

УДК 660.539.382.2

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ШЕЙКИ В СПЛАВАХ ЦИРКОНИЯ

Т. М. Полетика, С. В. Колосов,
Г. Н. Нариманова, А. П. Пшеничников

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021 Томск
E-mail: poletm@ispms.tsc.ru

Исследованы закономерности макролокализации пластической деформации на параболической стадии деформационного упрочнения циркониевых сплавов Э635 и циркалой-2. Обнаружена неустойчивость пластического течения, которая проявляется в периодическом изменении пространственно-временной картины распределения локальных деформаций, наблюдаемой с использованием метода спеклинтерферометрии. Полученные результаты обсуждаются в рамках синергетической модели эволюции пластического течения на его завершающей стадии.

Ключевые слова: сплавы циркония, деформация, локализация, неустойчивость, разрушение.

Введение. Известно, что макролокализация сопровождает процесс пластического течения на всех его стадиях [1, 2]. К настоящему времени установлено, что в процессе деформирования моно- и поликристаллов возможно возникновение как волновых, так и стационарных пространственно-временных картин макролокализации пластической деформации. Появление любой из них определено законом деформационного упрочнения, действующим на соответствующей стадии деформирования [1, 2].

В данной работе исследуются закономерности развития локализации пластической деформации на параболической стадии пластического течения и стадии предразрушения в образцах из промышленных сплавов циркония Э635 (Zr — 1 % Nb — 1,3 % Sn — 0,4 % Fe) и циркалой-2 (Zr — 1,2 % Sn — 0,5 % Fe + Ni + Cr), применяемых для изготовления труб теплоделяющих элементов ядерных реакторов [3].

Ранее установлено, что кривые течения циркониевых сплавов сразу за пределом текучести аппроксимируются параболой $\sigma \sim \varepsilon^n$, где n — показатель параболичности [4–6]. Стадию деформирования, соответствующую этой параболе, будем называть параболической. Параболическая стадия имеет сложный характер, и соответствующая ей деформационная кривая разделяется на несколько участков, которые аппроксимируются параболами с уменьшающимся показателем параболичности, принимающим значения в интервале от 0,1 до 0,7. Наименьшее значение n соответствует началу формирования видимой макроскопической шейки. Особый интерес вызывает наблюдаемая при этом эволюция пространственно-временных картин локализации пластической деформации [4–6]. Так, устойчивая стационарная картина локализации деформации с постоянным пространственным периодом λ типична только для той стадии деформирования, которой соответствуют зависимости $\sigma \sim \varepsilon^n$ с показателем $n \geq 0,5$. Для участков параболической кривой деформирования с $n < 0,5$ характерно движение очагов локализации деформации с изменением пространственного периода, сопровождающееся периодическим накоплением деформации

в одном очаге локализации, который к концу параболической стадии трансформируется в шейку.

Физические причины наблюдаемой эволюции локализации на завершающей стадии пластического течения сплавов циркония остаются неясными, поэтому особенности локализации деформации, приводящие к потере устойчивости пластического течения и разрушению, требуют детального исследования. Знание закономерностей возникновения и развития локализации пластической деформации, приводящих к разрушению при пластическом формоизменении, имеет большое практическое значение, в частности, при оценке запаса технологической пластичности циркониевых сплавов, которые подвергаются большим деформациям в процессе получения готовых изделий [3].

1. Материалы и методика эксперимента. Исследовались сплавы Zr — 1 % Nb — 1,3 % Sn — 0,4 % Fe (Э635) и Zr — 1,2 % Sn — 0,5 % Fe + Ni + Cr (циркалой-2) в рекристаллизованном состоянии. Сплав Э635 состоял из зерен α -Zr (средний размер зерна около 4 мкм) с дисперсными включениями внутри зерен и на их границах интерметаллидов Fe_2Zr , Nb_2Zr , Zr_3Fe со средним размером 0,08 мкм, а сплав циркалой-2 — из рекристаллизованных зерен α -Zr размером порядка 6 мкм с распределенными по объему выделениями интерметаллидов $\text{Zr}(\text{Fe},\text{Cr})_2$, $\text{Zr}_2(\text{Fe},\text{Ni})$, $\text{Zr}_2(\text{Fe},\text{Cr})$ размером порядка 0,15 мкм.

