

Влияние всестороннего давления на развитие пористости в процессе шейкообразования при растяжении металлов и сплавов

© А.И. Петров, М.В. Разуваева

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: an.petrov@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 19 марта 2013 г. В окончательной редакции 16 мая 2013 г.)

Рассмотрены данные по влиянию всестороннего давления на микропористость в шейке образцов меди толщиной $45\ \mu\text{m}$ при их испытании в условиях ползучести. Сравнение полученных данных с результатами измерения пористости в шейке образцов цилиндрической формы позволило заключить, что наблюдаемый под давлением в меди переход от разрушения отрывом к разрушению срезом обусловлен уменьшением величины среднего гидростатического растяжения в шейке.

Известно [1], что развитие разрушения металлов и сплавов может сопровождаться возникновением пластической неустойчивости типа шейки, когда деформационное упрочнение $d\sigma/d\varepsilon$ перестает компенсировать рост напряжения σ вследствие уменьшения поперечного сечения растягиваемого образца. Критерий образования шейки имеет вид

$$d\sigma/d\varepsilon \leq \sigma. \quad (1)$$

Величина равномерной деформации, при достижении которой возникает пластическая неустойчивость, зависит от структурных факторов, таких как размер зерен, степень легирования, энергия дефекта упаковки [2,3].

Показано [4], что при образовании шейки распределение напряжений при одноосном нагружении перестает быть однородным. Появляются радиальные и тангенциальные напряжения, создающие в шейке объемное (трехосное) напряженное состояние, способствующее образованию пор. Зарождение и рост пор, как правило, связаны с частицами второй фазы. Поры образуются в основном возле частиц вследствие разрушения межфазных границ. Механизм образования и роста пор связан с эмиссией и расширением дислокационных петель, концы которых прикреплены к поверхности поры [5].

Известно [4,6], что испытание в условиях всестороннего давления заметно влияет на прочностные характеристики металлов и сплавов. Наиболее сильное влияние давление оказывает на третьей, ускоренной, стадии нагружения, когда давление тормозит разрушение в шейке. Такие результаты получены преимущественно на образцах цилиндрической формы. Для плоских образцов малого сечения при испытании под давлением также выявлен эффект упрочнения: при растяжении в условиях всестороннего сжатия уменьшается скорость ползучести и увеличивается время до разрушения [7,8]. Однако влияние всестороннего давления на развитие разрушения под нагрузкой для таких образцов практически не исследовалось.

В настоящей работе исследовали влияние давления на образование пор в тонких плоских образцах меди, доведенных до разрыва в условиях ползучести. Полученные данные сравнивали с аналогичными результатами,

полученными для цилиндрических образцов. Работа проводилась с целью сформулировать условия, при которых всестороннее давление затормаживает образование пор в шейке.

Образцы Cu (99.9%) в виде двойной лопатки вырубались ножами из заводской холодно-катанной фольги толщиной $45\ \mu\text{m}$ и отжигались при температуре 250°C в течение 1 h часа в вакууме. Длина рабочей части образцов составляла $1 \cdot 10^{-2}\ \text{m}$, ширина — $1.5 \cdot 10^{-3}\ \text{m}$. Образцы растягивали при постоянном напряжении при комнатной температуре и давлениях до 400 МПа. Методика испытаний описана в работе [9]. Время испытания при разных давлениях составляло около 10 min, величина растягивающего напряжения возрастала практически линейно, от 250 МПа при атмосферном давлении до 270 МПа при давлении 400 МПа. Для оценки числа пор на поверхности разрыва образцов, испытанных при разных давлениях, использовали сканирующую электронную микроскопию.

На рис. 1 представлена зависимость числа пор на поверхности разрыва образцов меди от величины давления, в условиях которых проводили испытания на ползучесть. Обнаружено, что поверхность разрыва в общем случае представляла собой комбинацию площадки отрыва, на которой и были выявлены поры, и области среза, не содержащие поры. С ростом давления доля площади отрыва уменьшалась, а доля разрушения срезом увеличивалась. Размер пор при всех давлениях составлял $1\text{--}2\ \mu\text{m}$; во всех ямках излома наблюдали включения из оксидов меди. Обработка данных рис. 1 показала, что с ростом давления число пор на поверхности разрыва экспоненциально уменьшается и при давлениях свыше 400 МПа разрушение происходит без образования пор.

