \frac{l_0 p}{E}, \quad (1)$$

где  $l$  и  $h$  – деформированные длины большой ( $l_0$ ) и малой ( $h_0$ ) полуоси эллиптического отверстия;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль Юнга.

Сформулируем теперь следующее положение: при гидростатическом давлении на бесконечности деформированный контур эллиптического выреза остается эллиптическим (доказательство справедливости этого утверждения приведено в работе [2]). Следуя положениям данной работы, нетрудно получить тогда зависимости, уточняющие соотношения (1):

$$l = \frac{l_0}{2} \left\{ \left( 1 + \frac{h_0}{l_0} \right) \cdot e^{-\frac{2(1-\nu^2)p}{E}} + \left( 1 - \frac{h_0}{l_0} \right) \cdot e^{\frac{2(1-\nu^2)p}{E}} \right\}, \quad (2)$$

$$h = \frac{h_0}{2} \left\{ \left( 1 + \frac{l_0}{h_0} \right) \cdot e^{-\frac{2(1-\nu^2)p}{E}} - \left( \frac{l_0}{h_0} - 1 \right) \cdot e^{\frac{2(1-\nu^2)p}{E}} \right\}.$$

Как видим, при  $\frac{p}{E} = 0$  (1) формулы (2) с точностью до величин высшего порядка малости совпадают с решением (1).

Рассмотрим, в качестве примера, круговую полость радиуса  $r_0 = \text{const}$ . Принимая в (2) параметры  $h_0 = l_0$ , находим

$$r = r_0 \cdot e^{-\frac{2(1-\nu^2)p}{E}} \quad (3)$$

Если имеет место эллиптическое отверстие с отношением  $\frac{h_0}{l_0} = 0.5$ , тогда зависимости (2) преобразуются к виду:

$$l = \frac{l_0}{2} \left\{ 1.5 \cdot e^{-\frac{2(1-\nu^2)p}{E}} + 0.5 \cdot e^{\frac{2(1-\nu^2)p}{E}} \right\}, \quad (4)$$

$$h = \frac{h_0}{2} \left\{ 3 \cdot e^{-\frac{2(1-\nu^2)p}{E}} - e^{\frac{2(1-\nu^2)p}{E}} \right\}.$$

Графики функций  $\frac{l}{l_0}$  и  $\frac{h}{h_0}$  для различных отношений  $\frac{p}{E}$ , вычисленные по форму-

лам (4), приведены на рис.1 и рис.2 ( $\nu = 0,3$ ). Следует подчеркнуть, что решение (2) относится к эллиптическому отверстию в бесконечной упругой плоскости. Когда отверстие расположено вблизи прямолинейной границы полуплоскости, выражения (2) применять нельзя. Поскольку точного аналитического решения этой задачи не существует, для соответствующих расчетов следует использовать численные методы. Наиболее удобным здесь оказывается метод конечных элементов. С его помощью можно вычислить не только конфигурацию деформированного отверстия, но и распределение компонент упругих напряжений. При этом кривая постоянной интенсивности напряжений

$$\sigma_I = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6\sigma_{xy}^2} = \sigma_T = \text{const},$$

где  $\sigma_{zz} = \nu \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ ;  $\sigma_T$  — предел текучести материала оказывается (с точностью до постоянного множителя  $\lambda \approx 0,93$ ) совпадающей с контуром зоны пластических деформаций.