Плоские образцы с размерами рабочей части $42 \times 5 \times 2$ мм растягивались на испытательной машине Instron-1185 при скорости перемещения подвижного захвата 0,1 мм/мин ($\dot{\epsilon} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$). Одновременно с записью диаграммы деформации методом спеклинтерферометрии [1, 2] фиксировалось поле векторов смещений точек на поверхности образцов $\mathbf{r}(x, y)$. Численным дифференцированием этого поля могут быть получены все компоненты тензора пластической дисторсии $\beta_{i,j} = \nabla \mathbf{r}$. Далее приводятся данные о распределениях только одной компоненты — локальной деформации $\varepsilon_{xx} = \partial u / \partial x$ (u — проекция вектора \mathbf{r} на ось растяжения x).

Для выявления характера эволюции пространственно-временного распределения деформации в образце методом спеклинтерферометрии исследовалась локальная деформация в очагах макролокализации непосредственно в процессе пластического течения. Определялись как интегральная величина локальной деформации удлинения путем суммирования компоненты ε_{xx} тензора пластической дисторсии по площади, занимаемой очагом локализации (рис. 1), так и прирост локальной деформации $\Delta \varepsilon_{xx}$ в этом очаге. При этом суммирование значений ε_{xx} на параболической стадии нагружения позволило выделить зоны интенсивной локализации деформации. В этих зонах определялся прирост локально-

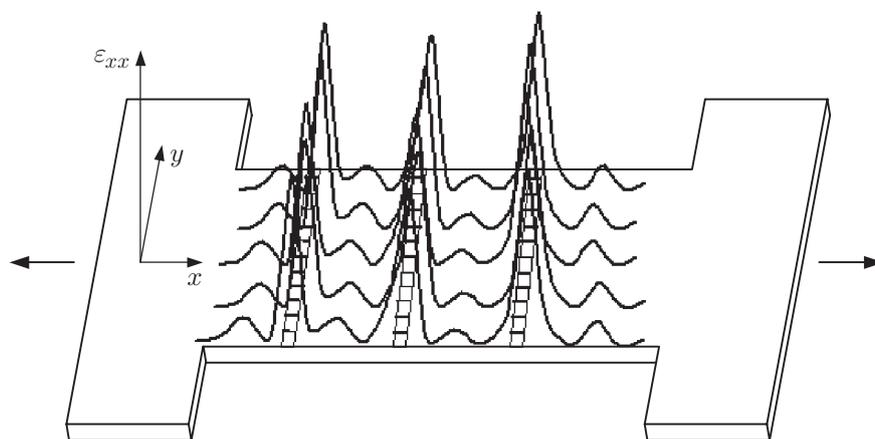


Рис. 1. Схема определения локальных деформаций в очагах локализации пластического течения при растяжении образцов (заштрихованные области — очаги локализации)

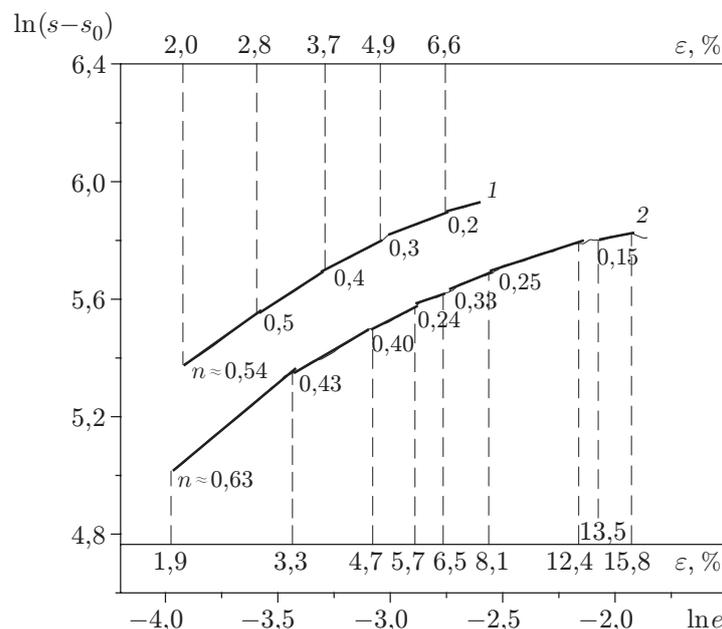


Рис. 2. Кривые пластического течения сплавов Э635 (1) и циркалой-2 (2) в логарифмических координатах

го удлинения $\Delta \varepsilon_{xx}$ как разность интегральных величин ε_{xx} через каждые 0,2 % общей деформации.

