

01;05

## О локализации пластической деформации на стадии предразрушения и возможности прогнозирования места и времени вязкого разрыва

© В.И. Данилов,<sup>1</sup> Д.В. Орлова,<sup>1</sup> Л.Б. Зуев,<sup>1</sup> И.О. Болотина<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634021 Томск, Россия<sup>2</sup> Томский политехнический университет,

634050 Томск, Россия

e-mail: dvi@ispms.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 30 марта 2010 г. В окончательной редакции 18 июня 2010 г.)

Представлены результаты исследования характера локализации макродеформации на стадии перехода от пластического течения к вязкому разрушению широкого круга металлических материалов. Установлено, что закономерности этого процесса имеют единую природу с собственно пластической деформацией и представляют собой смену типов автоволн локализованной деформации в следующей последовательности: фазовая автоволна → стационарная диссипативная структура → коллапс автоволны или ее стягивание в месте будущего разрушения образца. Кинетические характеристики коллапсирующей на стадии предразрушения автоволны, которые могут быть установлены экспериментально, позволяют предсказывать пространственно-временные координаты разрушения объектов задолго до появления внешних признаков такого разрушения.

### Введение

Изучение природы пластической деформации твердых тел в течение последних двух десятилетий привело к важному заключению о том, что пластическое течение неоднородно на любом этапе. Универсальность этого положения прослеживается на микроскопическом [1], мезоскопическом [2] и макроскопическом [3] масштабных уровнях. Можно утверждать, что микро- и макромасштабные явления локализации становятся существенными для процессов пластического течения практически одновременно. В [3] подчеркивается, что явление макролокализации характерно для любых материалов и любых условий нагружения, а формы очагов макролокализации и их кинетика определены законом пластического течения, т.е. стадийностью кривой нагружения материала. Это позволило сформулировать правило соответствия [3,4], согласно которому каждой стадии деформационного упрочнения соответствует определенная картина макролокализованной деформации, а именно:

— на площадке текучести при коэффициенте деформационного упрочнения  $d\sigma/d\varepsilon \equiv \theta \approx 0$  или на стадии легкого скольжения монокристаллов наблюдаются движущиеся вдоль образца одиночные деформационные фронты;

— картина локализации деформации на стадии линейного упрочнения при  $\sigma \propto \varepsilon$  и  $\theta = \text{const}$  представляет собой систему эквидистантно расположенных движущихся очагов локализованной деформации, имеющую признаки волнового процесса с постоянными длиной волны  $\lambda \approx 10 \text{ mm}$  и скоростью распространения  $10^{-5} \leq V_{aw} \leq 10^{-4} \text{ m/s}$ ;

— на стадии параболического упрочнения, когда  $\sigma \propto \varepsilon^{1/2}$ , а  $\theta \propto \varepsilon^{-1/2}$  (упрочнение по Тейлору [5]),

зоны локализации пластической деформации формируют стационарную пространственно-периодическую картину с постоянной длиной волны  $\lambda \approx 10 \text{ mm}$ ;

— на завершающей процесс стадии предразрушения в месте будущего разрушения формируется стационарный высокоамплитудный очаг локализованной пластичности. При этом остальные зоны локализации движутся с разными, но взаимосогласованными скоростями [6], так что длина волны  $\lambda$  по мере роста деформации уменьшается.

Закономерности эволюции картин макролокализации на всем протяжении кривой пластического течения удовлетворительно описываются в рамках автоволновой концепции [3]. На ее базе авторы [6] выдвинули предположение, что процесс формирования шейки вязкого разрушения связан с кинетическими закономерностями движения очагов локализованной деформации на заключительной стадии деформирования. Ранее [6] первые результаты исследования характера макролокализации пластической деформации на стадии предразрушения были получены только для четырех металлических сплавов с разными типами кристаллической решетки. Ясно, что на основе такого объема экспериментального материала трудно оценить степень общности в поведении деформируемых твердых тел на этой стадии процесса. Представленная работа посвящена углубленному исследованию процессов макролокализации пластического течения на стадии предразрушения.