Полученные данные позволяют заключить, что развитие разрушения в шейке тонких образцов Cu, при испытании на ползучесть, происходит на границе раздела частиц и матрицы. Высокое давление препятствует отслаиванию частиц.

Сопоставим полученные данные с данными, имеющимися в литературе. Наиболее полно влияние давления на процесс развития разрушения в шейке было

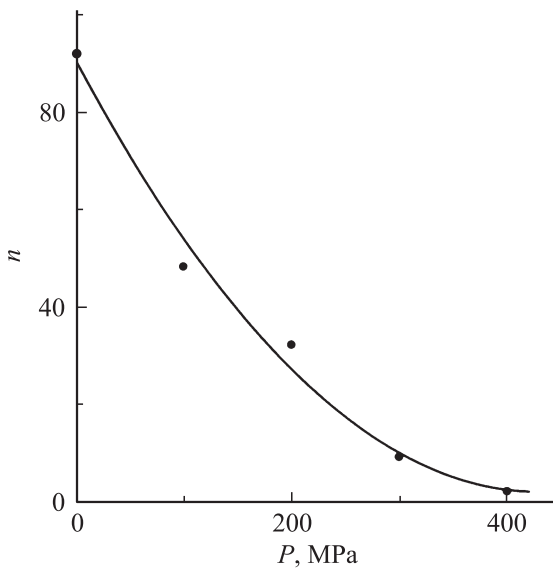


Рис. 1. Зависимость числа пор на поверхности разрыва образцов меди от величины всестороннего давления.

исследовано при растяжении цилиндрических образцов углеродистой стали 1045 с частицами карбида железа размером $\approx 2 \mu\text{m}$ [10].

На рис. 2, по данным [10], приведены результаты измерения плотности пор N в образцах, деформированных растяжением, при наложении разного по величине давления в зависимости от эффективной деформации $\bar{\epsilon} = 2 \ln(a_0/a)$ (a_0 — начальный радиус образца, a — радиус в минимальном сечении шейки). Обработка данных показала, что плотность пор также экспоненциально уменьшается с ростом величины всестороннего давления. Однако в отличие от меди эта зависимость выпол-

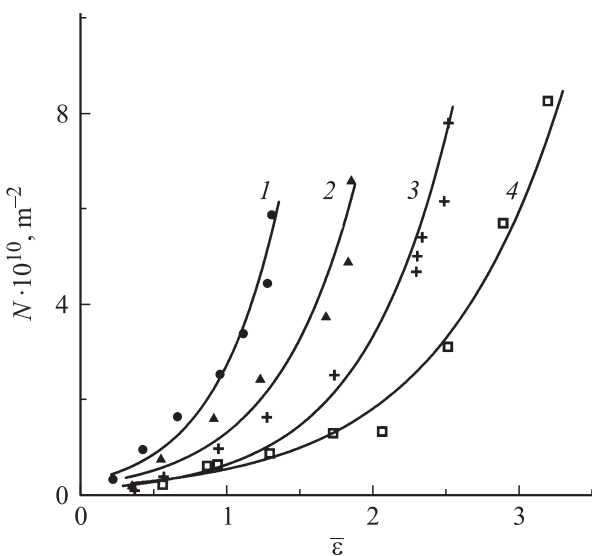


Рис. 2. Зависимость плотности пор в минимальном сечении шейки от эффективной деформации в шейке для стали 1045 при разных давлениях: 1 — 0.1, 2 — 345, 3 — 690, 4 — 1100 МПа (данные работы [10]).