Количественной характеристикой картины макролокализации пластического течения является пространственный период локализации деформации λ — расстояние между соседними очагами локализации деформации. Для его более точного определения использовался спектральный анализ наблюдаемых распределений компоненты ε_{xx} тензора пластической дисторсии.

2. Результаты и обсуждение. Использование логарифмических координат $\ln(s - s_e) - \ln e$ позволило разбить каждую параболическую деформационную кривую на ряд прямолинейных участков с постоянно уменьшающимся показателем параболичности n (рис. 2). Кривая пластического течения заканчивается участком с n , стремящимся к нулю, соответствующим стадии развития видимой шейки (на рис. 2 не показан).

Особенность эволюции локализации деформации на стадии, соответствующей параболической кривой деформирования циркониевых сплавов, установленная ранее [4–6], заключается в следующем: при $n \geq 0,5$ система очагов локализации пластической деформации стационарна, а при $n < 0,5$ начинается движение очагов локализации деформации, и это движение продолжается вплоть до окончания параболической стадии.

Детальное изучение количественных параметров пространственно-временных картин макролокализации на параболической стадии пластического течения исследуемых сплавов позволило установить следующую закономерность: пространственный период локальных неоднородностей деформации λ зависит от показателя параболичности n . Так, на стадии деформирования, соответствующей участкам параболической кривой, где $n \geq 0,5$, величина λ остается постоянной. Это согласуется с результатами измерения периода локализации деформации, полученными ранее для стадии, соответствующей параболической кривой нагружения моно- и поликристаллических материалов [1, 2]. Однако далее, на стадиях деформирования исследуемого сплава, соответствующих участкам параболической кривой с $n < 0,5$, величина пространственного периода не остается постоянной. Анализ картин локализации пластической деформации, соответствующих участкам параболической кри-

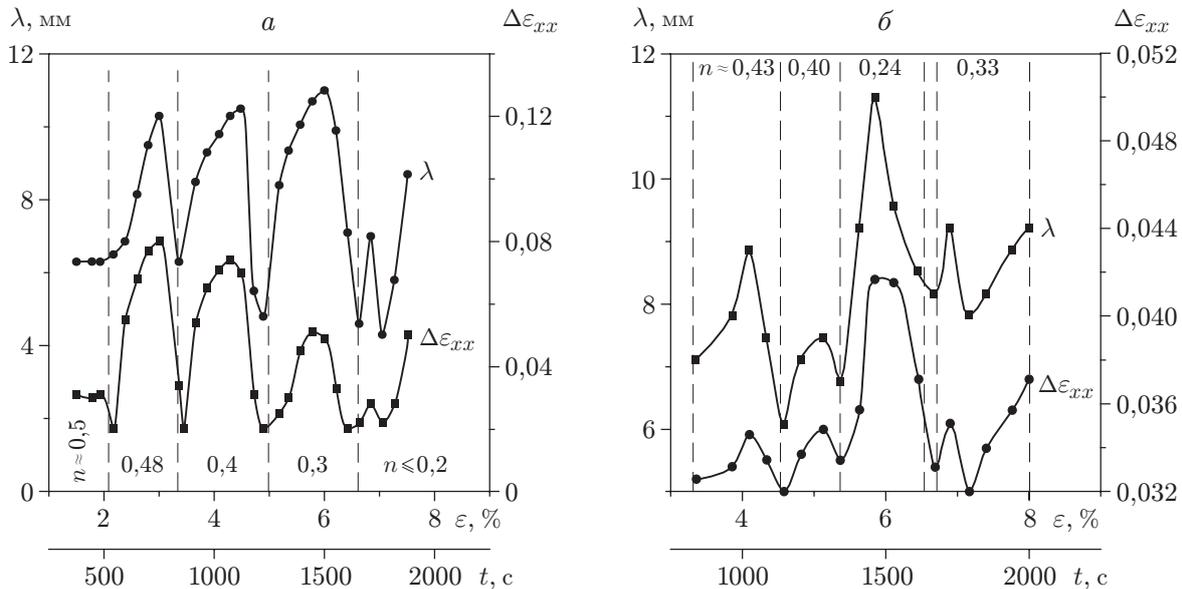


Рис. 3. Зависимости пространственного периода локализации деформации λ и прироста локального удлинения $\Delta\varepsilon_{xx}$ в области очага предразрушения от общей деформации сплавов Эб35 (а) и циркалой-2 (б)