### Материалы для исследования и экспериментальные процедуры

В настоящей работе круг исследованных материалов, как показано в табл. 1, был существенно расширен в сравнении с [6]. Все исследованные материалы являются

Таблица 1. Исследованные материалы и их характеристики

Сплав, марка, тип решетки, состав	Размер зерна, $\mu\text{m}$	Стадии кривой нагружения	Продолжительность стадии предразрушения, %, показатель упрочнения $n$	Относительное удлинение до разрыва $\delta, \%$
Алюминий А85, ГЦК 99.85% Al	< 0.5 (СМК)	Параболическая Тейлора, предразрушения	1.1; 0.07	6.7
	50 (кз)	Линейная, параболическая Тейлора, предразрушения	2.5; 0.35	29
Дюралюмин Д1, ГЦК, Al + 3.5%Cu + 0.5%Mn + 0.2%Mg	30	то же	7.5; 0.3	17.6
Циркониевый сплав Э125, ГПУ, Zr + 2.5%Nb	3 ( $\alpha$ -Zr) < 0.3 ( $\beta$ -Nb)	» »	3.0; 0.35	12.5
Магний сплав МА8, ГПУ, Mg + 1.7%Mn + 0.25%Ce	12	» »	5.5; 0.35	18
Титан ВТ1-0, ГПУ, 99.6%Ti	15 (кз)	» »	8.5; 0.4	25
	< 0.1 (СМК)	Параболическая Тейлора, предразрушения	1.5; 0.06	6.1
Ванадиевый сплав, ОЦК, V + 2.3%Zr + 0.4%C	5	Линейная, параболическая Тейлора, предразрушения	7.2; 0.4	21
Сталь 40Ч13, ОЦК, Fe + 13%Cr + 0.4%C	8 (феррит), 1.5 (карбиды)	то же	1.7; 0.4	6.5
Кремнистое железо Э3413, ОЦК, Fe + 3%Si	$5 \cdot 10^3$ (кз)	» »	4; 0.4	16
	50 (мз)	Параболическая Тейлора, предразрушения	15.0; 0.4	24.5

Примечание. СМК — субмикроструктурный, кз — крупнозернистый, мз — мелкозернистый.

поликристаллами с ГЦК, ОЦК и ГПУ кристаллическими решетками. Размеры зерна использованных металлов и сплавов изменяются в широких пределах от сверхкрупнозернистых (кремнистое железо) до субмикроструктурных (А85 и ВТ1-0). Образцы для исследований изготавливались из листов штамповкой в форме двойной лопатки с размерами рабочей части  $40 \times 6 \times 1 \text{ mm}$  или  $50 \times 10 \times 1 \text{ mm}$ , а затем подвергались рекристаллизационному отжигу. Исключения составляли субмикроструктурные образцы (СМК), которые после интенсивной пластической деформации равноканальным угловым прессованием (А85) или многоступенчатым одноосным прессованием со сменой оси деформирования (ВТ1-0) прокатывались в холодную, затем штамповались и отжигались при температуре ниже температуры рекристаллизации.

Механические испытания по схеме одноосного растяжения со скоростью  $8.3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  проводились на испытательной машине Instron-1185 при комнатной температуре. Исходные кривые нагружения всех материалов  $\sigma(\epsilon)$  пересчитывались в истинные напряжение  $s$

