

УДК 660.539.382.2

НЕЛИНЕЙНЫЙ ХАРАКТЕР ФОРМИРОВАНИЯ ШЕЙКИ В СПЛАВАХ ЦИРКОНИЯ

Т. М. Полетика, А. П. Пшеничников

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021 Томск

E-mail: poletm@ispms.tsc.ru

Методами лазерной спеклинтерферометрии и профилирования поверхности исследованы закономерности макролокализации пластической деформации при одноосном растяжении циркониевых сплавов с гексагональной плотноупакованной структурой. Установлено, что возникновение колебательной неустойчивости на параболической стадии пластического течения сплавов циркония обусловлено локальным неоднородным изменением формы деформируемого образца. Показано, что кинетика процесса определяется колебательным изменением деформаций сужения и удлинения в очаге макролокализации в режиме упрочнения-разупрочнения.

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

Введение. Накопленные к настоящему времени экспериментальные данные о макролокализации деформации как обязательной составляющей процесса пластического течения на всех его стадиях [1] требуют учета этого явления при оценке способности материала к устойчивой пластической деформации. В работах [2, 3] методом лазерной спеклинтерферометрии установлены закономерности макролокализации деформации, обусловленные колебательной неустойчивостью пластического течения на параболической стадии деформационного упрочнения циркониевых сплавов. Показано, что при значении показателя параболичности $n < 0,5$ происходит периодическое накопление локальной деформации удлинения и колебательное изменение скорости локализации продольной деформации в режиме упрочнения-разупрочнения в ряде очагов устойчивой макролокализации, один из которых затем трансформируется в шейку.

Авторы ряда работ (см., например, [4–6]) связывают потерю устойчивости пластического течения на макроскопическом уровне с началом неоднородного локального изменения формы образца. Согласно модели критического зародыша флуктуации (локализации) деформации, предложенной в [6], общие закономерности потери устойчивости обусловлены его закритическим ростом, приводящим к локальному изменению геометрии деформируемого образца.

В настоящей работе для выяснения причин потери устойчивости пластического течения на параболической стадии деформационного упрочнения сплавов циркония экспериментально исследуется процесс макролокализации деформации с помощью независимых методов лазерной спеклинтерферометрии и профилирования поверхности образца в процессе растяжения.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований СО РАН (код проекта 3.6.1.2) и при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 08-08-99121-р-офи).

1. Материалы и методика эксперимента. Исследовались закономерности макролокализации деформации сплавов циркония с гексагональной плотноупакованной структурой (ГПУ-сплавов) Э125 и циркалой-2. Образцы, имевшие форму двусторонней лопатки размером $46,0 \times 9,8 \times 1,7$ мм, подвергались одноосному растяжению на испытательной машине “Instron-1185” при скорости деформации, равной $3,6 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, по схеме, соответствующей плоскому напряженно-деформированному состоянию. Одновременно с записью диаграммы деформации методом спеклинтерферометрии фиксировалось поле векторов смещений точек на поверхности образцов [1]. Кроме того, определялась локальная суммарная деформация удлинения путем суммирования компонент тензора пластической дисторсии ε_{xx} и ε_{yy} по площади, занимаемой очагом локализации, а также локальное приращение деформаций $\Delta\varepsilon_{xx}$ и $\Delta\varepsilon_{yy}$ в этом очаге как разность локальных суммарных деформаций ε_{xx}^c и ε_{yy}^c через каждые 0,2 % общей деформации. Методом реперов с фотосъемкой образца в процессе испытаний [7, 8] исследовалась кинетика локального пластического течения материала как в образце в целом, так и в очагах локализации деформации. Профилограммы изменения размеров образца в процессе растяжения строились с помощью лазерного бесконтактного профилирования поверхности на установке “MICRO MEASURE 3D station”. Расстояние между реперами вдоль оси растяжения измерялось методом, предложенным в [8]. Истинная деформация вычислялась по формуле $e = \ln(l/l_0)$, что позволило количественно оценить эволюцию локальных скоростей деформации в продольном и поперечном направлениях на завершающей стадии деформационного процесса вплоть до формирования шейки.