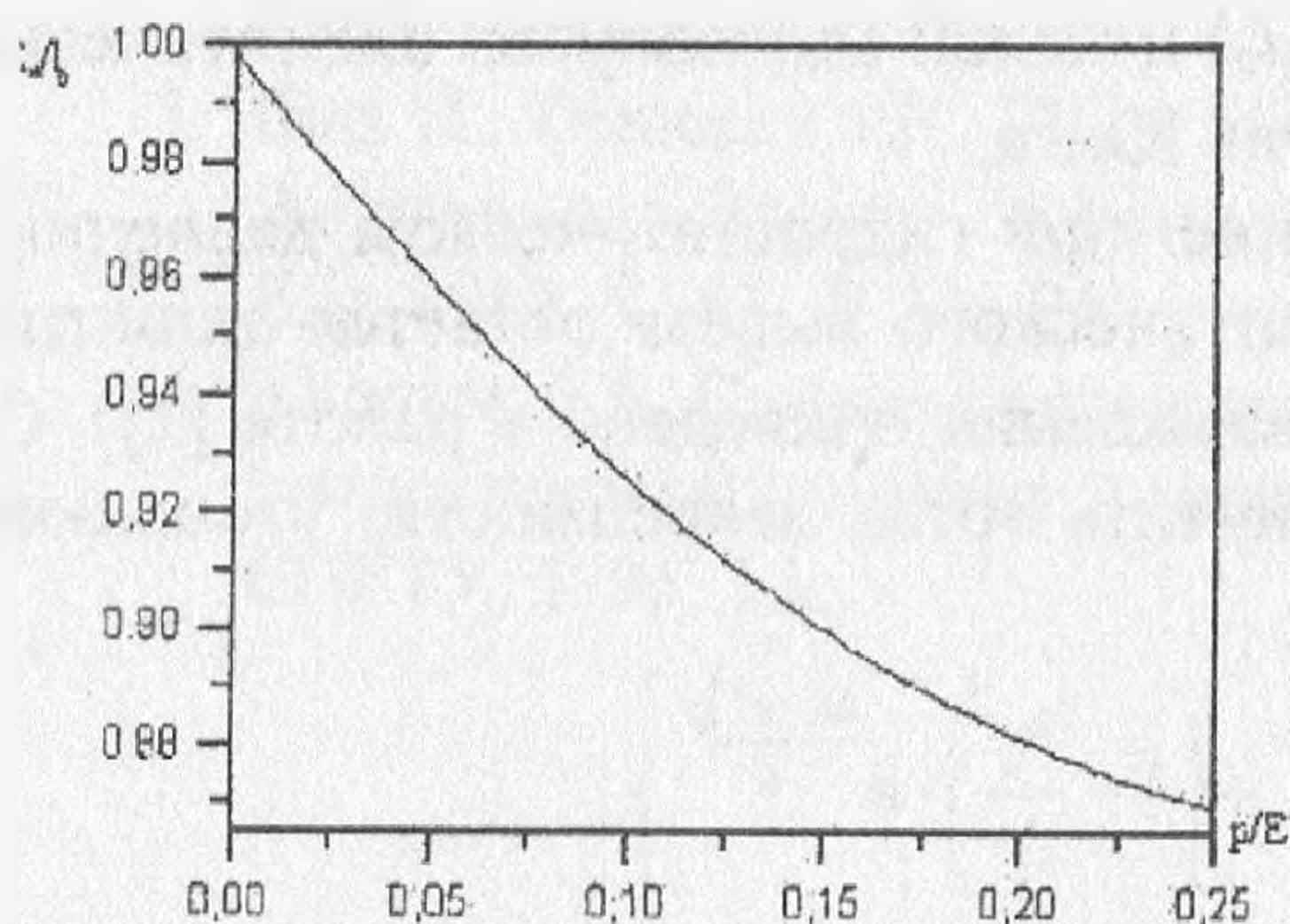


Рис.1. Зависимость размеров поры  $l/l_0$  от величины приложенного давления  $p/E$  (конфигурация поры до деформации — эллипс с отношением  $h_0/l_0 = 1/2$ ).