и деформацию  $e$ , связь между которыми описывается уравнением Льюдвига  $s(e) = s_0 + Ke^n$  [7], где  $K$  — коэффициент деформационного упрочнения, а  $n$  — показатель упрочнения. Для выявления стадийности процесса пластического течения, как и в [6], зависимость  $s(e)$  строилась в логарифмических координатах. Участки, соответствующие стадиям пластического течения, в координатах  $\ln(s - s_0) = f(\ln e)$  выделяются как прямые с  $K = \text{const}$  и  $n = \text{const}$ . Набор стадий пластического течения был различен для исследованных материалов (см. табл. 1). У большинства материалов обнаруживались линейная ( $n = 1$ ), параболическая по Тейлору ( $n = 1/2$ ) стадии деформационного упрочнения, а также стадия предразрушения. Последняя могла состоять из отдельных участков (подстадий), для каждого из которых  $n < 1/2$ . На диаграммах СМК материалов и мелкозернистого ( $\sim 50 \mu\text{m}$ ) кремнистого железа стадия линейного упрочнения отсутствовала. В то же время продолжительная стадия предразрушения, для которой  $n < 1/2$ , наблюдалась во всех материалах (см. табл. 1).

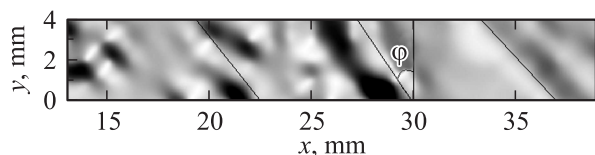


Рис. 1. Распределение очагов локализованной деформации на стадии Тейлора в образце алюминия А85 (СМК).

Регистрация и анализ картин локализации производились фиксированием полей смещений точек деформируемого образца методом двухэкспозиционной спекл-фотографии, подробно описанным в [3,8]. Информация о деформации, содержащаяся в каждой спеклограмме, представлялась в виде картин пространственных распределений одной из компонент тензора пластической дисторсии, соответствующей локальному удлинению  $\varepsilon_{xx}$ . Как показано на рис. 1, на этих картинах отчетливо выделяются очаги макролокализации деформации. Кинетика эволюции картин локализации для линейной и тейлоровской стадий описана в работе [3], поэтому в соответствии с целью настоящей статьи далее подробно рассмотрены только процессы, характерные для стадии предразрушения. Для анализа эволюции картин локализации удобно использовать зависимости положений очагов локализации на оси образца от времени, как это сделано, например, в работе [6].

## Экспериментальные результаты и их анализ

На начальных стадиях нагружения в полном согласии с правилом соответствия [3,4] очаги локализации во всех исследованных материалах располагались эквидистантно, причем на стадии линейного упрочнения они перемещались с постоянной скоростью, а на стадии Тейлора были неподжны. На рис. 1 можно видеть, что на стадии Тейлора наклоны очагов локализации относительно направления нормального к оси растяжения составляют  $37\text{--}43^\circ$  и близки к наклону плоскостей макроскопического сдвига для изотропного материала, деформирующегося в соответствии с критериями пластичности Треска и Мизеса ( $35^\circ 16'$ ) [9]. В конце стадии Тейлора непосредственно перед началом стадии предразрушения один из очагов локализованной деформации ориентируется нормально оси растяжения и останавливается. Он может располагаться как в середине образца (рис. 2, *a*), так и вблизи одного из захватов испытательной машины (рис. 2, *b*). Амплитуда деформации в таком очаге постоянно увеличивается. Остальные очаги остаются наклоненными к оси растяжения, а накопление деформации в них идет медленнее.

С началом стадии предразрушения, где показатель деформационного упрочнения  $n < 1/2$ , неподжные на стадии Тейлора очаги локализации начинают взаимосогласованно перемещаться вдоль оси растяжения (рис. 3),

приближаясь к отмеченным выше высокоамплитудным зонам, стационарным до разрушения. Очаги, движущиеся по разные стороны от неподжной зоны (рис. 3, *a*),