2. Результаты экспериментов и их обсуждение. В работе [9] установлено, что параболический участок деформационной кривой ГПУ-сплавов циркония является сложным для анализа и в логарифмических координатах $\ln(S - S_0) - \ln e$ может быть разделен на ряд прямолинейных участков с дискретно уменьшающимся показателем параболическости n . При этом образование участков с $n < 0,5$ обусловлено процессом макролокализации пластического течения. С использованием метода лазерной спеклинтерферометрии выявлены очаги устойчивой макролокализации деформации и изучен характер последовательного накопления в них суммарной деформации локального удлинения ε_{xx}^c [2, 3].

В настоящей работе для определения влияния поперечных напряжений на возникновение колебательной неустойчивости пластического течения (при $n < 0,5$) исследуется эволюция распределения компоненты локального сужения ε_{yy} как в деформируемом образце в целом, так и в выделенных очагах устойчивой локализации. Исследованы закономерности накопления суммарной деформации локального удлинения и локального сужения в очагах устойчивой локализации в процессе деформирования вплоть до момента начала образования шейки.

На рис. 1, а представлены зависимости величин ε_{xx}^c и ε_{yy}^c от общей деформации e в области очага локализации, который впоследствии трансформируется в шейку, для сплава циркалой-2. На рис. 1, а приведена также деформационная кривая растяжения образца в логарифмических координатах $\ln(S - S_0) - \ln e$. Видно, что скорость накопления деформации локального удлинения в очаге локализации примерно в два раза превышает скорость накопления деформации локального сужения. При этом в начале стадии параболического деформационного упрочнения при $n > 0,5$ скорость изменения обеих величин постоянна, а при $n < 0,5$ размеры области локализации деформации как удлинения, так и сужения в очаге резко уменьшаются и затем продолжают уменьшаться до достижения предельной нагрузки. Особенностью полученных кривых является то, что накопление локальных суммарных деформаций удлинения и сужения происходит неравномерно.

Исследование кинетики развития локализации деформации в выделенных очагах устойчивой макролокализации показало, что зависимости приращения локальных деформаций $\Delta\varepsilon_{xx}$ и $\Delta\varepsilon_{yy}$ (рис. 1, б), а также скорости приращения (или ускорения) локальных

