

УДК 539.213:669.017

ЭВОЛЮЦИЯ АВТОВОЛН ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ В ЦИРКОНИЕВОМ СПЛАВЕ И ОЦЕНКА ЗАПАСА ПЛАСТИЧНОСТИ В ОЧАГЕ ПРОКАТКИ

Н. А. Плосков, В. И. Данилов, Л. Б. Зуев,
А. С. Заводчиков*, И. О. Болотина**, Д. В. Орлова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021 Томск

* Пермский государственный технический университет, 614990 Пермь

** Томский политехнический университет, 634030 Томск

E-mail: dvi@ispms.tsc.ru

С целью исследования напряженно-деформированного состояния циркониевого сплава в очаге холодной прокатки рассмотрены процесс эволюции автоволн локализации деформации и изменения скорости распространения ультразвука. Установлено, что на участке перехода от зоны осадки к зоне редуцирования происходит значительное исчерпание запаса пластичности материала, поэтому на указанном участке наиболее вероятно разрушение. Показано, что с помощью традиционных способов оценки запаса пластичности по механическим характеристикам выявить такой участок невозможно, необходим комплексный анализ картин макролокализации пластической деформации и результатов акустических измерений.

Ключевые слова: автоволны локализации деформации, запас пластичности, прокатка.

Введение. При обработке металлов давлением возникает проблема оценки и прогнозирования запаса пластичности, обеспечивающего протекание процесса без разрушения полуфабриката или готового изделия, что наиболее важно при холодной прокатке. В настоящей работе изучаются механические свойства и определяется запас пластичности циркониевого сплава Э635, применяемого для изготовления тонкостенных труб методом многопроходной холодной прокатки на пильгерных станах. Такая прокатка труб сопровождается большими неоднородными деформациями материала в очаге прокатки. Заметим, что традиционные способы определения запаса пластичности в различных зонах очага прокатки по механическим характеристикам не позволяют получить достоверную оценку вследствие макролокализации деформации при любых процессах формоизменения. В настоящее время установлено, что макролокализация пластического течения имеет автоволновой характер, а тип автоволны определяется законом упрочнения (см., например, [1, 2]). Так, на стадии линейного упрочнения наблюдается движение системы эквидистантных очагов локализации с постоянной скоростью, т. е. фазовая автоволна. На стадии параболического упрочнения Тейлора распределение очагов деформации остается пространственно-периодическим, однако их движение прекращается и возникает стационарная диссипативная структура

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 09-08-00498).

© Плосков Н. А., Данилов В. И., Зуев Л. Б., Заводчиков А. С., Болотина И. О., Орлова Д. В., 2012

(термин синергетики [3]). На стадии предразрушения на месте одного из очагов формируется стационарная зона с высокими амплитудой и скоростью накопления локальной деформации (место будущего разрушения). Остальные очаги самосогласованно движутся в направлении указанной неподвижной зоны таким образом, чтобы одновременно достигнуть места разрушения. Это явление трактуется как коллапс автоволны локализованной деформации [2, 4]. В работах [1, 5] в качестве критерия вязкого разрушения предложено использовать количественные характеристики процесса эволюции автоволн.

Методика измерений. В очаге деформации при прокатке имеется три зоны: зона осадки A , зона редуцирования B и зона калибровки C (рис. 1) [6], степени обжатия K в которых существенно различаются, и, следовательно, материал находится в различных напряженно-деформированных состояниях. Для оценки величины остаточных внутренних напряжений в указанных зонах проводились локальные измерения скорости ультразвука автоциркуляционным методом [7]. Вычисления степеней обжатия K и их градиентов $\Delta K/\Delta x$ показали, что наибольший градиент соответствует началу зоны редуцирования (см. рис. 1, табл. 1). Следовательно, данный участок является критическим с точки зрения обеспечения необходимого запаса пластичности.

Для оценки запаса пластичности путем анализа автоволновой структуры использовался метод двухэкспозиционной спекл-фотографии [8], обеспечивающий в реальном времени регистрацию полей перемещения точек образца в процессе одноосного растяжения.

Растяжения проводились на экспериментальной установке Instron-1185 при комнатной температуре со скоростью деформирования $1,67 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Плоские образцы с головками, имевшие рабочую часть размером $40 \times 6 \text{ мм}$ и толщиной 2 мм , вырезались из различных зон очага прокатки: образец 1 — из зоны осадки, 2, 3 — из зоны редуцирования, 4, 5 — из зоны калибровки.