вой с показателем параболичности, изменяющимся в интервале от 0,5 до 0,1, показал, что с развитием деформации λ меняется периодически. На рис. 3 приведены зависимости пространственного периода локализации λ и величины $\Delta\varepsilon_{xx}$ на параболической стадии от степени общей деформации для исследуемых сплавов. Следует отметить, что период изменения λ коррелирует с продолжительностью стадий, соответствующих участкам параболической кривой (см. рис. 2).

В результате суммирования значений локальной деформации удлинения ε_{xx} по всему образцу на параболической стадии нагружения удалось выделить три области локализации деформации, для которых интегральная величина локального удлинения ε_{xx} выше, чем по образцу в целом. Расстояние между этими зонами составляет примерно 0,8 см для обоих сплавов. Оказалось, что с развитием деформации величина ε_{xx} быстрее увеличивается в одном из очагов локализации, который трансформируется в очаг предразрушения, а затем и в шейку. Подобная эволюция локализации деформации, сопровождающаяся возникновением нескольких “неактивных” шеек, одна из которых с развитием деформации становилась “активной” (устойчивой), наблюдалась при растяжении образцов из сплавов In-Pb [7].

Сопоставление зависимостей прироста локального удлинения $\Delta\varepsilon_{xx}$ и пространственного периода неоднородностей λ от величины общей деформации на параболической стадии позволило выявить следующую закономерность: периодическое увеличение λ сопровождается периодическим накоплением деформации в рассматриваемом очаге локализации пластического течения. На рис. 3 показан характер изменения величины $\Delta\varepsilon_{xx}$ для того очага локализации, на основе которого формируется шейка.

Следует отметить, что аналогичная периодическая зависимость $\Delta\varepsilon_{xx}$ от степени общей деформации наблюдается и для двух других зон интенсивной локализации деформации, однако приросты локального удлинения в них на стадиях деформирования, соответствующих параболам с $n < 0,3$, постепенно уменьшаются, до тех пор пока не устанавливается один очаг локализации пластического течения, соответствующий образующейся шейке.