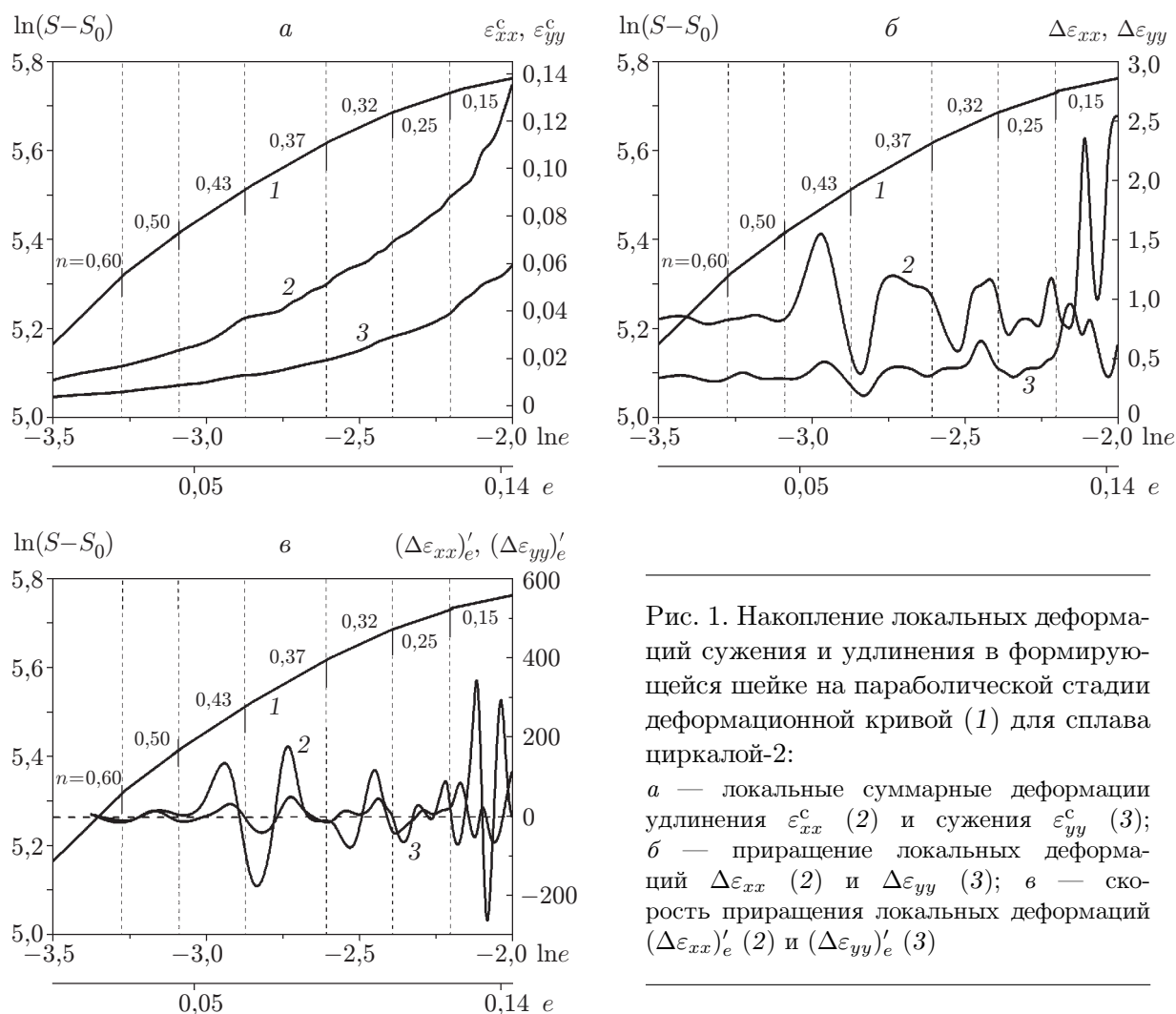


Рис. 1. Накопление локальных деформаций сужения и удлинения в формирующейся шейке на параболической стадии деформационной кривой (1) для сплава циркалой-2:

а — локальные суммарные деформации удлинения ε_{xx}^c (2) и сужения ε_{yy}^c (3); *б* — приращение локальных деформаций $\Delta\varepsilon_{xx}$ (2) и $\Delta\varepsilon_{yy}$ (3); *в* — скорость приращения локальных деформаций $(\Delta\varepsilon_{xx})'_e$ (2) и $(\Delta\varepsilon_{yy})'_e$ (3)

удлинения $(\Delta\varepsilon_{xx})'_e$ и сужения $(\Delta\varepsilon_{yy})'_e$ в них (рис. 1, *в*) от общей деформации e имеют нелинейный характер. Колебательное изменение скорости локализации происходит в режиме упрочнения-разупрочнения. На рис. 1 видно, что при использовании высокочувствительного метода спеклинтерферометрии начало процесса периодического накопления локальных деформаций удлинения и сужения в очагах локализации удается зафиксировать еще на участках параболической кривой с $n \geq 0,5$. Однако резкое увеличение приращения локальных деформаций и скорости локализации происходит при уменьшении показателя параболичности до значений $n < 0,5$. С увеличением общей деформации амплитуды колебаний этих параметров локализации увеличиваются и становятся максимальными при достижении предельной нагрузки. Очевидно, что постоянное периодическое накопление деформаций в очагах локализации и в продольном, и в поперечном направлениях должно приводить к локальному изменению формы образца.

