

01.5

## Масштабный эффект при автоволновой пластической деформации

© Л.Б. Зуев, В.И. Данилов, М.В. Надежкин

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

E-mail: lbz@ispms.tsc.ru

Поступило в Редакцию 15 мая 2020 г.

В окончательной редакции 15 мая 2020 г.

Принято к публикации 25 мая 2020 г.

Изучена взаимосвязь между пространственным параметром развития локализованного пластического течения (длиной автоволны локализованной пластичности) и длиной деформируемого образца. В экспериментах, проведенных на поликристаллических образцах из сплава циркония и технически чистого алюминия, установлен логарифмический закон связи этих величин, действующий на стадии параболического деформационного упрочнения.

**Ключевые слова:** металлы, пластичность, автоволны, локализация, деформация, деформационное упрочнение, масштабный эффект.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.17.49887.18378

Современный взгляд на природу пластической деформации как на многомасштабный процесс, в основе которого лежит самоорганизация в активных открытых механических системах [1–4], требует ответа на вопрос о возможной взаимосвязи параметров локализации пластической деформации с размерами деформируемой системы. Подобная проблема масштабного эффекта важна для понимания автоволновой природы пластического течения, а информация о форме такой зависимости может способствовать пониманию природы зон локализации пластичности и кинетики их генерации.

Настоящая работа посвящена анализу взаимосвязи между длиной образца  $L$  и пространственным периодом локализации (длиной автоволны локализованной пластичности)  $\lambda$ , т.е. зависимости  $\lambda(L)$ . Ее удобно рассмотреть на примере стационарных диссипативных структур, возникающих при деформации на стадии параболического упрочнения [1]. Экспериментальное исследование масштабного эффекта при развитии автоволн локализованного пластического течения было проведено на образцах разной длины, изготовленных из листов циркониевого сплава (2.5 wt.% Nb) с размером зерна  $2\ \mu\text{m}$  и листов технически чистого алюминия А5 с размером зерна  $85\ \mu\text{m}$ . Диаграммы течения этих материалов имеют устойчивую и легко выделяемую на кривой напряжение–деформация  $\sigma(\varepsilon)$  стадию параболического упрочнения, на которой  $\sigma \sim \varepsilon^{1/2}$ , что и явилось причиной их использования в экспериментах. Данные, полученные ранее на циркониевом сплаве [5], где длина образцов Zr составляла 25, 50, 75, 100 и 125 mm при одинаковой ширине 5 mm, были дополнены данными для алюминиевых образцов длиной 20, 25, 30, 35, 40, 50 и 75 mm. Использование в обоих случаях одинаковой геометрии образцов позволило обеспечить в эксперименте достаточную однородность свойств образцов.

Подготовленные образцы испытывались на одноосное растяжение при 300 K при скорости перемещения по-

движного захвата  $6.7 \cdot 10^{-3}\ \text{mm/s}$ . Варьирование рабочей длины образцов в указанных пределах не оказало влияния на показатели механических свойств и вид кривой растяжения. Деформационные кривые во всех случаях гладкие, без особенностей, стадии упрочнения четко не выражены. Анализ кривых нагружения по методике, описанной в [1], показал, что они содержат стадию параболического деформационного упрочнения в интервале общих деформаций  $0.03 \leq \varepsilon_{\text{tot}} \leq 0.15$ .

