

05

## Характер локализации пластической деформации в рекристаллизованном сплаве Zr–2.5%Nb

© И.О. Болотина, В.И. Данилов, Л.Б. Зуев

Томский политехнический университет, Томск  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск  
E-mail: dvi@ispms.tsc.ru

Поступило в Редакцию 3 июня 2008 г.

Проведено исследование деформационного поведения рекристаллизованного цирконий-ниобиевого сплава Э125 на макроскопическом уровне. Проанализирована эволюция пространственно-временных распределений локальных деформаций на всех стадиях кривой деформационного упрочнения. Установлено, что на стадии предразрушения наблюдаются очаги локализованного пластического течения с различным уровнем накопления деформации. Очаг с максимальной амплитудой деформации практически неподвижен и отмечает место будущего разрушения. Остальные зоны локализованной деформации движутся с тем большей скоростью, чем дальше они отстоят от места разрушения. Кинетика очагов локализации деформации позволяет оценивать время жизни образца и координаты места разрушения.

PACS: 05.45.Df, 05.70.Ln, 62.20.Fe, 62.50.+p, 81.40.Lm, 83.50.-v

Изделия из циркониевых сплавов производят по преимуществу методами холодной обработки давлением, поэтому технологичность сплавов во многом определяется характером протекания пластического течения на различных стадиях нагружения. В настоящее время известно, что пластическая деформация на всех этапах развивается неоднородно и склонна к локализации на макроуровне. Причем от вида картин локализации и их эволюции зависят такие важные характеристики, как запас пластичности, ресурс, тип разрушения. В этой связи основной целью выполненного исследования является выяснение природы неоднородности пластического течения в промышленном бинарном сплаве Zr–2.5%Nb.

Исследования проводились на образцах технического цирконий-ниобиевого сплава марки Э125 в рекристаллизованном состоянии.

Структура материала представляла собой твердый раствор на основе ГПУ  $\alpha$ -Zr с содержанием частиц  $\beta$ -Nb не более 2.5% по объему. Размер зерна матрицы составил  $\approx 5 \mu\text{m}$ , а включений менее  $0.3 \mu\text{m}$ .

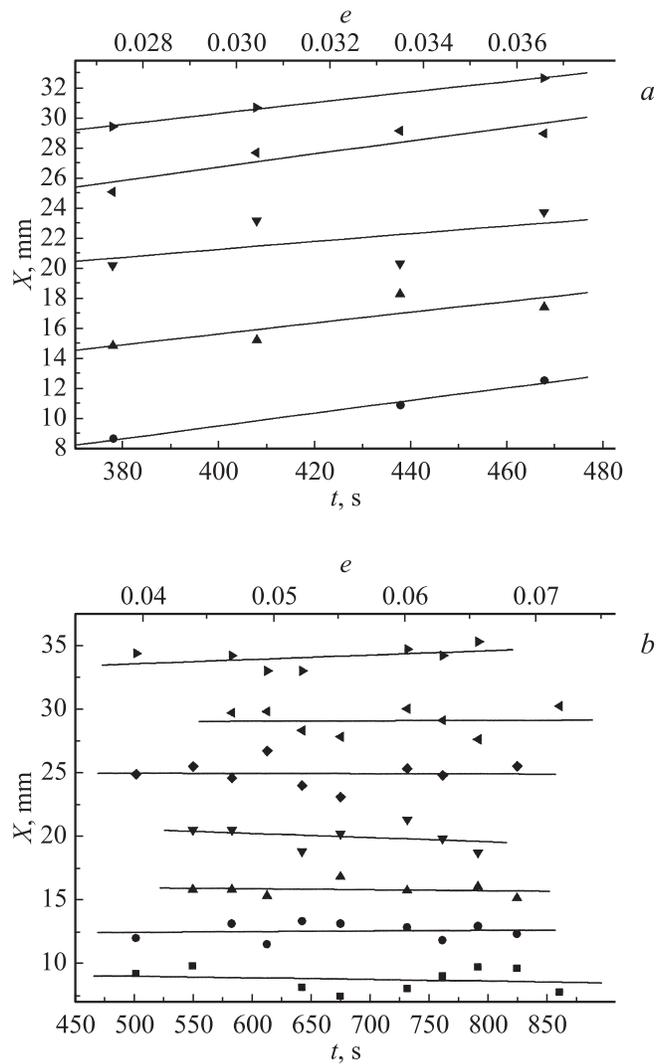
Подготовленные образцы подвергались одноосному растяжению со скоростью  $8.3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  при комнатной температуре. Деформационная диаграмма исследуемого материала относится к кривым общего типа, поэтому выделение стадий упрочнения производилось с использованием метода логарифмической линеаризации, разработанного авторами [1] и использованного нами ранее в [2]. Анализ стадийности необходим, так как в работах [2–4] указано, что вид картин локализации пластической деформации определяется законом пластического течения материала:

$$s = s_0 + Ke^n, \quad (1)$$

где  $s_0$  — предел текучести, коэффициент  $K$  имеет размерность напряжения и является параболическим коэффициентом упрочнения  $n \leq 1$ . Стадия упрочнения — это участок диаграммы, где постоянны  $n$  и  $K$ . Показатель упрочнения  $n$  определяет тип стадии:  $n = 1$  — стадия линейного упрочнения,  $n \approx 1/2$  — стадия параболического упрочнения Тейлора,  $n < 1/2$  — стадия предразрушения. Так, было установлено, что диаграмма исследуемого сплава содержит стадию линейного упрочнения ( $0.028 < e < 0.037$ ), стадию Тейлора ( $0.039 < e < 0.064$ ) с  $n = 0.53$  и стадию предразрушения ( $0.07 < e < 0.10$ ) с  $n = 0.35$ .

Регистрация и анализ картин локализации производились путем фиксирования полей смещений точек деформируемого образца методом двухэкспозиционной спекл-интерферометрии, подробно описанным в [5]. Информация о деформационном поведении материала декодировалась оптико-электронным способом и затем представлялась в виде распределений локальных удлинений  $\varepsilon_{xx}$ , на которых отчетливо выделяются 5–7 очагов локализации деформации.

На стадии линейного упрочнения, помимо пространственной, наблюдается и временная периодичность распределения локальных деформаций. Это демонстрирует рис. 1, *a*, где положения очагов локализации  $X$  представлены в зависимости от времени деформирования  $t$  и величины общей деформации  $e$ ;  $X$  — координата каждого очага, измеряемая вдоль оси растяжения; за начало лабораторной системы координат принят неподвижный захват испытательной машины. Видно, что зоны локализации перемещаются с одинаковыми постоянными скоростями  $V$ , равными  $4.5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ , образуя автоволну, описанную, например, в [3]. Длина автоволны составила  $\lambda = 4.5 \pm 0.5 \text{ mm}$ .



**Рис. 1.** Эволюция пространственно-временных распределений очагов локализованной пластической деформации: *a* — на стадии линейного упрочнения, *b* — на стадии Тейлора, *c* — на стадии предразрушения. Зависимости на графиках отражают изменения положений каждого из очагов.

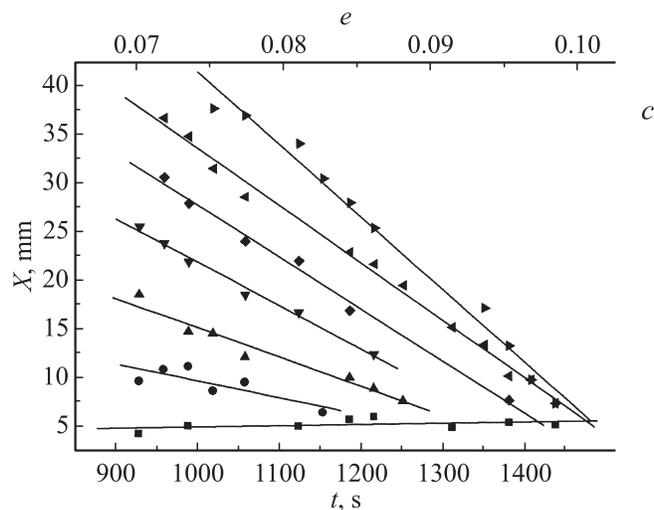


Рис. 1 (продолжение).

На стадии параболического деформационного упрочнения Тейлора (рис. 1, *b*) распределение локальных удлинений является стационарным, т.е. очаги локализации остаются неподвижными в течение всей стадии. Амплитуды деформаций в них сохраняются практически одинаковыми. Только к концу этой стадии обнаружен рост уровня деформации в очаге с координатой  $X_f$ , равной 6 мм.

Более подробно рассмотрены процессы, происходящие на этапе предразрушения. На рис. 1, *c* хорошо видно, что выделяется очаг локализации, который не меняет своего положения. Возникает этот очаг еще на стадии Тейлора. Неподвижный очаг характеризуется высокой амплитудой, которая к тому же постоянно нарастает в процессе протекания всей стадии предразрушения. В итоге здесь формируется шейка и происходит разрушение.