Профилирование деформируемого образца позволило установить, что деформация в трех направлениях (поперечном, продольном и нормальном к поверхности образца) развивается неравномерно. Наиболее четко макролокализация деформации видна на профилограммах, свидетельствующих об изменении формы боковой поверхности деформируемого образца вдоль его рабочей части. На рис. 2 представлены профилограммы для образца из

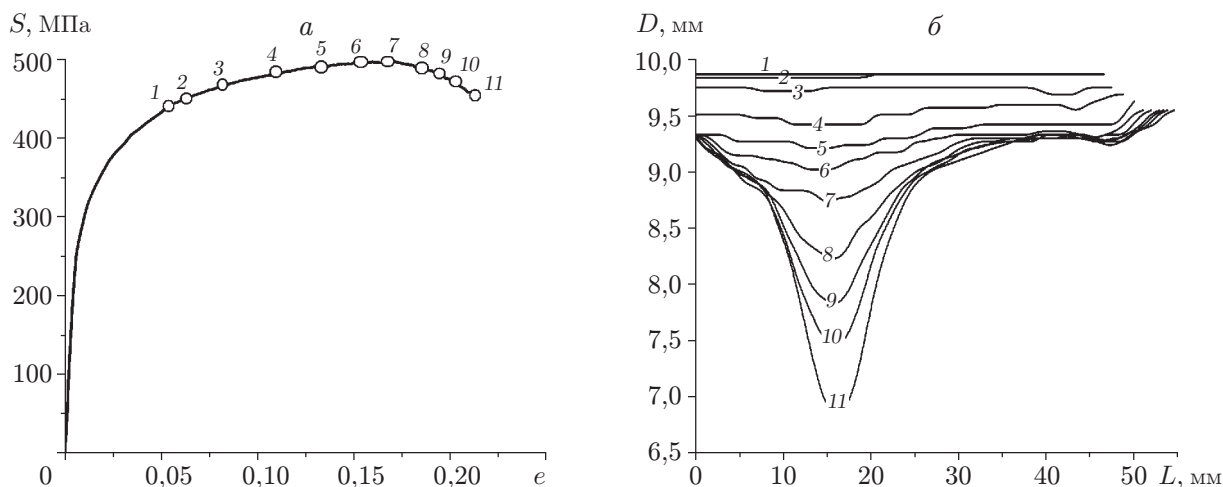


Рис. 2. Деформационная кривая растяжения (а) и профилограммы (б) деформируемого образца из сплава Э125:

1–11 — номера точек, в которых проводилась фотосъемка образца

сплава Э125 (L , D — длина и ширина образца соответственно). Точки на деформационной кривой соответствуют моментам снятия профилограмм. Видно, что при $e > 5\%$ на поверхности возникают и развиваются два очага макролокализации, в которых начинает изменяться геометрия образца. В дальнейшем рост одного из очагов прекращается, а другого — активизируется, и этот очаг локализации деформации трансформируется в шейку (см. рис. 2). Аналогичная картина эволюции локализации деформации, обусловленной изменением формы образца, получена для деформации вдоль нормали к поверхности образца, однако в этом случае форма поверхности изменяется менее существенно. В результате измерения расстояния между реперами вдоль оси растяжения получена картина эволюции распределения локальной продольной деформации. Установлено, что макролокализация деформации обуславливает локальное изменение геометрии поверхности образца также при $e > 5\%$.

Результаты сравнения полученных профилограмм с деформационной кривой показывают, что резкое локальное неоднородное изменение геометрии образца, вызванное локальным изменением кривизны и локальным увеличением площади поверхности, происходит на параболическом участке с показателем параболичности $n < 0,5$. Это означает, что потеря устойчивости пластического течения циркониевых сплавов на этом участке обусловлена неоднородным формоизменением образца, сопровождающим формирование шейки. Таким образом, можно полагать, что дискретное уменьшение показателя параболичности начиная со значения $n = 0,5$ является следствием процесса макролокализации пластического течения исследуемых материалов.

