

05;01

## Неустойчивость пластического течения в сплаве циркония

© Т.М. Полетика, Г.Н. Нариманова, С.В. Колосов

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск  
E-mail: poletm@ispms.tsc.ru

Поступило в Редакцию 20 июня 2005 г.

Обнаружена неустойчивость пластического течения на параболической стадии деформационного упрочнения сплава циркония в виде периодического изменения пространственно-временной картины распределения локальных деформаций. Предложена синергетическая модель наблюдаемого процесса, основанная на представлении эволюции пластического течения на завершающей стадии как неустойчивого предельного цикла.

Экспериментально установлено [1,2], что в процессе деформации моно- и поликристаллических материалов возможно возникновение как волновых, так и стационарных пространственно-временных картин локализации, причем появление любой из них однозначно определено режимом пластического течения и законом деформационного упрочнения, действующим на соответствующей стадии деформационного процесса. Исследования показали [3,4], что стационарная картина локализации деформации, характеризующаяся постоянным пространственным периодом  $\lambda$ , типична только для той части параболической стадии  $\sigma \sim \epsilon^n$ , где показатель параболичности  $n \geq 0.5$ . Для параболических подстадий с  $n < 0.5$  характерно движение очагов локализации деформации с изменением  $\lambda$ , продолжающееся вплоть до конца параболической стадии [3–5].

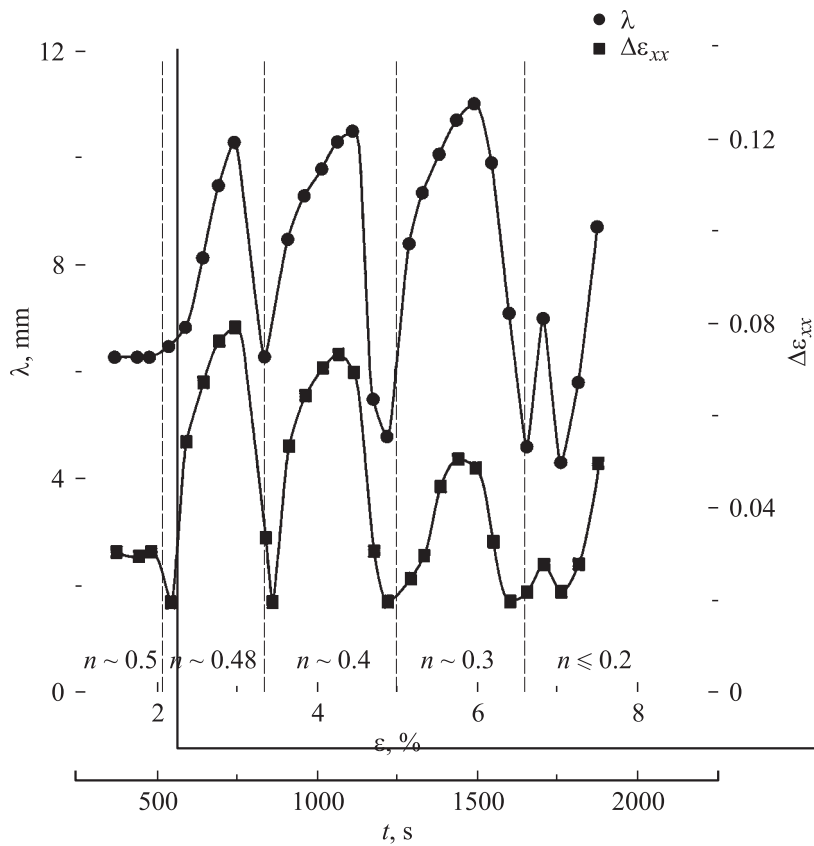
Настоящая работа посвящена исследованию закономерностей развития локализации на параболической стадии пластического течения и стадии предразрушения технического сплава циркония (Zr — 1%Nb — 1.3%Sn — 0.4%Fe) в условиях одноосного растяжения, которые приводят к неустойчивости пластической деформации с последующим образованием шейки. Знание закономерностей возникновения и развития макролокализации пластической деформации, приводящих к потере устойчивости пластического течения и разрушению при пластическом формоизменении, имеет большое практическое

значение, в частности для оценки запаса технологической пластичности циркониевых сплавов, которые подвергаются большим деформациям в процессе получения готовых изделий [6].