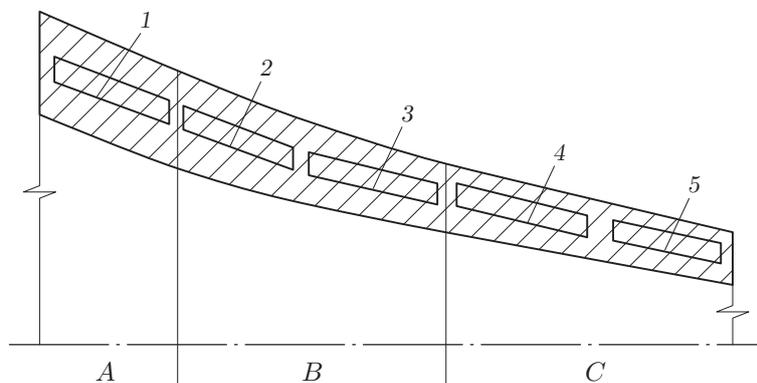


Рис. 1. Схема вырезки образцов из трубной заготовки:

A — зона осадки, B — зона редуцирования, C — зона калибровки; 1–5 — номера образцов (1 — образец из зоны осадки; 2, 3 — образцы из зоны редуцирования; 4, 5 — образцы из зоны калибровки)

Таблица 1

Распределение степеней и градиентов обжатия в очаге прокатки

Номер образца	K	$(\Delta K/\Delta x) \cdot 10^4, \text{ мм}^{-1}$
1	$0,0122 \div 0,0610$	8,1
2	$0,0610 \div 0,1195$	9,7
3	$0,1195 \div 0,1439$	4,1
4	$0,1439 \div 0,1585$	2,4
5	$0,1585 \div 0,1756$	2,8

Таблица 2

Механические характеристики и параметры локализации деформации образцов
из различных зон очага прокатки

Номер образца	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Δe , %			$V_{aw} \cdot 10^{-5}$, м/с	λ_l , мм	λ_T , мм
				Линейная	Тейлора	Предразрушения			
1	552	225	11,00	1,65 ÷ 2,45	2,50 ÷ 3,75	4,75 ÷ 8,50	2,3 ± 0,8	3,8 ± 0,7	4,6 ± 0,6
2	655	305	10,75	1,70 ÷ 2,45	—	2,50 ÷ 6,00	2,9 ± 1,1	3,7 ± 0,4	—
3	692	296	10,60	2,00 ÷ 3,10	3,30 ÷ 4,00	4,25 ÷ 7,30	2,8 ± 0,8	4,3 ± 0,4	5,0 ± 0,3
4	771	208	11,90	2,00 ÷ 3,65	4,10 ÷ 4,90	5,15 ÷ 8,15	3,2 ± 0,8	4,0 ± 0,6	3,9 ± 0,3
5	716	320	10,70	2,00 ÷ 3,25	3,30 ÷ 4,00	4,15 ÷ 7,85	—	—	—

Для каждого образца в координатах истинное напряжение s — истинная деформация e записывалась диаграмма нагружения, которая анализировалась с целью выявления стадий деформации и их продолжительности. Выявление стадий осуществлялось по величине показателя деформационного упрочнения n в предположении, что деформационная кривая описывается функцией $s = s_0 + Ke^n$ с переменными K и n . В таком представлении стадии линейного упрочнения соответствует значение $n = 1$, стадии параболического упрочнения Тейлора — $n = 1/2$, стадии предразрушения — $n < 1/2$ [9]. Регистрируемые при этом поля перемещений путем численного дифференцирования преобразовывались в поля деформаций, выявлялись очаги локализации и рассматривалась пространственно-временная эволюция системы очагов.

Результаты исследований. Результаты, полученные в ходе испытаний образцов из различных зон очага прокатки, приведены в табл. 2. Видно, что с увеличением степени обжатия повышаются условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ и временное сопротивление σ_B образцов. Наибольшее увеличение этих параметров имело место для образца 2 по сравнению с образцом 1, т. е. на участке перехода от зоны осадки к зоне редуцирования. Относительное удлинение δ после разрыва остается практически постоянным.

Увеличение степени обжатия приводит к увеличению продолжительности стадии линейного упрочнения Δe_l , причем начало данной стадии сдвигается в область больших деформаций. Продолжительность стадии параболического упрочнения Тейлора Δe_T в образцах из зон редуцирования и калибровки почти в два раза меньше, чем в образце из зоны осадки. В образце 2, вырезанном из участка перехода от зоны осадки к зоне редуцирования, параболическая стадия Тейлора отсутствует, за стадией линейного упрочнения следует стадия предразрушения. Продолжительность стадии предразрушения Δe_p во всех образцах одинакова, только в образце 2 она начинается и заканчивается значительно раньше, чем в остальных образцах.