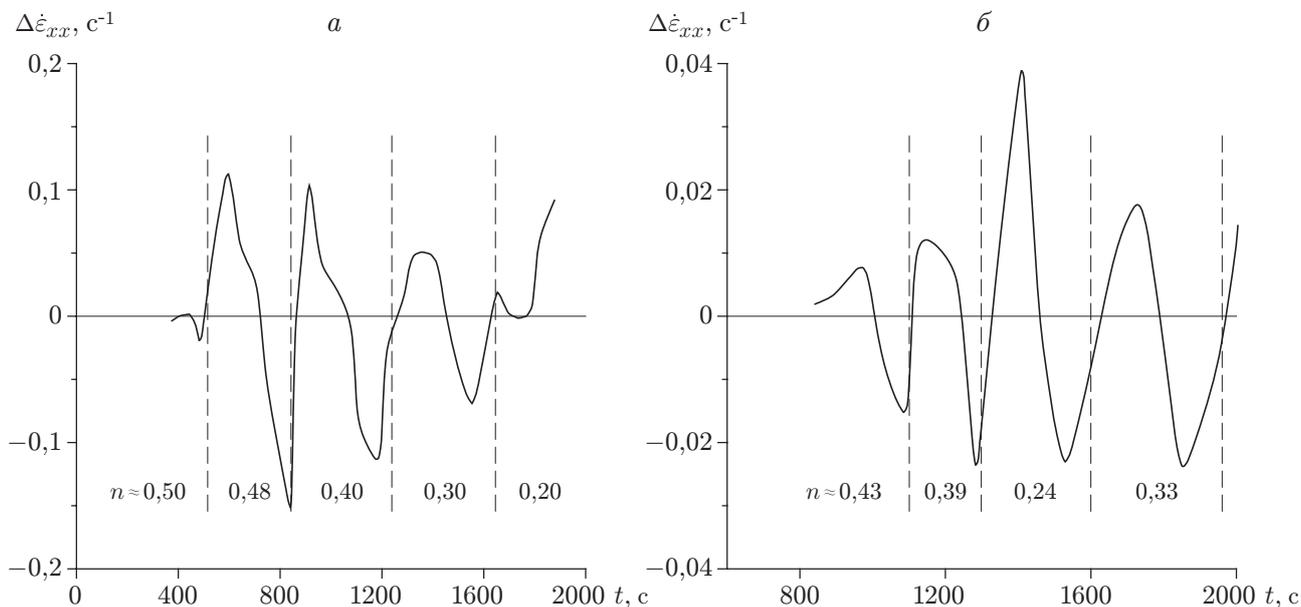


Рис. 4. Распределение скорости локализации $\Delta\dot{\epsilon}_{xx}$ на параболической стадии деформирования образцов из сплавов Э635 (а) и циркалой-2 (б)

На рис. 4 показано распределение скорости локализации $\Delta\dot{\epsilon}_{xx}$ (скорости изменения прироста локальной деформации $\Delta\epsilon_{xx}$ в единицу времени в рассматриваемом очаге) на параболической стадии пластического течения сплавов Э635 и циркалой-2. Наблюдается колебательное изменение скорости локализации в режиме упрочнение-разупрочнение, которое можно объяснить с позиций механики деформирования сплошных сред. Действительно, вследствие локального увеличения скорости деформации, приводящего к увеличению локального упрочнения в очаге локализации, соответствующий рост напряжения течения в этом месте сопровождается торможением локализации деформации и дальнейшим более однородным формоизменением образца. В результате наблюдается цикл упрочнение-разупрочнение, причем в данном случае такой цикл соответствует одному из участков параболической кривой с $n < 0,5$ (см. рис. 4). Подобное поведение материала характерно для сверхпластического течения [8].

Величина пространственного периода локализации деформации соответствует расстоянию между очагами локализации деформации вдоль оси растяжения, поэтому величина $N = \lambda/L$ (L — длина рабочей части образца) в общем случае есть число очагов локализации в образце. Следовательно, в процессе деформации на параболической стадии наряду с λ периодически изменяется и количество зон локализации деформации N в образце. Следует ожидать, что уменьшение количества очагов локализации (или увеличение λ) сопровождается накоплением в них локальной деформации ϵ_{xx} . Анализ характера изменения картин пространственно-временного распределения компонент локального удлинения для обоих сплавов позволил выявить механизм процесса накопления пластической деформации в зонах интенсивной локализации. Схема, иллюстрирующая данный процесс для сплава циркалой-2, представлена на рис. 5 (стрелками показано направление перемещений очагов локализации деформации при изменении λ). На рис. 5, а приведены картины распределения локальных удлинений ϵ_{xx} при различных значениях общей деформации на стадии деформирования, соответствующей параболической кривой с $n \approx 0,3$ для одного цикла изменения пространственного периода λ (см. рис. 3, б). Видно, что увеличение λ сопро-