Остальные очаги локализованной пластичности перемещаются самосогласованно в направлении неподвижной высокоамплитудной зоны локализации. Чем дальше расположен очаг локализации от данной зоны, тем выше скорость его движения. Скорости очагов определяются наклоном аппроксимирующих прямых рис. 1, *c*. Видно, что диаграммы

движения очагов деформации на стадии предразрушения представляют собой пучки прямых, сходящихся в фокусе  $(X_f, t_f)$ ,  $t_f$  — время от начала деформирования.

В свою очередь, известно [6], что диаграммы перемещения любых объектов образуют пучок прямых, если их скорости линейно зависят от начальных координат, т. е. выполняется условие

$$V(X_0) = \alpha X_0 + \beta, \quad (2)$$

где  $X_0$  — начальные координаты объектов,  $\alpha$  и  $\beta$  — константы. В рассматриваемом случае начальные координаты — это положения очагов локализации деформации в начале стадии предразрушения. Они тоже могут быть определены по данным рис. 1, с.

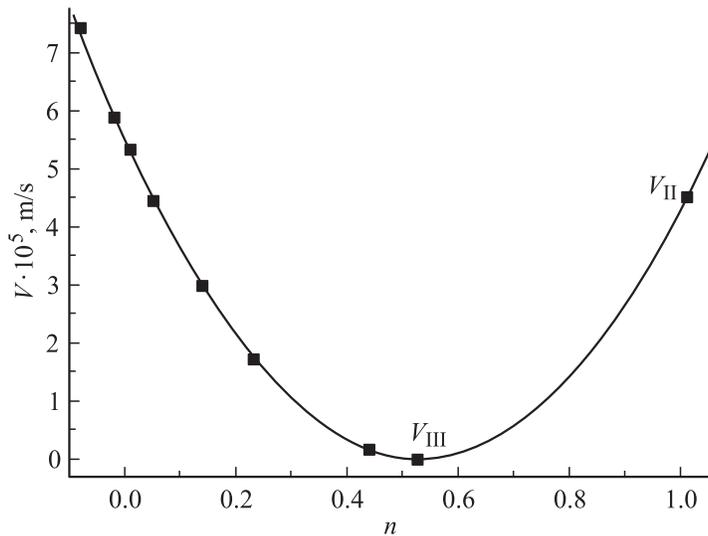
Для процесса взаимосогласованного перемещения очагов локализации на стадии предразрушения необходимо  $\alpha = 1/r_{pf}$ ,  $\beta = -X_f/t_{pf}$ , где  $t_{pf} = (t_f - t_0)$  — продолжительность стадии предразрушения,  $X_f$  — координата места разрушения,  $t_0$  — время от начала деформирования до наступления этой стадии. Следовательно, константы  $\alpha$  и  $\beta$  путем использования уравнения (2) могут быть рассчитаны из эксперимента и позволяют оценить время жизни образца, а также координату места разрушения.

Для исследуемого сплава  $X_f$  оказалась равной 6 mm, а  $t_f = 1385$  s. Эти значения удовлетворительно согласуются с реальными значениями. Так, испытываемый образец разрушился через 1460 s после начала деформирования на расстоянии 7 mm от неподвижного захвата испытательной машины.

Анализ данных о кинетике автоволн локализованного пластического течения на линейной и тейлоровской стадиях деформационного упрочнения, а также на стадии предразрушения показал, что их скорость может быть описана единой для всех трех участков функцией показателя деформационного упрочнения  $n$  [4]. Вид этой функции

$$V(n) = V_0(n - q)^2 \quad (3)$$

впервые был получен в [7]. В ней  $V_0$  — эмпирическая константа,  $q$  примерно равна 1/2. Действительно, в [3,4] показано, что на стадии линейного упрочнения, где показатель деформационного упрочнения  $n$  равен 1, скорость движения фронтов локализованной пластичности постоянна. На стадии Тейлора, когда  $n \approx 1/2$ , очаги локализации неподвижны. Во всех остальных случаях, когда  $n \neq 1/2$ , скорости движения



**Рис. 2.** Зависимости скорости движения очагов локализованной пластичности  $V(n)$ .

зон локализованной пластичности подчиняются закономерности (3). Нормировкой выражения (3) по экспериментально полученным значениям скоростей, соответствующих стадиям линейного ( $V_{II} = \text{const}$ ,  $n \approx 1$ ) и тейлоровского ( $V_{III} = 0$ ,  $n \approx 1/2$ ) упрочнения, могут быть определены значения  $V_0$  и оценены значения показателей  $n$  для каждого из подвижных доменов локализованной пластичности на стадиях предразрушения.