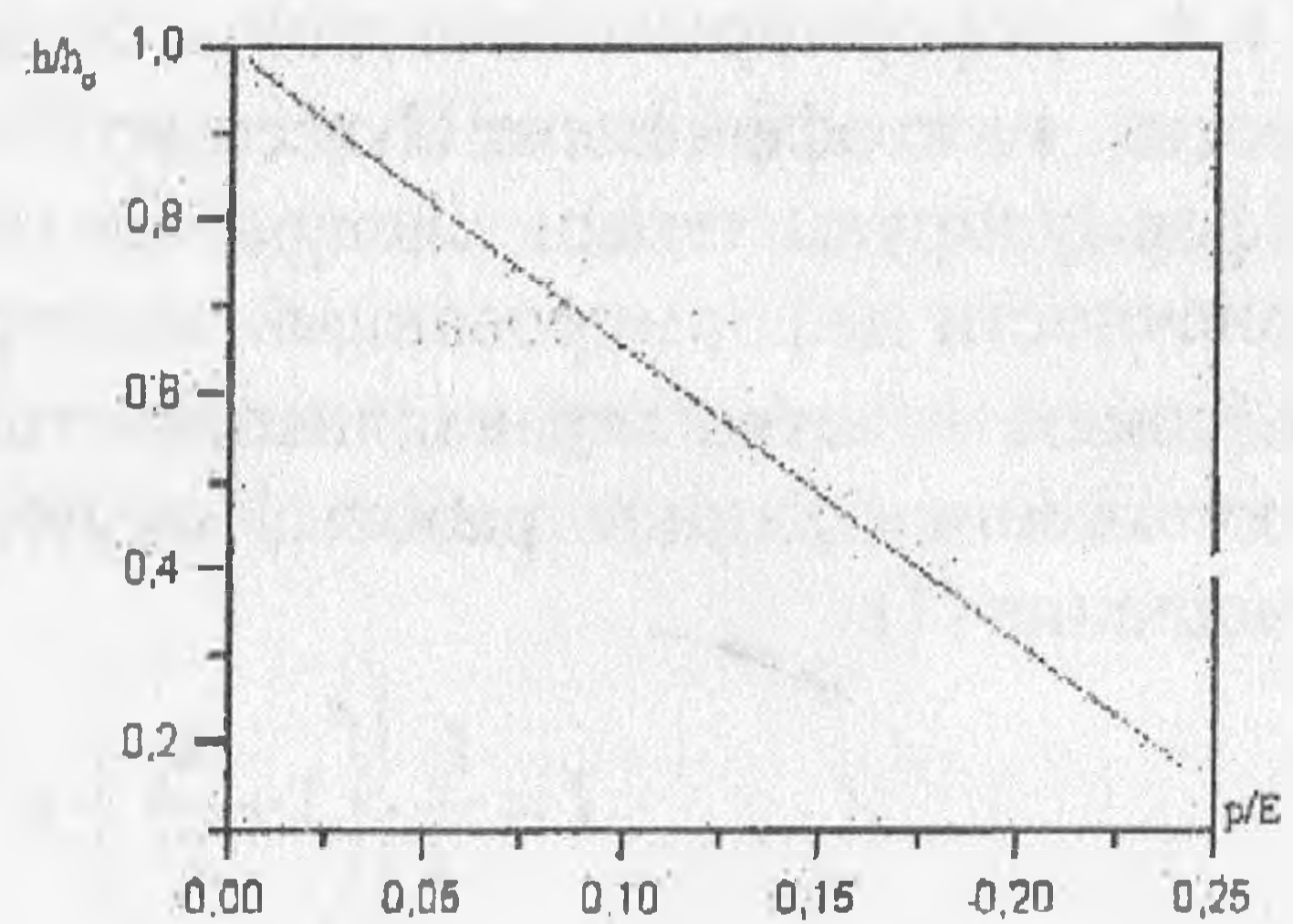


Рис.1. Зависимость размеров поры  $h/h_0$  от величины приложенного давления  $p/E$  (конфигурация поры до деформации — эллипс с отношением  $h_0/l_0 = 1/2$ ).

На рис. 3 и 4 представлены (черным цветом) результаты вычислений зоны пластических деформаций около эллиптического отверстия (с отношением  $\frac{l_0}{h_0} = \frac{1}{5}$ ), расположенного вблизи границы полуплоскости, нагруженной гидростатическим давлением. Как видим, по мере приближения отверстия к границе, вид зон пластичности качественно изменяется. Для отверстия, расположенного в приповерхностном слое зона пластичности охватывает не только его концевые области, но и простирается непосредственно над всем верхним контуром. Отсюда, естественно, следует вывод: приповерхностные поры эллиптической формы деформируются непосредственно в зонах локальной пластичности, порожденной концентрацией напряжений, как самого отверстия, так и собственно границы.