няется не для разорванных образцов, а для образцов, деформированных при разных давлениях до одинакового значения величины эффективной деформации. Плотность пор на поверхности разрыва, как видно из данных рис. 2, даже несколько возрастает с ростом приложенного давления. Из приведенных в [10] данных следует, что с ростом давления размер пор уменьшается с $2.2 \mu\text{m}$ при давлении 0.1 МПа до $1.3 \mu\text{m}$ при $P = 1100$ МПа; в то же время общая площадь пор в минимальном сечении шейки остается постоянной и равной $3.5 \cdot 10^{-2}$. Следовательно, на поверхности излома цилиндрических образцов стали общее число пор не уменьшается, как в случае меди, а даже возрастает с ростом величины внешнего всестороннего давления.

Рассмотрим возможную причину различного поведения в условиях давления плоских тонких и образцов цилиндрической формы. В работах Бриджмена [4] и Давиденкова [11] было показано, что развитие разрушения в шейке однооснонагруженных цилиндрических образцов связано с появлением в шейке растягивающего всестороннего давления P_{HT} . Величина этого давления зависит от эффективного растягивающего напряжения $\bar{\sigma}$, радиуса (a) в минимальном сечении шейки и радиуса кривизны контура шейки R :

$$P_{HT} = \bar{\sigma} \ln(1 + a/2R). \quad (2)$$

Величина $\bar{\sigma}$, определенная как

$$\bar{\sigma} = T \cdot \beta, \quad (3)$$

где $T = F/\pi/a^2$, F — приложенная осевая растягивающая нагрузка, β — поправочный коэффициент Бриджмена:

$$\beta = \frac{1}{(1 + \frac{2R}{a}) \ln(1 + \frac{a}{2R})}. \quad (4)$$

Среднее напряжение Σ , равное одной трети суммы трех главных компонент напряжения, записывается в виде [10]

$$\Sigma = \frac{1}{3} \bar{\sigma} + P_{HT} - P \quad (5)$$

и имеет также смысл среднего общего гидростатического давления в шейке. Согласно предположению Бриджмена [4], величина Σ должна определять разуплотнение, возникающее в минимальном сечении шейки.

Из выражения (5) следует, что если внешнее сжимающее давление P компенсирует суммарную компоненту растягивающего давления, равную $1/3 \bar{\sigma} + P_{HT}$, то величина Σ будет равна нулю и можно ожидать, что в отсутствие растягивающего давления поры в шейке развиваться не будут, и разрушение образца будет проходить не путем отрыва, а путем среза. Такую картину разрушения наблюдал Бриджмен в разорванном при всестороннем давлении 2750 МПа образце высокопрочной стали, предварительно обработанной до твердости $HRC = 60$ [4]. При деформации $\bar{\epsilon} = 1.15$ величина $\Sigma = 0$, отношение a/R также равно нулю, что соответствует разрушению срезом.

Переход от разрушения механизмом, связанным с образованием и коалесценцией пор, к механизму интенсивной пластической деформации, приводящему к разрушению срезом, наблюдали также и для цилиндрических образцов чистой меди при внешнем давлении свыше 300 МПа [12], а также для образцов меди и латуни в виде пластин толщиной $7 \cdot 10^{-4}$ м [13]. При низких давлениях поверхность разрушения была плоской и покрытой ямками; при давлениях свыше 400 МПа поры отсутствовали, а шейка сходила на „нож“. Причина изменения механизма разрушения в меди и латуни с ростом давления в работе [13] не рассматривалась.

Исходя из приведенных данных, рассмотрим связь развития пористости в стали 1045 с логарифмической деформацией в шейке и величиной среднего общего напряжения Σ .