Представляет интерес исследование особенности развития очагов локализованной деформации в сплавах Э125 и циркалой-2, обнаруженной на профилограммах. Так, начиная с параболического участка с $n < 0,5$ формируются две шейки, причем одна из них сначала опережает в своем развитии другую, а затем отстает от нее, т. е. на начальном этапе наблюдается конкуренция формирующихся шеек (см. рис. 2). Такие очаги локализованной деформации называются “активной” и “неактивной” шейками [4], причем “активной” является та шейка, в которой степень локализации деформации в данный момент времени выше. Обычно при растяжении образцов из циркониевых сплавов можно наблюдать 2–4 “неактивных” шейки [2].

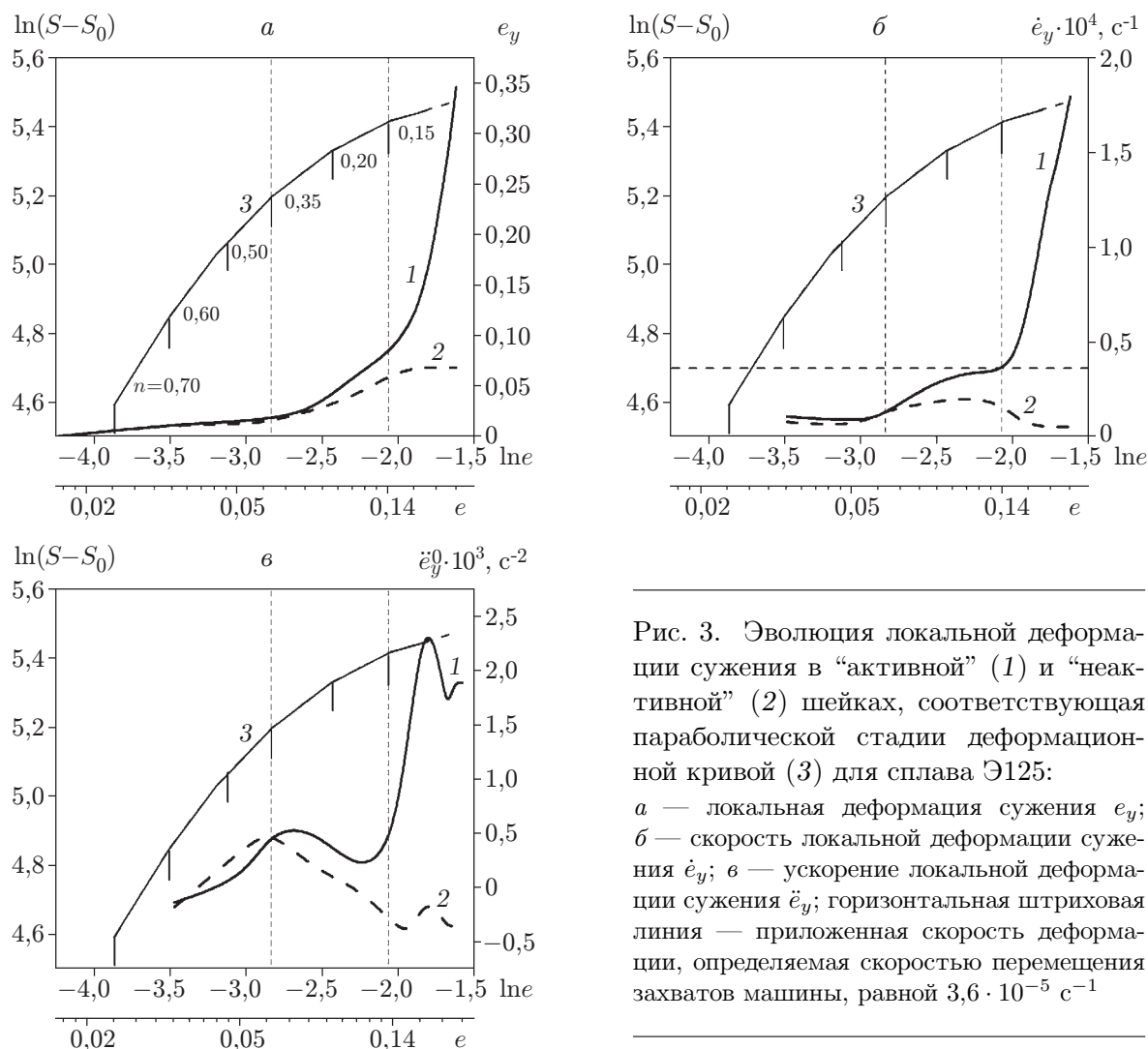


Рис. 3. Эволюция локальной деформации сужения в “активной” (1) и “неактивной” (2) шейках, соответствующая параболической стадии деформационной кривой (3) для сплава Э125:

a — локальная деформация сужения e_y ; *б* — скорость локальной деформации сужения \dot{e}_y ; *в* — ускорение локальной деформации сужения \ddot{e}_y ; горизонтальная штриховая линия — приложенная скорость деформации, определяемая скоростью перемещения захватов машины, равной $3,6 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$

Развитие очагов локализованной деформации показано на рис. 3, на котором приведены кривые кинетических характеристик локального деформирования. На рис. 3, *a* представлены зависимости локальной поперечной деформации, а также ее скорости и ускорения в “активной” и “неактивной” шейках от общей деформации. Видно, что с момента возникновения пластического течения скорость деформации на участках, где в дальнейшем образуются шейки, меньше приложенной скорости, а после возникновения очагов локального геометрического формоизменения при $n < 0,5$ она увеличивается. Затем скорость локальной деформации сужения в “неактивной” шейке уменьшается, до тех пор пока не останется один очаг макролокализации пластического течения, являющийся “активной” шейкой. Перед разрушением скорость деформации в этой шейке достигает максимального значения, равного $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$.

На рис. 3, *в* видно, что степень локализации деформации в очагах увеличивается неравномерно: происходит периодическое ускорение и замедление процесса накопления деформации сужения. Анализ процесса локализации деформации в “активной” шейке в продольном и поперечном направлениях позволил выявить ряд закономерностей. На рис. 4, *a* представлены кривые деформации, а также кривые локальных деформаций удлинения и