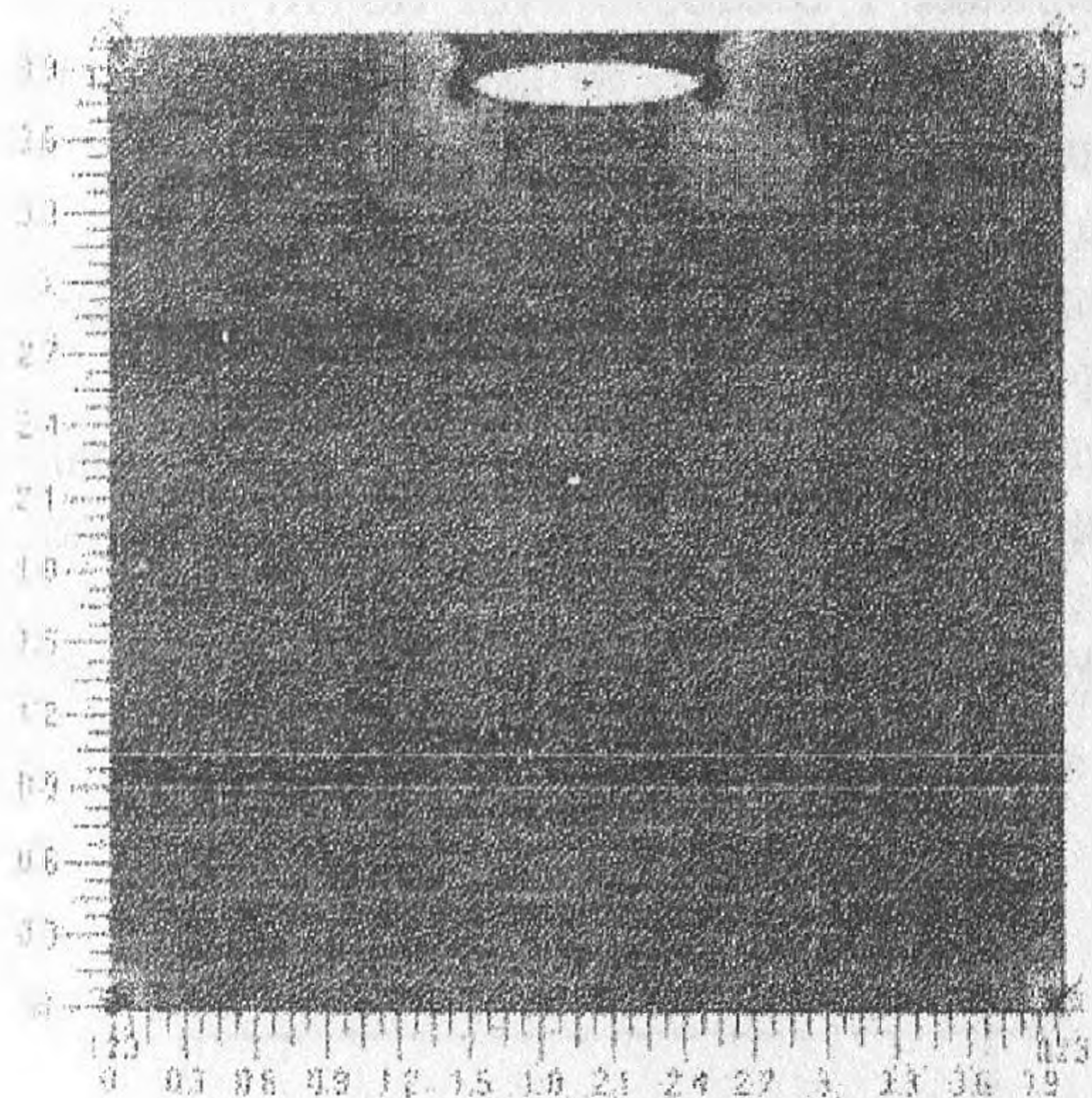


Рис.3. Зона пластических деформаций около эллиптического отверстия, расположенного у границы полуплоскости (показана черным цветом).