Для выявления характера эволюции пространственно-временного распределения деформации в образце методом спеклинтерферометрии [1] исследовали локальную деформацию в очагах макролокализации непосредственно в процессе пластического течения. Определяли как интегральную величину локальной деформации удлинения путем суммирования компоненты  $\epsilon_{xx}$  тензора пластической дисторсии по площади, занимаемой очагом локализации, так и величину локального прироста деформации  $\Delta\epsilon_{xx}$  в этом очаге. При этом суммирование значений  $\epsilon_{xx}$  на параболической стадии нагружения позволило выделить три зоны интенсивной локализации деформации. В этих зонах определяли прирост локального удлинения  $\Delta\epsilon_{xx}$  как разность интегральных величин  $\epsilon_{xx}$  через каждые 0.2% общей деформации. Оказалось, что с развитием деформации интегральная величина  $\epsilon_{xx}$  быстрее возрастает в одной из зон локализации, которая трансформируется в очаг предразрушения, а затем в шейку. Подобная эволюция локализации деформации, сопровождающаяся возникновением нескольких „неактивных“ шеек, одна из которых с развитием деформации становилась „активной“ (устойчивой), наблюдалась в [6] при растяжении сплавов In–Pb.

Анализ картин локализации пластической деформации, соответствующих различным подстадиям параболической кривой, показал, что при  $n \geq 0.5$  величина  $\lambda$  постоянна, а при  $n < 0.5$  расстояние между очагами локализации периодически меняется с развитием деформации (рис. 1). Также в ходе экспериментальных исследований была выявлена следующая закономерность: периодическое изменение пространственного периода макролокализации деформации  $\lambda$  коррелирует с периодическим изменением прироста локального удлинения  $\Delta\epsilon_{xx}$  в очагах интенсивной локализации деформации. На рис. 1 приведена зависимость прироста локального удлинения  $\Delta\epsilon_{xx}$  для очага локализации, на основе которого формируется шейка.

Поскольку пространственный период локализации деформации  $\lambda$  есть расстояние между активными очагами локализации деформации [1], то можно полагать, что величина  $N = L/\lambda$ , где  $L$  — длина рабочей части образца, в общем случае соответствует числу очагов локализации в образце. Тогда ясно, что уменьшение количества очагов локализации  $N$  сопровождается интенсивным накоплением в них



**Рис. 1.** Зависимости пространственного периода локализации деформации  $\lambda$  и прироста локального удлинения  $\Delta\varepsilon_{xx}$  в области очага предразрушения от общей деформации сплава циркония.

локальной деформации, иначе говоря, малому числу  $N$  соответствует большая интенсивность локализации деформации  $\Delta\varepsilon_{xx}$ .

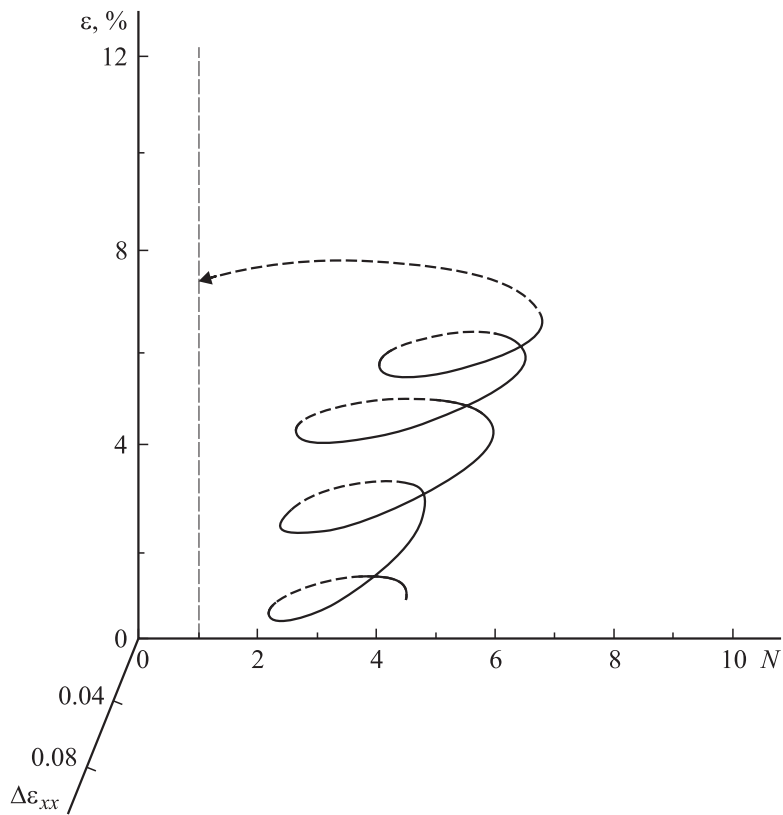
Полученные данные указывают на то, что именно согласованное периодическое изменение пространственного периода локализации деформации  $\lambda$  и интенсивности деформации в очагах локализации  $\Delta\varepsilon_{xx}$  определяет неустойчивость процесса пластического течения на парабо-

лической стадии деформационной кривой сплава циркония, которая сопровождается формированием одного очага локализации деформации — будущей шейки.