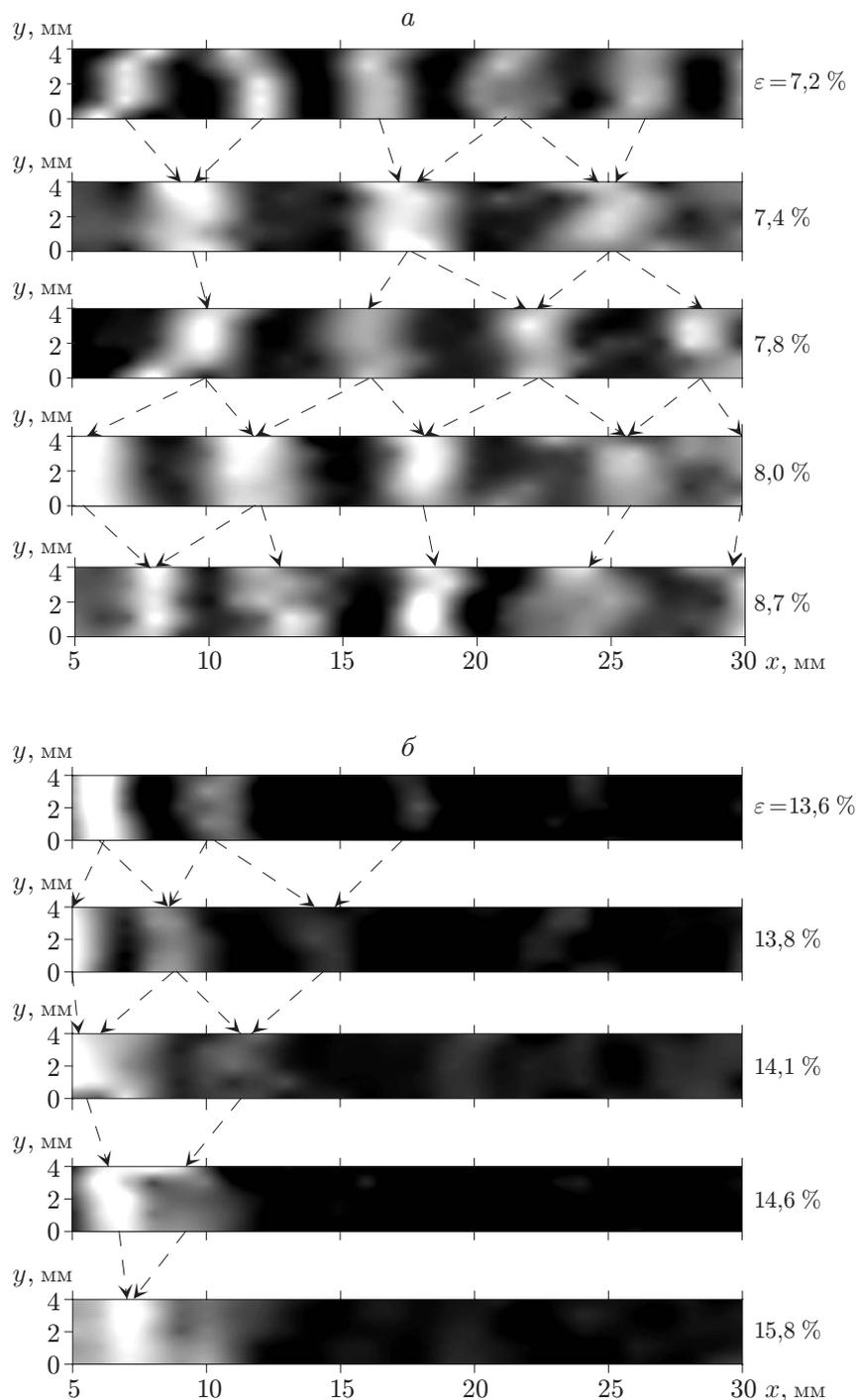


Рис. 5. Эволюция картин локализации пластической деформации на стадиях деформирования образца из сплава циркалой-2, соответствующих участкам параболической кривой нагружения с $n \approx 0,3$ (а) и $n \approx 0,1$ (б)

вождается объединением очагов локализации, что обуславливает накопление деформации в ряде зон локализации (см. рис. 3,б), а при уменьшении λ происходит формирование новых очагов локализованной деформации меньшей интенсивности. На рис. 5,б показана эволюция картин пространственного распределения очагов локализации деформации на стадии предразрушения образца, соответствующей участку параболической кривой с $n \approx 0,1$. Видно, как формируется один очаг локализации деформации, соответствующий шейке, которая на данной стадии обнаруживается визуально.

Следует отметить, что результаты настоящей работы соответствуют представлениям о пространственно-временной цикличности процесса локализации пластической деформации, согласно которым развитая пластическая деформация всегда происходит неоднородно, что обусловлено чередованием процессов упрочнения и релаксации в локальных объемах материала [9, 10]. Известно, что взаимосвязанные коллективные эффекты на мезо- и макромасштабном уровнях могут приводить к установлению колебательного режима, в ходе которого наблюдаются периодические изменения дефектной структуры и механических характеристик материалов [11]. Кроме того, исследования процессов локализации и неустойчивости пластического течения, проведенные в работах [7, 12], позволили зафиксировать циклический характер пространственно-временного процесса эволюции распределений локальных деформаций, сопровождающегося возникновением в материале колебательного процесса типа упрочнение-разупрочнение. Согласно [12] этот процесс обуславливает периодическое образование в образце областей локально разупрочненного материала — “бегающих шеек” — задолго до возникновения устойчивой шейки и последующего разрушения.