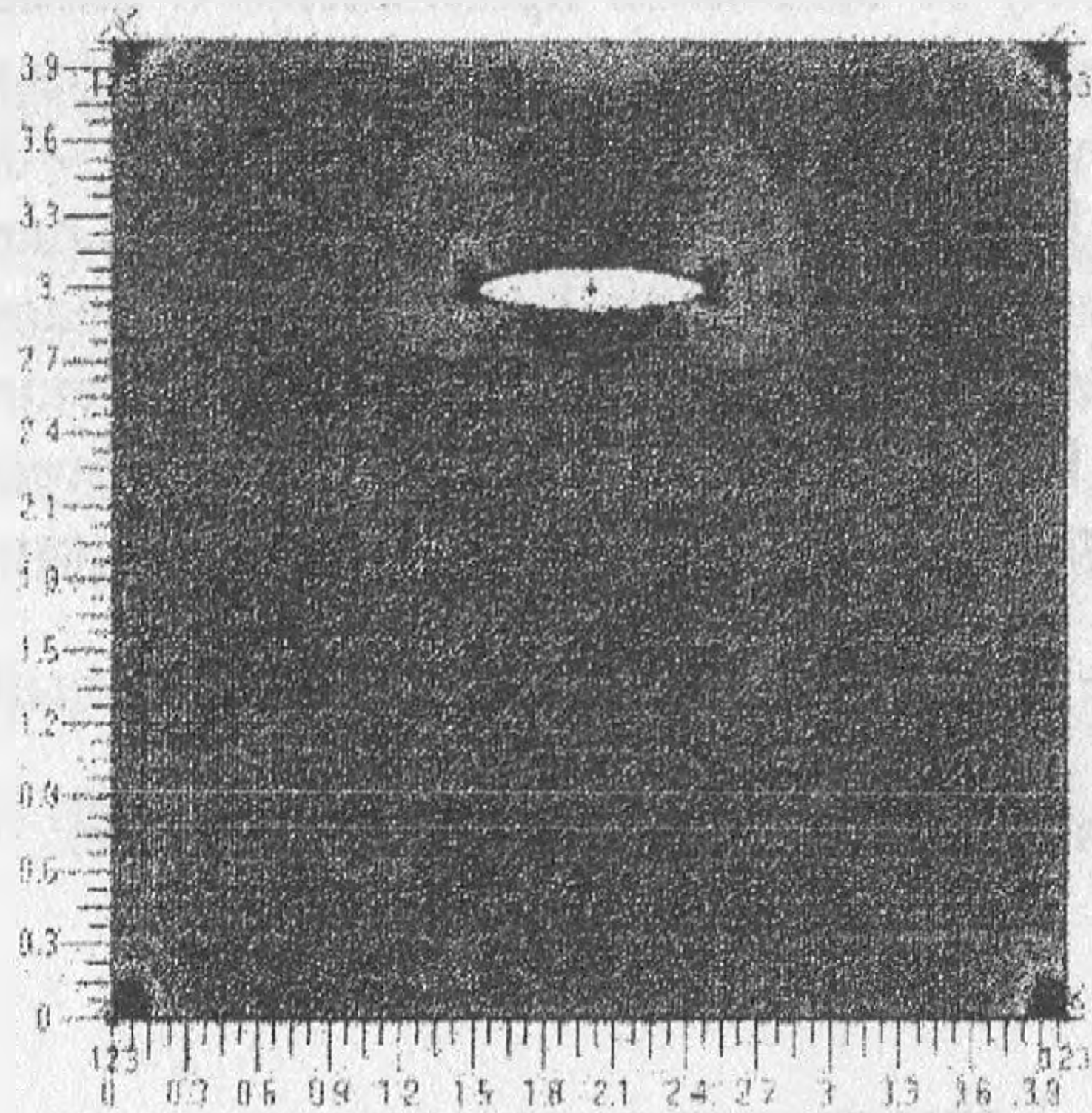


Рис.4. Зона пластических деформаций около эллиптического отверстия, удаленного от границы (показана черным цветом).