Результаты, полученные в данной работе, соответствуют представлениям о пространственно-временной цикличности процесса локализации пластической деформации [7,8], согласно которым наблюдаемая неустойчивость пластического течения является следствием локального увеличения скорости деформации, приводящего к локальному упрочнению в зоне локализации. Соответствующий рост напряжения течения в этом месте сопровождается торможением локализации деформации и дальнейшим более однородным формоизменением образца. Один подобный цикл упрочнения-разупрочнения в нашем случае соответствует одной из подстадий параболической кривой с  $n < 0.5$ .

Представленная на рис. 1 зависимость  $\lambda(t)$  характерна для жесткого типа потери устойчивости, когда система скачкообразно переходит от стационарного режима к колебательному квазипериодическому режиму, соответствующему предельному циклу [9]. Развитие картины локализации деформации в этом случае можно изобразить в виде траектории в фазовом пространстве, перемещение изображающей точки по которой соответствует временной эволюции деформируемой системы (рис. 2). Эта траектория отображает геометрическую связь между параметрами  $\Delta\varepsilon_{xx}$  и  $N$  в зависимости от степени пластической деформации (времени). Из рис. 2 следует, что с ростом общей деформации система эволюционирует по одному из витков спирали, при этом плотность очагов локализации деформации  $N$  сначала уменьшается в результате их объединения, а затем снова возрастает. При этом интенсивность локализации деформации  $\Delta\varepsilon_{xx}$  в очагах сначала увеличивается, а затем уменьшается за счет перераспределения локальной деформации между вновь возникающими дополнительными зонами локализации, что соответствует более равномерному формоизменению образца. Один виток спирали соответствует подстадии параболической кривой с  $n < 0.5$  и является этапом локализации пластического течения исследуемого сплава. Установившийся колебательный режим является неустойчивым, так как траектория сходится к предельному циклу [9], стремясь к точке, соответствующей одному очагу локализации — шейке (рис. 2).

Устойчивость пластического течения по фазовой траектории зависит от характера деформационного упрочнения и ресурса пластичности материала. Так, для многих пластичных материалов деформационная



**Рис. 2.** Фазовая траектория эволюции локализации деформации в сплаве циркония.

кривая ограничивается параболической стадией с  $n \approx 0.5$ , в конце которой наблюдается увеличение амплитуды одного из стационарных очагов локализации с последующей трансформацией его в шейку [2]. В том случае, если на параболической стадии существует хотя бы одна подстадия с  $n < 0.5$ , возможен один цикл периодического изменения  $\lambda$ , как это наблюдалось в поликристаллическом сплаве Fe–Si [10].

Полученные в настоящей работе экспериментальные данные позволяют сделать заключение о том, что эволюция неравновесной

системы на завершающих стадиях процесса пластического течения характеризуется потерей устойчивости с образованием предельного цикла, устойчивость которого определяется способностью материала к пластическому формоизменению.

## Список литературы

- [1] Zuev L.B. // Ann. Phys. 2001. V. 10. N 11–12. P. 965–984.
- [2] Зуев Л.Б., Данилов В.И., Семухин Б.С. // Усп. физ. мет. 2002. Т. 3. В. 3. С. 237–304.
- [3] Полетика Т.М., Данилов В.И., Нариманова Г.Н. и др. // ЖТФ. 2002. Т. 79. В. 9. С. 57–62.
- [4] Zuev L.B., Danilov V.I., Poletika T.M., Varannikova S.A. // Int. J. Plasticity. 2004. V. 20. N 5. P. 1227–1249.
- [5] Зуев Л.Б., Полетика Т.М., Нариманова Г.Н. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 12. С. 74.
- [6] Wray P.J. // J. Appl. Phys. 1970. V. 41. N 8. P. 3347–3352.
- [7] Пресняков А.А. Локализация пластической деформации. М.: Машиностроение, 1983. 56 с.
- [8] Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1994. 256 с.
- [9] Арнольд В.И. Теория катастроф. М.: УРСС, 2004. 128 с.
- [10] Баранникова С.А., Данилов В.И., Зуев Л.Б. // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 10. С. 52–56.