В исследуемых образцах эволюция автоволн локализации в целом подчиняется правилу соответствия картин локализации стадиям диаграммы деформирования [1, 2]. Так, на стадиях линейного упрочнения во всех образцах наблюдается фазовая автоволна локализованной деформации. Однако скорости автоволн V_{aw} (см. табл. 2) немонотонно увеличиваются с ростом степени обжатия, а наиболее интенсивный рост вновь наблюдается на участке перехода от образца 1 к образцу 2. Длины автоволн λ_l на стадии линейного упрочнения у образцов 1, 3, 4 статистически одинаковы, но значительно больше, чем у образца 2. (Проверка значимости различий статистически определяемых величин осуществлялась по двойному t -критерию Стьюдента [10].) Во всех образцах, в которых зарегистрирована параболическая стадия Тейлора, наблюдаются стационарные пространственно-периодические распределения очагов локализованной деформации, подобные показанным на рис. 2, а, где амплитуды локальных удлинений в очагах одинаковы. Пространствен-

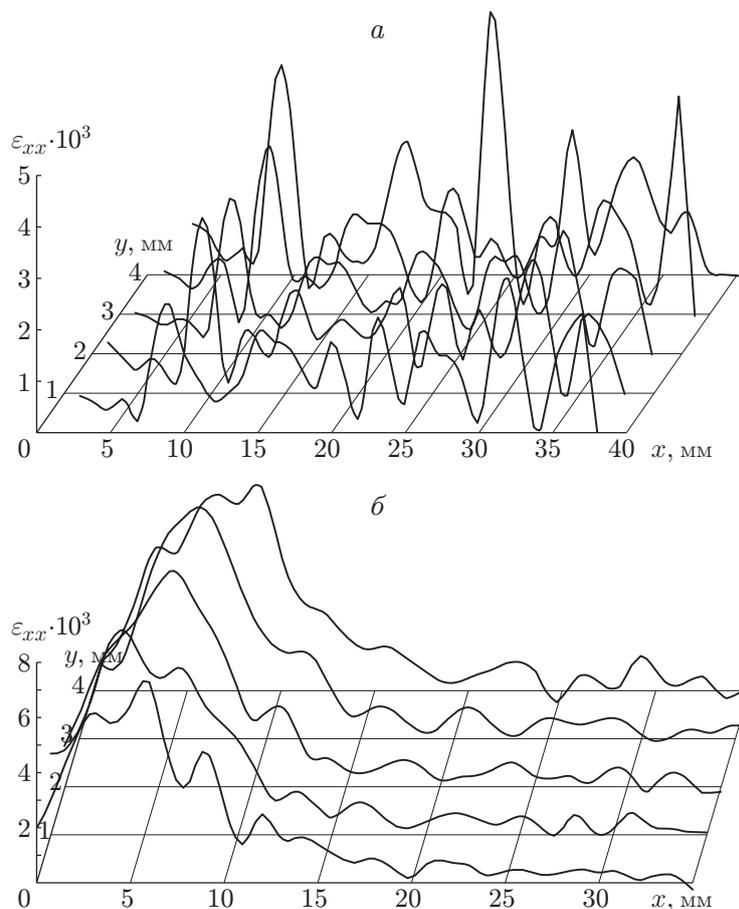


Рис. 2. Распределения зон локализации по поверхности образца 1 (а) и образца 2 (б)

ные характеристики распределений длин волн λ_T на стадии параболического упрочнения Тейлора в образцах 1, 3, 4 различаются незначительно и совпадают со значениями длин фазовых автоволн λ_l (см. табл. 2). В образце 2, в котором стадия Тейлора отсутствует, неоднородные по амплитуде распределения очагов локализованной деформации сформировались еще на стадии линейного упрочнения (рис. 2, б). Скорость накопления деформации в высокоамплитудном очаге оставалась более высокой на всем протяжении процесса деформирования. Разрушение образца 2 произошло именно в указанном очаге. Как показано в работах [1, 5, 9, 11], существование очагов с аномально высоким накоплением деформации характерно для стадий предразрушения, когда запас пластичности материала в значительной степени исчерпан.

О малом запасе пластичности материала образца 2 свидетельствуют результаты измерений скорости ультразвука. На рис. 3 показано распределение этой величины по длине очага прокатки. Видно, что на участке перехода от зоны осадки *A* к зоне редуцирования *B* скорость ультразвука принимает минимальное значение. Это означает, что на данном участке остаточные растягивающие напряжения имеют наибольшие значения [7].