Следовательно, с увеличением отношения  $p/E$  их деформация будет возрастать, приводя, в конечном счете, к смыканию противоположных «берегов» контура, т.е. к исчезновению отверстия. Аналогичный результат имеет место и для нескольких пор, удаленных друг от друга на расстояние, более чем вдвое превышающее их наибольший линейный размер  $l_{\max}$ . Однако, если размеры пор различны, причем расстояние между ними равно или меньше  $l_{\max}$ , то зоны пластических деформаций в окрестности «внутренних» пор, увеличиваются, а интенсивность напряжений в них возрастает. Поэтому система нескольких пор залечивается быстрее (при тех же отношениях  $p/E$ ), чем изолированная пора, вне зависимости от их ориентации по отношению к границе.

## 2. Экспериментальные данные

Рассмотрим результаты экспериментального исследования процесса залечивания пор под действием гидростатического давления. В качестве объекта исследования были выбраны образцы поликристаллической меди, испытанные в режиме высокотемпературной ползучести ( $\sigma = 12,5$  МПа,  $T = 500^\circ\text{C}$ ,  $\tau \approx 30$  часов). В таких образцах содержатся

ся значительное число пор (пористость  $\approx 1\%$ ) с размерами в единицы мкм, расположенных преимущественно по границам зерен. Форма пор была в основном эллипсоидальная с отношением осей от 1,5 до  $\approx 10$ . Помимо этого, исследовали ленточные образцы аморфных металлических сплавов; в этих материалах существует как минимум 2 фракции пор с размерами в десятки и сотни нм, причем, одна из фракций пор равномерно распределена по объему ленты, а другая локализована в тонком приповерхностном слое. Исследовалось микроскопическими методами изменение размеров пор при действии гидростатического давления до 1 ГПа.

Известно [3], что поры достаточно интенсивно залечиваются под действием таких давлений. В данной работе анализируется, преимущественно, влияние на степень залечивания формы пор, их расстояний до внешней поверхности и между собой.

На рис.5 приведены зависимости объема пор разной формы (в относительных единицах) от величины приложенного давления. Кривая 1 соответствует почти круглым порам ( $a/b \approx 1.5$ ), кривая 2 – порам с отношением  $a/b \approx 4 \div 5$ , 3 –  $8 \div 10$ , а кривая 4 – цепочкам пор, занимающим примерно  $0,5 \div 0,6$  площади границы.

Видно, что отдельные, достаточно округлые поры залечиваются хуже всего; по мере увеличения величины  $a/b$  степень залечивания увеличивается. Наиболее интенсивно залечиваются группы близкорасположенных пор.

На рис.6. приведена зависимость степени залечивания пор примерно одной формы от их расстояния до внешней поверхности образца. Видно, что степень залечивания пор  $\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$  (где  $V_1$  – начальный, а  $V_2$  – конечный объем пор) при малых значениях  $d$  ( $d$  – расстояние до поверхности образца) выше.