Одновременно с растяжением методом DIC (digital image correlation) проводилась регистрация полей локальных перемещений с частотой 10 Hz. Для расчета векторов перемещения точек образца выбрано рабочее окно продолжительностью 15 s. Сравниваются изображения на концах этого промежутка времени, и таким образом определяется вектор перемещения любой точки образца. Повторяя эту операцию, можно зарегистрировать поле векторов перемещения для всех точек образца в избранный момент времени. Дифференцирование поля по координатам обеспечивает получение пространственного распределения локальных удлинений  $\varepsilon_{xx}$  для любого момента времени. Эти распределения имеют пространственно-периодический характер в виде набора локальных максимумов  $\varepsilon_{xx}$ . Поскольку амплитуды максимумов относительно невелики, а распределения локальных деформаций сильно зашумлены, пространственные периоды  $\lambda$  определяются с большой погрешностью. Учитывая, что на стадии параболического упрочнения Тейлора формируется стационарная диссипативная структура, имеющая вид совокупности неподвижных очагов локализации, точность определения  $\lambda$  можно повысить, если суммировать пространственные распределения  $\varepsilon_{xx}(x)$  за время протекания параболической стадии, как это показано на рис. 1. Это приводит к увеличению регистрируемой амплитуды деформации в очагах локализации и соответствующему повышению точности измерения длины автоволны  $\lambda$ . Длина

Параметры зависимости  $\lambda(L)$  для циркония и алюминия

Металл (сплав)	Константы		
	$\lambda_0, \text{mm}$	$\alpha, \text{mm}$	$L_0, \text{mm}$
Zr (Э125)	-21.4	7.8	15.0
Al (A5)	-0.28	1.21	1.2

пространственного периода локализованной деформации (длина автоволны) определялась при одинаковой для всех размеров образцов общей деформации, соответствующей концу стадии параболического упрочнения.

Оказалось, что при одинаковых скоростях растяжения, ширине образца и температуре для обоих металлов пространственный период локализации деформации зависит от длины образца логарифмически как  $\lambda(L) = \lambda_0 + \alpha \ln L$ . Значения эмпирических констант  $\lambda_0$  и  $\alpha$  приведены в таблице.

Экспериментально полученные данные для Zr и Al представлены на рис. 2 в координатах  $\frac{\lambda - \lambda_0}{\alpha} - \ln L$ . Коэффициент корреляции обобщенной зависимости  $\sim 1$ . Используем подстановку  $\lambda_0 = -\alpha \ln L_0$  и получим соотношение

$$\lambda(L) = \alpha \ln \frac{L}{L_0} \sim \ln L, \tag{1}$$

в котором параметр  $L_0$ , очевидно, определяет условие существования автоволн локализованной пластичности. Действительно, поскольку  $\lambda > 0$ , автоволны локализованной пластичности могут возникать только при условии  $L > L_0$ . Оцененные из экспериментальных данных для Zr и Al значения порогового размера  $L_0$  приведены в таблице.

Полученную зависимость можно интерпретировать, предполагая, что приращение длины автоволны локализованной пластичности  $d\lambda$  пропорционально относитель-

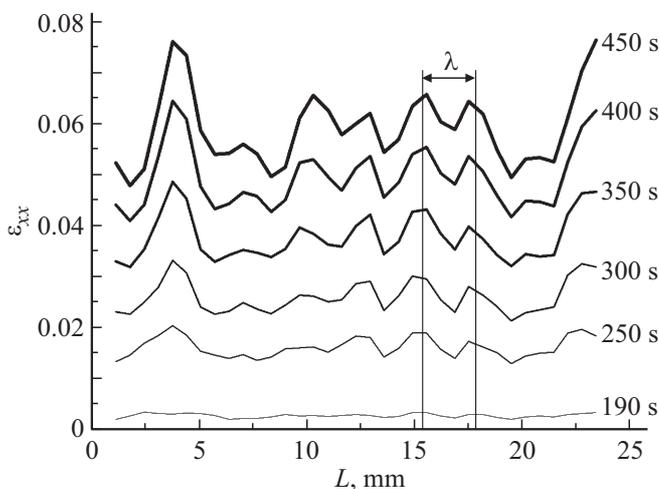


Рис. 1. Распределения локальных удлинений по образцу алюминия длиной 25 мм. Время 190 с — начало параболической стадии, 450 с — окончание параболической стадии.