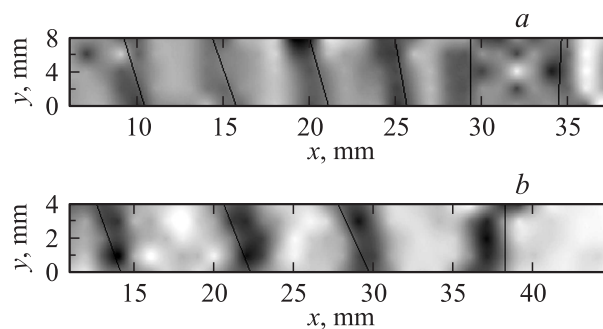


Рис. 2. Распределение очагов локализованной деформации перед началом стадии предразрушения в образцах дюралюмина Д1 (*a*) и титана ВТ1-0 (СМК) (*b*).

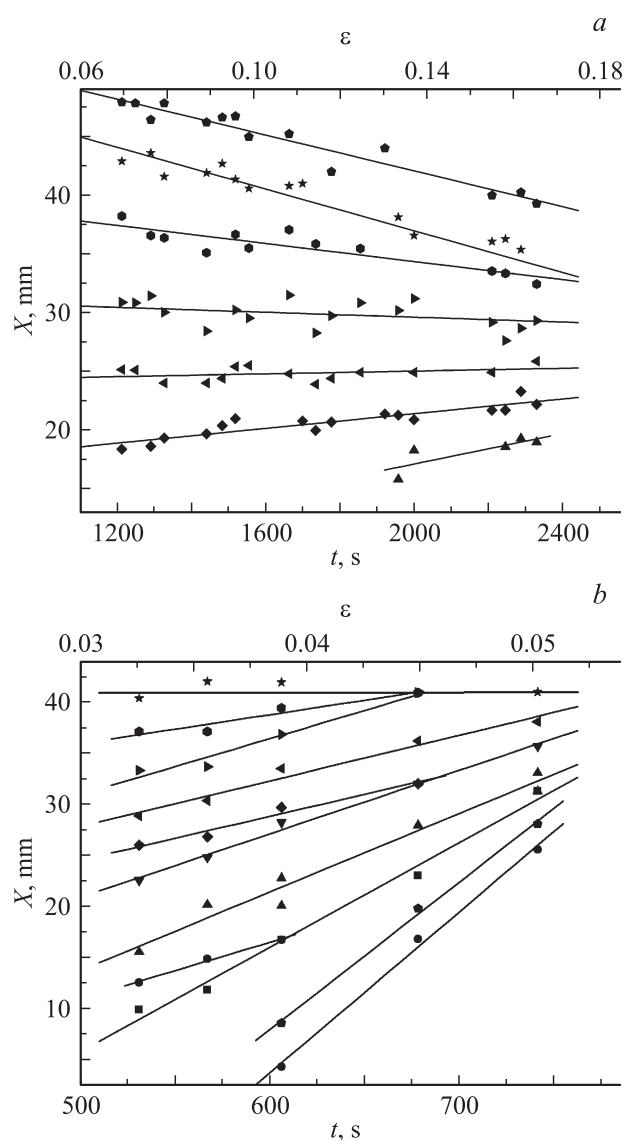


Рис. 3. Диаграммы движения очагов локализации на стадии предразрушения. *a* — кремнистое железо (МЗ), *b* — сталь 40X13.

имеют противоположные наклоны (рис. 2, *a*), а подходящие к неподвижной зоне с одной стороны (рис. 3, *b*) — одинаковые (рис. 2, *b*).

Другой особенностью движения очагов локализации является самосогласованность скоростей их перемещения. Чем дальше очаг локализации находится от неподвижной зоны, тем выше его скорость. Это приводит к тому, что все очаги достигают неподвижной зоны локализации одновременно, а графики зависимостей положений подвижных очагов от времени  $X(t)$  образуют, как показано на рис. 3, *b*, пучок прямых с координатами центра  $X^*$  и  $t^*$ . Нередко для определения  $X^*$  и  $t^*$  требуется экстраполяция зависимости  $X(t)$  к большим временам (рис. 3, *a*). При этом некоторые очаги локализованной деформации, движущиеся на этой стадии процесса, могут либо появляться, либо, как показано на рис. 3, *b*, исчезать в определенный момент времени, прекращая свое развитие. Согласно экспериментальным данным всех исследованных материалов, место разрушения образца также совпадает с положением неподвижной зоны локализации. Таким образом, вопрос о положении стационарной зоны, а следовательно, и полюса графиков движения очагов на стадии предразрушения приобретает особый смысл.