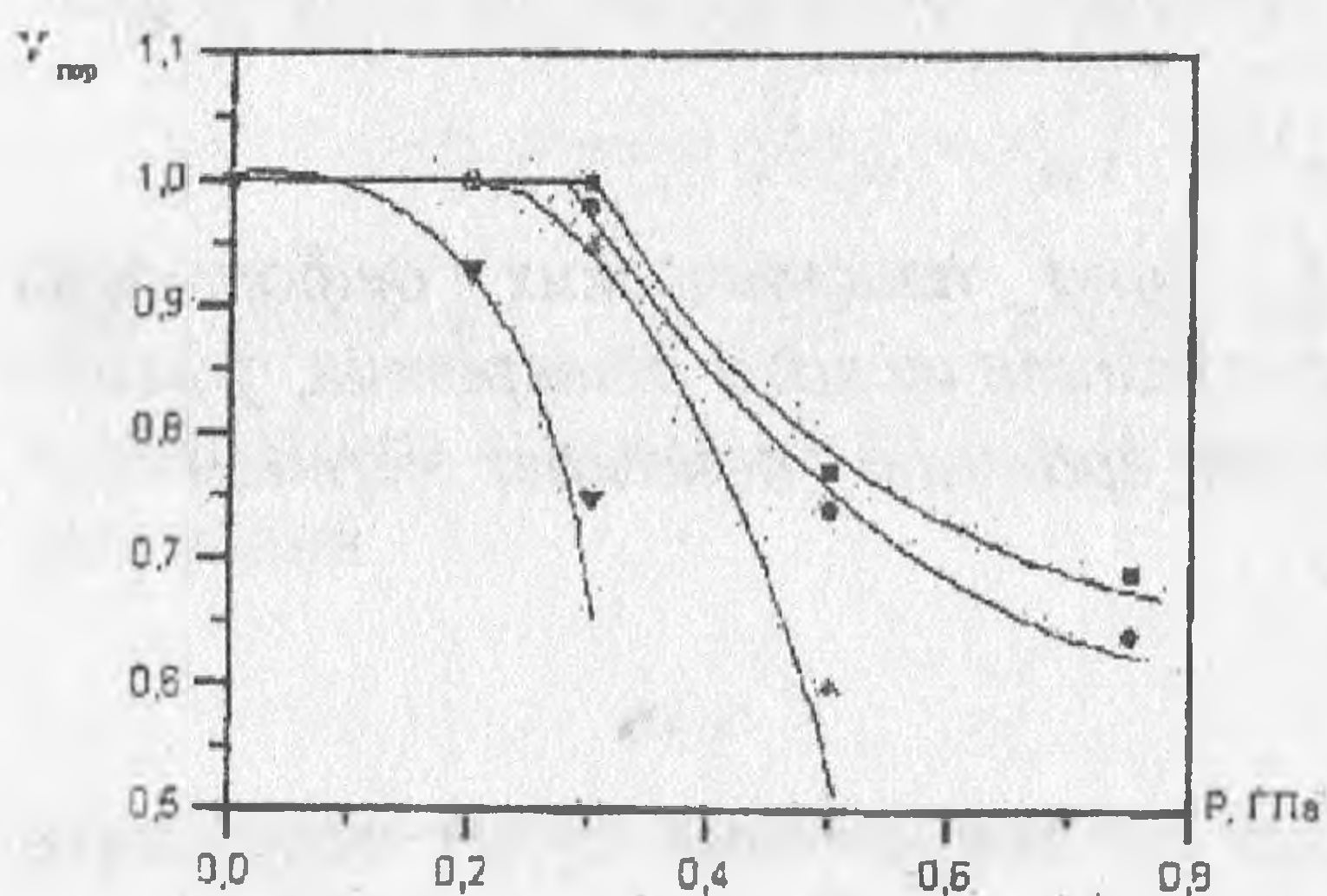


Рис.5. Влияние формы пор на степень их залечивания.