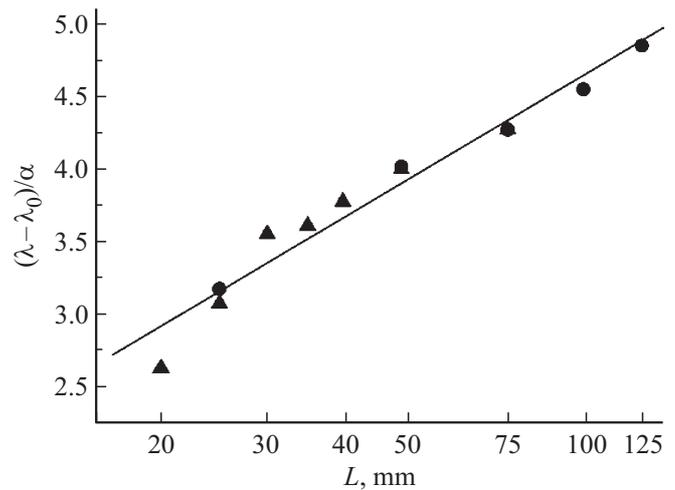


Рис. 2. Зависимость пространственного периода локальных удлинений от длины деформируемого образца. Треугольники — Al, кружки — Zr.

ному увеличению длины образца  $dL/L$ , т. е.

$$d\lambda = \alpha \frac{dL}{L}. \tag{2}$$

Отсюда, очевидно, следует логарифмическая зависимость (1). Коэффициент пропорциональности  $\alpha$  в этом случае может рассматриваться как масштабная единица пространственной неоднородности пластической деформации в образце. Величина  $L_0$  в (1) может рассматриваться как минимальный размер образца, в котором еще возможно возникновение периодических картин локализации пластического течения. В образцах длиной  $L \leq L_0$  при растяжении следует ожидать однородного распределения деформации.

Оценка минимальной длины автоволны локализованной пластичности может быть выполнена в соответствии с представлениями авторов [6], согласно которым, она получается из равенства периода колебаний в автоволновой системе  $T = 2\pi/\omega$  и характерного времени диффузии в ней, т. е.

$$\frac{1}{2} \frac{L_{\min}^2}{D_{\epsilon\epsilon}} \approx T, \tag{3}$$

где  $D_{\epsilon\epsilon}$  — транспортный коэффициент в уравнении, описывающем развитие локализованного пластического течения в металле [1]. Если  $T = 10^2 \text{ s}$ , а  $D_{\epsilon\epsilon} \approx 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  [1], то  $L_{\min} \approx 4.5 \text{ mm}$ , что близко к данным, приведенным в таблице.

Пороговый характер размерной зависимости характеристик макролокализации, возможно, объясняет тот факт, что в литературе, посвященной проблемам локализации деформации, редко упоминается о наблюдении периодических картин локализации пластической деформации, поскольку обычно используются образцы малой длины (1–10 мм). Локализация деформации, видимо,

является причиной существования масштабного эффекта (зависимости прочности от размеров, играющей важную роль в технике).

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики прочности и материаловедения СО РАН (проект III.23.1.2).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Зуев Л.Б. Автоволновая пластичность. Локализация и коллективные моды. М.: Физматлит, 2018. 208 с.
- [2] Barannikova S., Li Yu., Malinovsky A., Pestov D. // Key Eng. Mater. 2016. V. 683. P. 84–89.
- [3] Зуев Л.Б., Баранникова С.А. // ЖТФ. 2020. Т. 90. В. 5. С. 773–781.
- [4] Pontes J., Walgraef D., Aifantis E.C. // Int. J. Plast. 2006. V. 22. N 7. P. 1486–1505.
- [5] Заводчиков С.Ю., Зуев Л.Б., Котрехов В.А. Металловедческие вопросы производства изделий из сплавов циркония. Новосибирск: Наука, 2012. 255 с.
- [6] Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 512 с.