Представленные в настоящей работе данные позволяют сделать вывод, что именно согласованное периодическое изменение пространственного периода локализации деформации λ и прироста деформации в очагах локализации $\Delta\varepsilon_{xx}$ определяет неустойчивость процесса пластического течения на параболической стадии деформирования образца из сплава циркония, которая сопровождает формирование одного очага локализации — будущей шейки.

Использование некоторых идей синергетического подхода к эволюции диссипативных структур в процессе развития деформации [13, 14] позволяет объяснить наблюдаемую перестройку пространственно-временных картин локализации деформации на параболической стадии пластического течения сплавов циркония. Можно полагать, что перестройка стационарного режима, установившегося на стадии, соответствующей участку параболической кривой с $n \approx 0,5$, означает потерю устойчивости текущего равновесия, в результате чего возникает новый периодический режим, называемый предельным циклом. Представленная на рис. 3 периодическая зависимость $\lambda(t)$ характерна для так называемого жесткого типа потери устойчивости, когда система скачкообразно переходит от стационарного режима к колебательному [14]. В этом случае развитие картины локализации деформации можно представить в виде траектории в фазовом пространстве, перемещение изображающей точки по которой соответствует временной эволюции деформируемой системы. Эта траектория дает геометрическую связь между параметрами $\Delta\varepsilon_{xx}$ и N в зависимости от степени пластической деформации (времени). На рис. 6 приведены фазовые траектории, соответствующие локализации деформации для сплавов Э635 и циркалой-2. Видно, что по окончании стадии, соответствующей участку параболической кривой с $n \approx 0,5$, фазовая кривая образует неустойчивый предельный цикл [13, 14]. 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 возрастает.

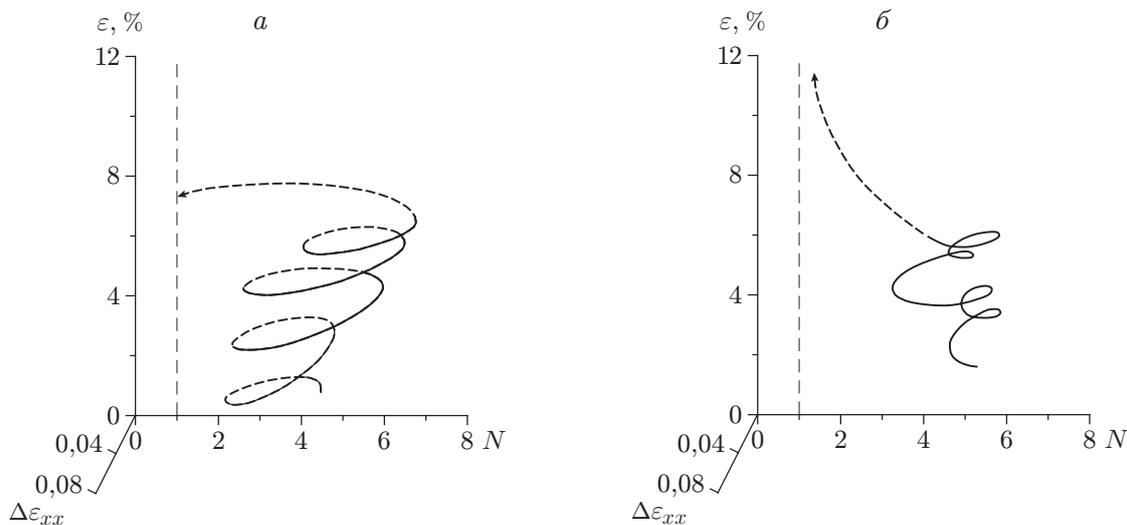


Рис. 6. Фазовая траектория эволюции локализации деформации в сплавах Э635 (а) и циркалой-2 (б) (штриховая линия — предельное состояние системы, соответствующее шейке)