На рис. 3, по данным [10], приведена зависимость напряжения Σ от эквивалентной деформации $\bar{\epsilon}$ при разных величинах внешнего всестороннего давления. Исходя из выше приведенных данных, можно ожидать, что развитие пористости будет проходить только при положительных (область всестороннего растяжения) значениях Σ , а в области отрицательных значений Σ (всестороннее сжатие) поры образовываться не будут. Используя данные, приведенные на рис. 2 и 3, была построена зависимость плотности пор N от величины напряжения Σ (рис. 4). Видно, что большая часть пор, действительно, возникает в области всестороннего растяжения (при положительных значениях Σ) и лишь незначительная часть — в области всестороннего сжатия. Зарождение пор в области сжатия может быть связано с разрушением самих включений, например, при их пересечении полосами интенсивной пластической деформации. Такой механизм разрушения эллиптических включений оксидов меди, ориентированных в направлении прокатки, отмечен в работе [12]. Наблюдается также разная зависимость N от Σ : в области отрицательных значений Σ с ростом

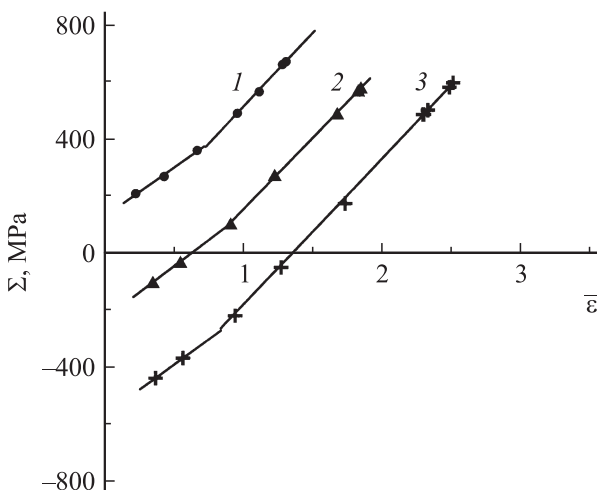


Рис. 3. Зависимость среднего напряжения в шейке от эффективной деформации при растяжении образцов стали 1045 при разных давлениях. Обозначения те же, что и на рис. 2.

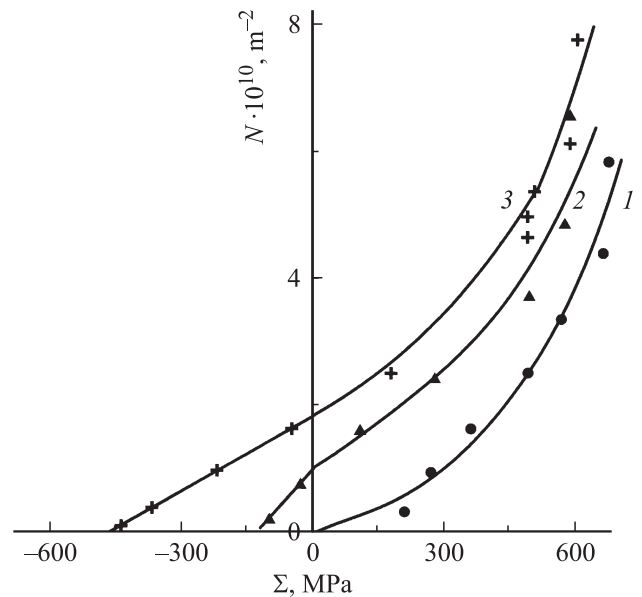


Рис. 4. Зависимость плотности пор от величины среднего напряжения в шейке для образцов стали 1045, испытанных при разных давлениях. Обозначения те же, что и на рис. 1–3.