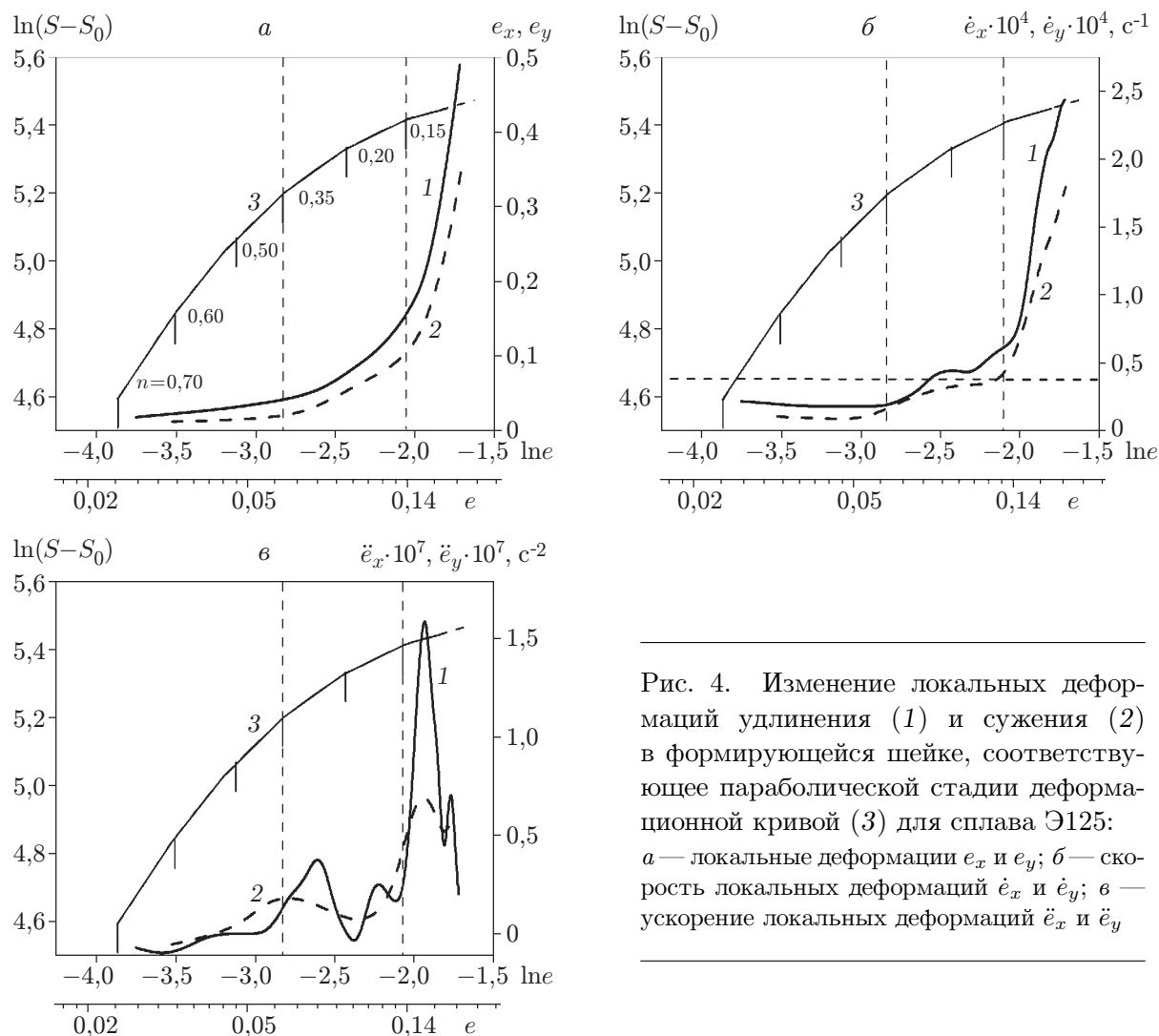


Рис. 4. Изменение локальных деформаций удлинения (1) и сужения (2) в формирующейся шейке, соответствующее параболической стадии деформационной кривой (3) для сплава $\Theta 125$: а — локальные деформации e_x и e_y ; б — скорость локальных деформаций \dot{e}_x и \dot{e}_y ; в — ускорение локальных деформаций \ddot{e}_x и \ddot{e}_y

сужения, на которых можно выделить три участка. На параболической стадии пластического течения при $n \geq 0,5$ наблюдается незначительное линейное увеличение локальных деформаций, а с момента начала неоднородного изменения геометрической формы образца, сопровождающегося уменьшением показателя параболичности до значений $n < 0,5$, увеличение локальных деформаций становится нелинейным. Наиболее существенное увеличение степени локализации деформации происходит при $n < 0,2$, когда начинается геометрическое разупрочнение материала и формируется шейка, в которой происходит разрушение. При этом скорость деформации удлинения образца в шейке достигает значения, равного $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, что более чем в семь раз превышает приложенную скорость деформации (рис. 4, б).

Кинетика развития локализации деформации в “активной” шейке показана на рис. 4, б, в. Видно, что начиная с параболического участка ($n < 0,5$) изменение кинетических параметров локализации \dot{e} и \ddot{e} в режиме упрочнения-разупрочнения имеет колебательный характер. Аналогичный пульсирующий характер развития локальной деформации наблюдается на цилиндрических образцах некоторых пластичных материалов [3]. На кинетических кривых локализации деформации (рис. 4, б, в) также можно выделить