Заключение. Результаты проведенного исследования показывают, что материал образца 2 после прокатки находился в неоднородном напряженно-деформированном состоянии. В этом образце наблюдался наиболее высокий уровень остаточных напряжений, поэтому уже в начале процесса деформирования здесь сформировался высокоамплитудный очаг локализации, дальнейшее накопление деформации происходило преимущественно

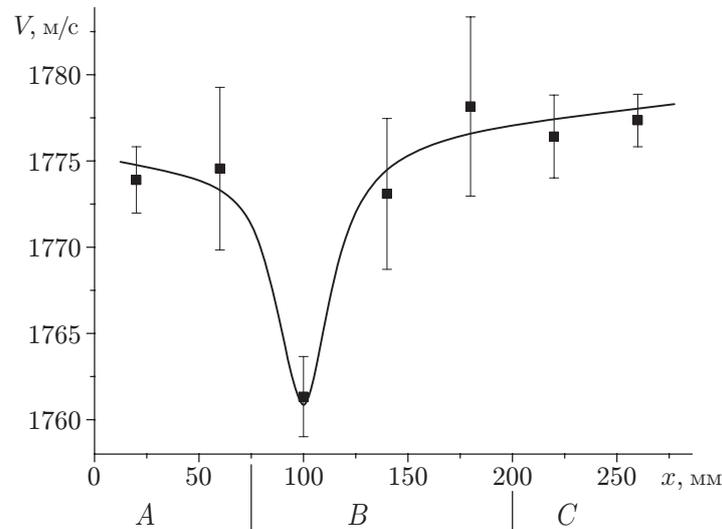


Рис. 3. Распределение скорости ультразвука по зонам очага холодной прокатки (обозначения те же, что на рис. 1)

в нем, что в конечном счете привело к разрушению. Следовательно, в результате холодной прокатки на участке перехода от зоны осадки к зоне редуцирования происходит значительное исчерпание запаса пластичности циркониевого сплава. Поэтому именно здесь наиболее вероятны разрывы. Для того чтобы избежать неблагоприятных последствий, необходимо перераспределить степень обжатия по очагу прокатки, несколько уменьшив ее в зоне осадки и увеличив в зоне редуцирования путем изменения формы калибров и оправки.

Такой вывод следует из комплексного анализа результатов акустических измерений и исследования картин макролокализации пластической деформации. Традиционные способы оценки запаса пластичности материала по механическим характеристикам этого не обеспечивают.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зуев Л. Б.** Физика макролокализации пластического течения / Л. Б. Зуев, В. И. Данилов, С. А. Баранникова. Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма, 2008.
2. **Zuev L. B.** On the waves of plastic flow localization in pure metals and alloys // *Ann. Physics.* 2007. V. 16, N 4. P. 286–310.
3. **Николис Г.** Самоорганизация в неравновесных системах / Г. Николис, И. Пригожин. М.: Мир, 1979.
4. **Кадомцев Б. Б.** Динамика и информация. М.: Ред. УФН, 1997.
5. **Данилов В. И., Орлова Д. В., Зуев Л. Б., Болотина И. О.** О локализации пластической деформации на стадии предразрушения и возможности прогнозирования места и времени вязкого разрушения // *Журн. техн. физики.* 2011. Т. 81, № 2. С. 51–57.
6. **Зуев Л. Б., Зыков И. Ю., Данилов В. И., Заводчиков С. Ю.** Неоднородность пластического течения сплавов циркония с параболическим законом деформационного упрочнения // *ПМТФ.* 2000. Т. 41, № 6. С. 133–138.
7. **Зуев Л. Б., Семухин Б. С., Лунев А. Г.** О возможности оценки прочности металлов и сплавов неразрушающим ультразвуковым методом // *ПМТФ.* 2002. Т. 43, № 1. С. 202–204.

8. Данилов В. И., Зуев Л. Б., Горбатенко В. В., Павличев К. В. Использование спекл-интерферометрии для исследования локализации пластической деформации // Завод. лаб. 2006. Т. 72, № 12. С. 40–45.
9. Данилов В. И., Зуев Л. Б., Летахова Е. В. и др. Типы локализации пластической деформации и стадии диаграмм нагружения металлических материалов с различной кристаллической структурой // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 2. С. 176–184.
10. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. М.: Физматгиз, 1961.
11. Данилов В. И., Орлова Д. В., Зуев Л. Б., Шляхова Г. В. Автоволны локализованной пластической деформации и вязкое разрушение // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Физика радиац. повреждений и радиац. материаловедение. 2011. № 4. С. 66–72.

Поступила в редакцию 11/Х 2011 г.