В ходе такой эволюции интенсивность локализации деформации $\Delta\varepsilon_{xx}$ в очагах сначала увеличивается, а затем уменьшается за счет перераспределения локальной деформации между вновь возникающими дополнительными зонами, что соответствует более равномерному формоизменению образца. Очевидно, что один виток спирали соответствует участку параболической кривой с $n < 0,5$ и является этапом локализации пластического течения исследуемого сплава. Установившийся колебательный режим является неустойчивым, так как траектория сходит с предельного цикла, стремясь к точке, соответствующей одному очагу локализации — шейке (см. рис. 6). Устойчивость пластического течения по фазовой траектории зависит от характера деформационного упрочнения и ресурса пластичности материала. Так, для многих пластичных материалов деформационная кривая аппроксимируется параболой с показателем параболичности n , стремящимся к 0,5, в конце которой наблюдается увеличение амплитуды одного из стационарных очагов локализации с последующей трансформацией его в шейку [1, 2]. В случае, если на параболической кривой имеется хотя бы один участок с $n < 0,5$, возможен один цикл периодического изменения λ , как это наблюдалось, например, в кремнистом железе [15].

3. Выводы. Полученные в настоящей работе экспериментальные данные о периодическом характере изменения пространственного периода локальных деформаций и их интенсивности при пластическом течении сплавов циркония позволяют выявить некоторые общие закономерности эволюции неравновесной системы на завершающих стадиях процесса.

1. Пластическое течение на параболической стадии деформационного упрочнения при $n < 0,5$ сопровождается потерей устойчивости, характеризующейся периодическим изменением пространственного периода макролокализации деформации λ , коррелирующим с периодическим изменением прироста локального удлинения $\Delta\varepsilon_{xx}$ в очагах локализации.

2. Колебательный режим, характеризующий неустойчивость локализации пластического течения на завершающей стадии деформирования, можно описать фазовой траекторией, являющейся предельным циклом, устойчивость которого определяется способностью материала к пластическому формоизменению.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zuev L. B., Danilov V. I.** A self-excited wave model of plastic deformation in zirconium // Philos. Mag. Ser. A. 1999. V. 79, N 1. P. 43–57.
2. **Зуев Л. Б., Данилов В. И., Семухин Б. С.** Пространственно-временное упорядочение при пластическом течении твердых тел // Успехи физики металлов. 2002. Т. 3, вып. 3. С. 237–304.
3. **Займовский А. С., Никулина А. В., Решетников Н. Г.** Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1994.
4. **Полетика Т. М., Данилов В. И., Нариманова Г. Н. и др.** Локализация пластического течения при растяжении сплава Zr — 1 % Nb // Журн. техн. физики. 2002. Т. 72, вып. 9. С. 57–62.
5. **Полетика Т. М., Нариманова Г. Н., Колосов С. В., Зуев Л. Б.** Локализация пластического течения в технических сплавах циркония // ПМТФ. 2003. Т. 44, № 2. С. 132–142.
6. **Zuev L. B., Danilov V. I., Poletika T. M., Barannikova S. A.** Plastic deformation localization in commercial Zr-base alloys // Intern. J. Plastic. 2004. V. 20, N 5. P. 1227–1249.
7. **Wray P. J.** Tensile plastic instability at an elevated temperature and its dependence upon strain rate // J. Appl. Phys. 1970. V. 41, N 8. P. 3347–3352.
8. **Кайбышев О. А.** Сверхпластичность промышленных сплавов. М.: Металлургия, 1984.
9. **Рыбин В. В.** Физическая модель явления потери механической устойчивости и образования шейки // Физика металлов и металловедение. 1977. Т. 44, вып. 3. С. 623–632.
10. **Владимиров В. И., Романов А. Е.** Дисклинации в кристаллах. Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1986.
11. **Барахтин Б. К., Владимиров В. И., Иванов С. А. и др.** Эффект периодического изменения дефектной структуры при пластической деформации // Физика твердого тела. 1987. Т. 28, вып. 7. С. 2250–2252.
12. **Пресняков А. А.** Локализация пластической деформации. М.: Машиностроение, 1983.
13. **Лоскутов А. Ю.** Введение в синергетику. М.: Наука, 1990.
14. **Арнольд В. И.** Теория катастроф. М.: УРСС, 2004.
15. **Баранникова С. А., Данилов В. И., Зуев Л. Б.** Локализация пластической деформации в моно- и поликристаллических сплавах Fe–Si при растяжении // Журн. техн. физики. 2004. Т. 74, вып. 10. С. 52–56.

Поступила в редакцию 28/VII 2005 г.