На рис. 2 построены зависимости скорости движения очагов локализованной пластичности  $V(n)$  в цирконий-ниобиевом сплаве. Параболический тип зависимости  $V(n)$  очевиден. На стадии предразрушения наибольший показатель упрочнения соответствует стационарной зоне локализации. Для остальных очагов он меньше. Наиболее быстро движущимся очагам соответствуют отрицательные значения показателя упрочнения. Как отмечалось ранее для других материалов [8], эти очаги образовались на стадии предразрушения (рис. 1, с) и геометрически не связаны с зонами локализации тейлоровской стадии. Условие  $n < 0$  соответствует потере устойчивости процесса и деформационному ра-

зупрочению материала [9]. Это, в свою очередь, вынуждает признать, что деформационные свойства отдельных объемов материала и способность этого материала упрочняться в ходе пластического течения на стадии предразрушения становятся неодинаковыми. Эта точка зрения подтверждается результатами исследования эволюции дислокационной структуры в очагах пластического течения на разных стадиях процесса деформирования [2,7], показавшего, что развитие дислокационной субструктуры в очагах локализованной деформации опережает эти процессы в зонах между очагами.

В ходе временной эволюции картины локализации деформации на стадии предразрушения зона активной пластической деформации сужается, но число очагов в ней возрастает при уменьшении расстояния между ними, что ясно видно из рис. 1, с. Образование макроскопической шейки и последующее разрушение являются результатом этого процесса, т.е. образование шейки предваряется сложными явлениями взаимосогласованного движения очагов локализованной пластичности на стадии предразрушения. Очаги локализованной деформации в момент зарождения вязкой трещины сливаются в месте ее образования, практически одновременно приходя к этому сечению образца. Следовательно, место разрушения и время жизни образца до разрушения детерминированы процессами, происходящими на более ранних стадиях пластического течения. Первый интенсивный максимум локализации деформации — предвестник образования очага разрушения — появляется на месте будущей шейки в конце участка параболической кривой с показателем  $n \approx 1/2$  пока все очаги течения неподвижны. Этот ранее сформировавшийся очаг „управляет“ движением всех остальных, так как после его рождения другие фронты локализации начинают согласованно двигаться вдоль оси растяжения, причем чем дальше от шейки расположен очаг, тем выше его скорость. Эта закономерность позволяет всем компонентам „цуга“ очагов локализованной пластичности прибыть в область разрушения одновременно.

В литературе, посвященной процессам в активных нелинейных средах, можно найти описание аналогичных процессов. Так, например, в работе [10] описан режим горения нелинейной среды, характеризующейся стягиванием очагов к единому центру, окруженному инактивной областью. Подобный подход использован при описании перераспределения упругих напряжений в массивах горных пород [11] и при рассмотрении распространения импульсов в биологических системах [12]. На возможность использования понятий и математического аппарата синергетики

для описания явления локализации пластической макродеформации указывалось ранее в работах [3,4]. Результаты представленной статьи подтверждают, что эта концепция может быть эффективной для выяснения природы шейкообразования и разрушения.

Данные исследования представляют практическую ценность для создания научных основ технологии обработки давлением циркониевых сплавов. Это, в частности, позволяет обеспечить надежность выбора предельных деформаций при холодной прокатке листовых и трубных изделий для ядерных реакторов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-08-99121-р\_офи).

## Список литературы

- [1] *Трефилов В.И., Моисеев В.Ф., Печковский Э.П.* Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов. Киев: Наук. думка, 1989.
- [2] *Полетика Т.М., Данилов В.И., Нариманова Г.Н., Гимранова О.В., Зуев Л.Б.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. В. 9. С. 57.
- [3] *Зуев Л.Б., Данилов В.И., Семухин Б.С.* // Успехи физики металлов. 2002. Т. 3. С. 237.
- [4] *Zuev L.B.* // Ann. Phys. 2007. V. 16. P. 286.
- [5] *Данилов В.И., Зуев Л.Б., Горбатенко В.В., Гончиков К.В., Павличев К.В.* // Заводская лаборатория. 2006. Т. 72. С. 40.
- [6] *Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д.* Элементы математической физики. М.: Наука, 1973.
- [7] *Зуев Л.Б., Полетика Т.М., Нариманова Г.Н.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 12. С. 74.
- [8] *Зуев Л.Б., Данилов В.И.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. В. 12. С. 102.
- [9] *Стружанов В.В., Миронов В.И.* Деформационное разупрочнение материала в элементах конструкций. Екатеринбург: ИМаш УрО РАН, 1995.
- [10] *Самарский А.А., Еленин Г.Г., Змитренко Н.В., Курдюмов С.П.* // ДАН СССР. 1977. Т. 237. С. 1330.
- [11] *Митлин В.С., Николаевский В.Н.* // ДАН СССР. 1990. Т. 315. С. 1093.
- [12] *Заикин А.Н., Морозова Т.Я.* // Биофизика. 1978. Т. 24. С. 124.