Для количественного описания кинетики очагов на стадии предразрушения начало координат системы отсчета удобно совместить с неподвижной зоной локализации. В таком случае координата произвольно взятого очага  $\xi_i$  есть

$$\xi_i = X_i - X_0, \quad (1)$$

где  $X_0$  и  $X_i$  — соответственно координаты неподвижной зоны локализации и данного очага в лабораторной системе координат, начало которой совпадает с неподвижным захватом нагружающего устройства. В выбранной таким образом системе отсчета графики движения очагов образуют веер прямых с единым полюсом, если скорости очагов  $V_i$  линейно зависят от их координат  $\xi_i$ , т.е. выполняется соотношение

$$V_i(\xi) = \alpha \xi_i + \alpha_0, \quad (2)$$

где  $\alpha$  и  $\alpha_0$  — эмпирические константы.

В реально полученных зависимостях  $X(t)$  так хорошо, как, например, на рис. 3, *b*, выявить полюс удается не всегда. Однако его положение можно найти, используя зависимость (2). Это иллюстрируется на примере мелкозернистого кремнистого железа. В лабораторной системе на момент начала стадии предразрушения координата стационарной зоны локализации в кремнистом железе  $X_0 \approx 31$  mm (рис. 3, *a*). На рис. 4 представлены положения остальных очагов относительно указанной зоны для этого же момента времени. Скорости очагов  $V$  определены по наклону прямых на рис. 3, *a*, проведенных методом наименьших квадратов. Видно, что зависимость  $V(\xi)$  линейна и имеет коэффициенты  $\alpha_0 = -2 \cdot 10^{-3}$  m/s и  $\alpha = 4.0 \cdot 10^{-4}$  s $^{-1}$ .

Из анализа размерностей коэффициентов  $\alpha$  и  $\alpha_0$  следует, что  $\alpha = 1/t$ , где  $t$  — время движения очагов

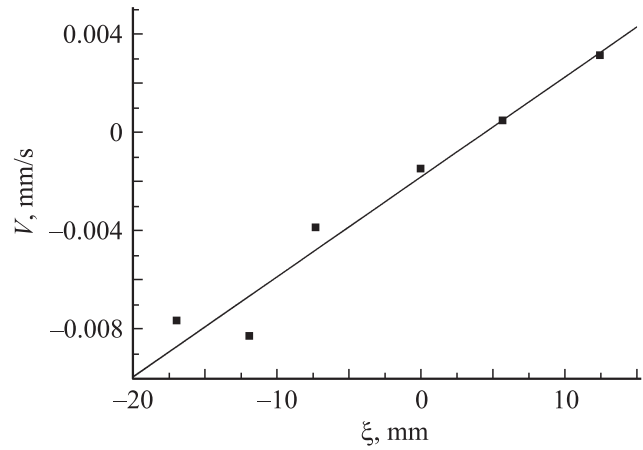


Рис. 4. Зависимость скоростей очагов локализации от координат в кремнистом железе (мз).