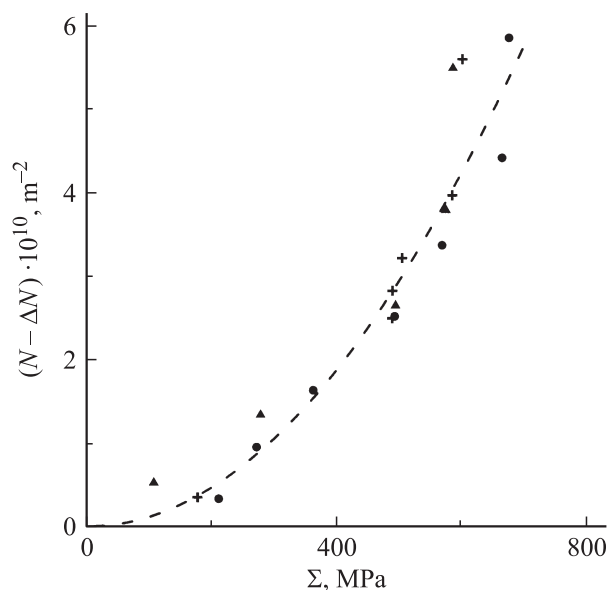


Рис. 5. Зависимость плотности пор в минимальном сечении шейки образцов стали 1045 от величины среднего растягивающего гидростатического давления. Штрихами показана зависимость (6).

величины Σ плотность пор возрастает по линейному закону. В области положительных значений Σ наблюдаемая зависимость приближенно может быть описана параболой

$$(N - \Delta N) \approx \alpha \Sigma^2, \tag{6}$$

где ΔN — плотность пор при $\Sigma = 0$, α — коэффициент, равный $1.2 \cdot 10^4 \text{ m}^{-2} \text{ MPa}^{-2}$. Достаточность такого приближения видна из результатов, приведенных на рис. 5.

Таким образом, рассмотренные данные показывают, что величина среднего общего напряжения Σ является основной характеристикой напряженного состояния, которая определяет кинетику развития пористости в шейке одноосно нагруженного материала в форме цилиндрического стержня. Известно, что в тонкой полосе нагруженного металла локализация пластического течения и начало шейкообразования следуют тому же критерию (1), что и в стержне, однако утонение в шейке вдвое меньше, чем в шейке круглого сечения, где уменьшение поперечного сечения определяется большим числом компонент деформации [1]. Последующее разрушение в тонких образцах меди, как было показано выше, как и в стержнях, происходит путем отслоения включений от матрицы, поэтому вывод о роли среднего гидростатического растяжения может быть использован не только для стержней, но и для нагруженных тонких полос. С этой точки зрения можно полагать, что наблюдаемое при растяжении под давлением тонких образцов меди уменьшение числа пор и переход от разрушения отрывом к разрушению срезом при давлениях, больших 400 МПа, связаны с уменьшением до нуля величины среднего растягивающего напряжения Σ .

Авторы выражают благодарность Г.А. Малыгину за обсуждение результатов и ценные замечания.

Список литературы

- [1] Макклиток Ф. Пластические аспекты разрушения. / В кн.: Разрушение. Т. 3. / Под ред. Либович Г. М.: Мир, 1967. 796 с.
- [2] Малыгин Г.А. // ФТТ. 2005. Т. 47. Вып. 2. С. 236–241.
- [3] Малыгин Г.А. // ФТТ. 2005. Т. 47. Вып. 5. С. 870–875.
- [4] Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М.: ИЛ, 1955. 362 с.
- [5] Bringa E.M., Traiviratana S., Meyers M.A. // Acta Mater. 2010. Vol. 58. N 8. P. 4458–4477.
- [6] Петров А.И. и др. // ФТТ. 1970. Т. 12. Вып. 9. С. 2587–2591.
- [7] Петров А.И. и др. // ФММ. 1972. Т. 34. Вып. 1. С. 39–47.
- [8] Петров А.И. и др. // Заводская лаборатория. 1970. Вып. 8. С. 1004–1006.
- [9] Brandes M. Mechanical behavior of metals under pressure. Amsterdam: Elsevier, 1970. 236 p.
- [10] Brownrigg A., Spitzig A. et al. // Acta Metall. 1983. Vol. 31. N 8. P. 1141–1150.
- [11] Давиденков Н.Н., Спиридонова Н.И. // Заводская лаборатория. 1945. Т. 11. Вып. 6. С. 583–593.
- [12] Franch I.E., Weinrich P.F. // Metall. Trans. A. 1975. Vol. 6. N 4. P. 785–790.
- [13] Weinrich P.F., Franch I.E. // Acta Metall. 1976. Vol. 24. N 4. P. 317–322.