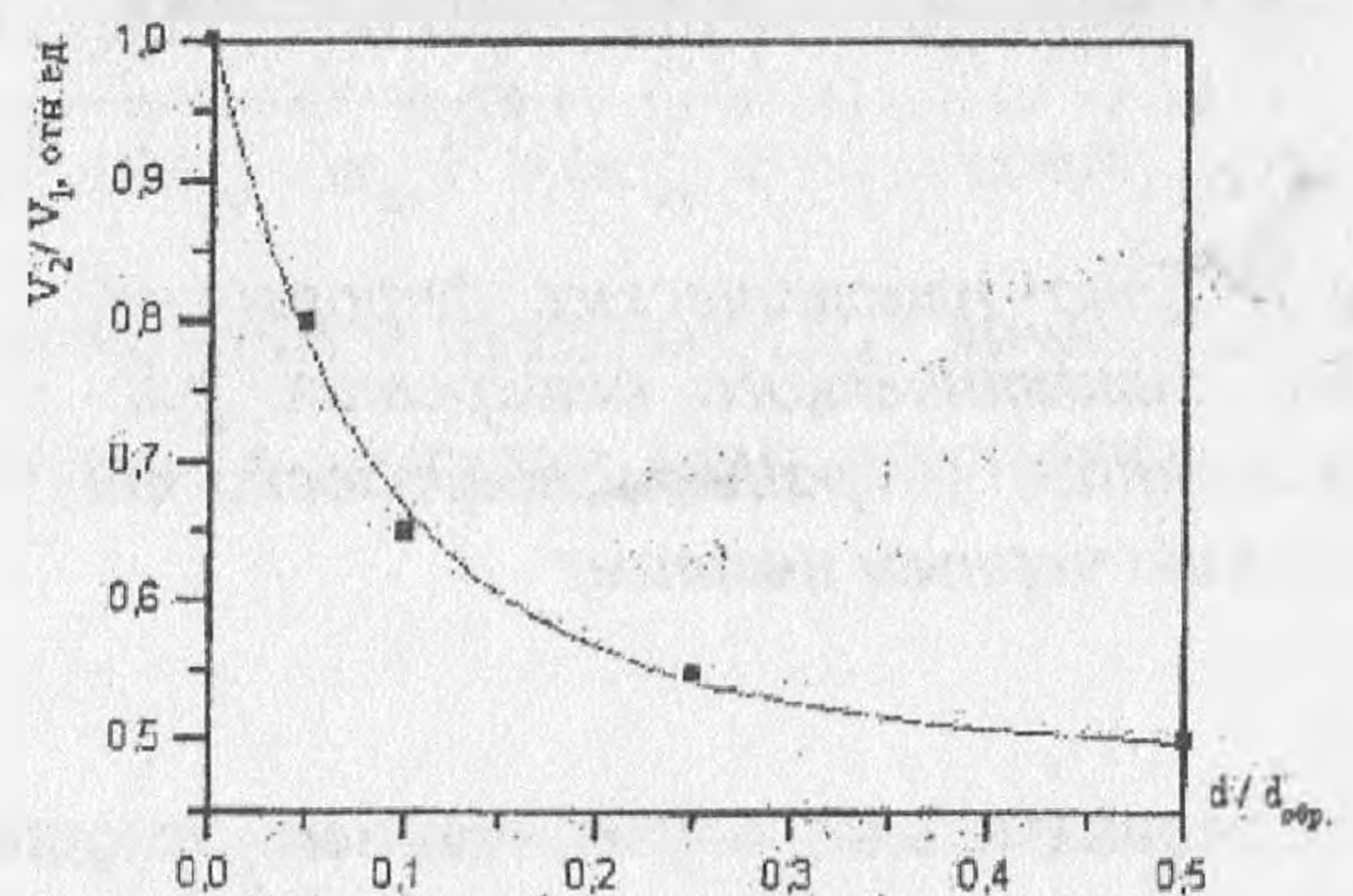


Рис.6. Влияние расстояния до внешней поверхности на степень залечивания пор.

Более четко этот эффект наблюдается для образцов аморфных сплавов. Как было показано в [4], та фракция пор, которая локализована преимущественно в приповерхностном слое ленты толщиной 1-2 мкм, залечивается под давлением существенно легче, чем та, которая распределена по всему объему ленты.

### Заключение

Таким образом, имеющиеся экспериментальные данные качественно согласуются с результатами сделанных расчетов. Их анализ позволяет сделать ряд выводов об особенностях залечивания пор в материалах под действием гидростатического давления.

1. Степень залечивания пор увеличивается по мере роста её «эллиптичности», т.е. соотношения главных осей. Почти круглые поры залечиваются очень слабо, наиболее интенсивно – грещины ( $a/b > 10$ ).
2. Системы близкорасположенных пор (расстояние между порами близко к их размеру) залечиваются существенно интенсивнее, чем отдельные поры аналогичной формы.
3. Залечивание пор протекает интенсивнее вблизи внешней поверхности образца. Особенно существенно это ускорение в том случае, когда расстояние между порой и поверхностью близко к размеру поры.

### Список литературы

1. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966, 707с.
2. Даль Ю.М. Влияние малой геометрической нелинейности на характер напряженно-деформированного состояния у вершины трещины. // Известия АН СССР, МТТ, 1980, №2, С. 130-137.
3. Betchtin V.I., Petrov A.I., Kadomsev A.G., Kucharova K. Shrinkage of creep cavities in copper by application of high hydrostatic pressure at ambient temperature // Scripta Metallurgica, 1991, Vol.25, P.2159-2164.
4. В.И.Бетехтин, А.М.Глезер, А.Г.Кадомцев, А.Ю.Кипяткова. Избыточный свободный объем и механические свойства аморфных сплавов // ФТТ, 1998, Т.40, №1, С.85-89.