три участка: участок с практически постоянной скоростью локального пластического течения ($n \geq 0,5$), участок колебательного упрочнения-разупрочнения ($0,2 < n < 0,5$) и участок устойчивого разупрочнения ($n < 0,2$), которому соответствует образование макроскопической шейки. При растяжении плоских образцов обнаружена следующая особенность развития локализации продольных и поперечных деформаций. Колебание локальной деформации сужения в формирующемся очаге макролокализации при $0,2 < n < 0,5$ опережает по фазе колебание локальной деформации удлинения, а на стадии устойчивого разупрочнения при достижении максимальной нагрузки эти колебания совпадают по фазе, что сопровождается резким увеличением их амплитуды и образованием шейки, в которой происходит разрушение. Можно предположить, что наблюдаемые нелинейные колебания локальных продольных и поперечных деформаций в очаге макролокализации взаимосвязаны. Действительно, постепенное увеличение влияния геометрического фактора приводит к началу формирования сложного напряженного состояния, обуславливающего появление гидростатической компоненты напряжения [10]. В этом случае вследствие роста поперечных напряжений происходит увеличение напряжений течения материала в продольном направлении [3]. По-видимому, увеличение скорости деформации в поперечном направлении в зоне локализации приводит к упрочнению и как следствие к замедлению процесса локализации поперечной деформации, что сопровождается ростом скорости локальной продольной деформации, упрочнением, а затем и замедлением процесса локализации деформации вдоль оси растяжения. Колебательный процесс геометрического упрочнения-разупрочнения в очаге макролокализации в поперечном и продольном направлениях продолжается до тех пор, пока колебания не совпадут по фазе. Этот момент определяет начало формирования шейки, в которой происходит разрушение образца. Аналогией наблюдаемому явлению колебательной неустойчивости служат фрикционные автоколебания, возникающие вследствие связанных колебаний тела в нормальном и тангенциальном направлениях к поверхности трения [11]. При этом сила сопротивления деформированию и скорость растяжения образца аналогичны силе трения и скорости скольжения.

3. Выводы. Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

Методами спеклинтерферометрии и профилирования поверхности установлено, что возникновение колебательной неустойчивости на параболической стадии пластического течения сплавов циркония обусловлено началом локального неоднородного изменения геометрии деформируемого образца, являющегося предвестником формирования шейки. Этот процесс начинается на параболической стадии при значении показателя параболичности $n < 0,5$ и сопровождается постепенным уменьшением показателя параболичности.

Выявлены три стадии формирования шейки: стадия линейного роста скорости локальных деформаций при $n > 0,5$, стадия локального колебательного упрочнения-разупрочнения материала, определяемого периодически прогрессирующим уменьшением поперечного сечения образца ($0,2 < n < 0,5$), и стадия устойчивого разупрочнения ($n < 0,2$), на которой образуется макроскопическая шейка.

Установлен нелинейный характер накопления локальной деформации в очагах макролокализации как в продольном, так и в поперечном направлениях, при этом кинетика периодического процесса упрочнения-разупрочнения определяется колебательным изменением максимальных поперечных и продольных напряжений в очаге макролокализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Полетика Т. М., Нариманова Г. Н., Колосов С. В. Закономерности локализации пластической деформации при формировании шейки в сплаве циркония // Журн. техн. физики. 2006. Т. 76, вып. 3. С. 44–49.
3. Полетика Т. М., Колосов С. В., Нариманова Г. Н., Пшеничников А. П. Неустойчивость пластического течения при формировании шейки в сплавах циркония // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 3. С. 141–149.
4. Пресняков А. А. Локализация пластической деформации. М.: Машиностроение, 1983.
5. Gray P. J. Tensile plastic instability at an elevated temperature and its dependence upon strain rate // J. Appl. Phys. 1970. V. 41. P. 3347–3352.
6. Криштал М. М. Общая теория неустойчивости и мезоскопической неоднородности пластической деформации // Изв. РАН. Сер. физ. 2004. Т. 68, № 10. С. 1391–1402.
7. Сухарев И. П. Экспериментальные методы исследования деформации и прочности. М.: Машиностроение, 1987.
8. Korsunsky A. M., Nguyen G. D., Kim K. The analysis of deformation size effects using multiple gauge length extensometry and essential work of reapture concept // Mater. Sci. Engng. Ser. A. 2006. V. 423. P. 192–198.
9. 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.
10. Золотаревский В. С. Механические испытания и свойства металлов. М.: Металлургия, 1974.
11. Геккер Ф. Р., Хайралиев С. И. Об устойчивости скольжения тела по движущемуся основанию // Трение и износ. 1992. Т. 13, № 4. С. 581–587.

Поступила в редакцию 7/II 2008 г.