на стадии предразрушения, а соотношение  $\xi^* = \alpha_0/\alpha$  представляет собой отклонение полюса от неподвижного очага. Тогда в лабораторной системе отсчета местоположение полюса и время его достижения очагами локализации выразятся как

$$X^* = X_0 + \xi^* = X_0 + \frac{\alpha_0}{\alpha}, \quad (3a)$$

$$t^* = t_0 + \frac{1}{\alpha}, \quad (3б)$$

где  $t_0$  — момент начала стадии предразрушения. Рассчитанные по (3a) и (3б) положение полюса и время его достижения для кремнистого железа оказались  $X^* = 35$  mm и  $t^* = 3680$  s. В действительности разрушение образца произошло через 4015 s после начала деформирования на расстоянии 35 mm от неподвижного захвата испытательной машины. Видно, что пространственно-временные координаты полюса и экспериментальные значения местоположения и момента времени разрушения удовлетворительно согласуются, поэтому далее для других материалов координаты полюсов приведены как расчетные значения места и времени разрушения.

Рассмотрим физический смысл соотношения (2). В начале стадии предразрушения каждый очаг локализации симметрично окружен соседними, так как в конце тейлоровской стадии  $\lambda = \text{const}$ . В таком случае при уменьшении расстояния между очагами с одинаковыми деформационными полями должна возникать сила отталкивания, объясняющая, почему очаги, зародившиеся дальше от места будущего разрушения, имеют большую скорость движения, как это определяется соотношением (2). Положим, что скорость движения очагов локализованной пластичности является термически активированным процессом и описывается известным соотношением [10]:

$$V = V_0 \exp \left[ -\frac{U - \gamma \sigma}{kT} \right] = \Phi \exp \frac{\gamma \sigma}{kT}, \quad (4)$$

где  $\Phi \approx \text{const}$ . Поскольку удаленные от места разрушения очаги движутся быстрее, то вызывающее движение каждого из них напряжение  $\sigma$  есть разность

$\sigma \approx \sigma_{\text{ном}} - \sigma_{\text{обс}}$ , где  $\sigma_{\text{ном}}$  — номинальное напряжение, действующее на очаг локализованной пластичности, а вклад от неподвижного препятствия  $\sigma_{\text{обс}}$  падает с ростом расстояния до него. В качестве такого препятствия имеет смысл рассматривать неподвижный очаг локализованной пластичности, сформировавшийся в конце стадии Тейлора. Согласно (2),  $V_{\infty} \propto \xi_i$ , и, логарифмируя (4), получаем, что  $\sigma_{\text{обс}} \approx \text{const} - \ln \xi$ .

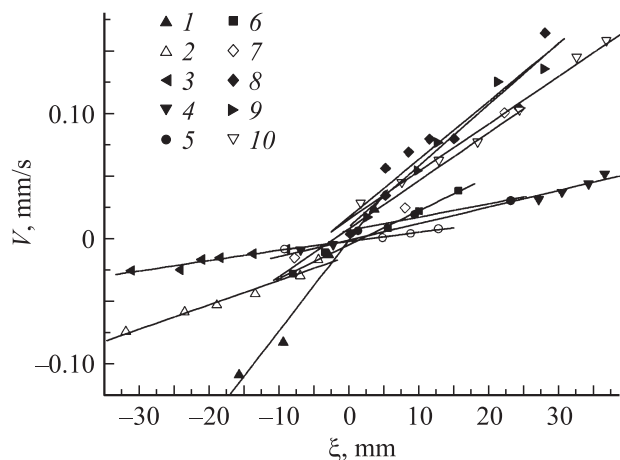
Представленные на рис. 5 зависимости  $V(\xi)$  для исследованных материалов имеют, очевидно, линейный характер и позволяют определить константы  $\alpha$  и  $\alpha_0$ , а по ним рассчитать значения времени и места разрушения образцов  $t_{\text{calc}}^*$  и  $X_{\text{calc}}^*$ . Сравнение расчетных и реальных пространственно-временных координат места разрушения  $t_{\text{exp}}^*$  и  $X_{\text{exp}}^*$  показало, что их относительное различие не более 0.1. Между этими величинами существует тесная корреляция, которая описывается уравнениями

$$t_{\text{calc}}^* = A + bt_{\text{exp}}^* \quad (5a)$$

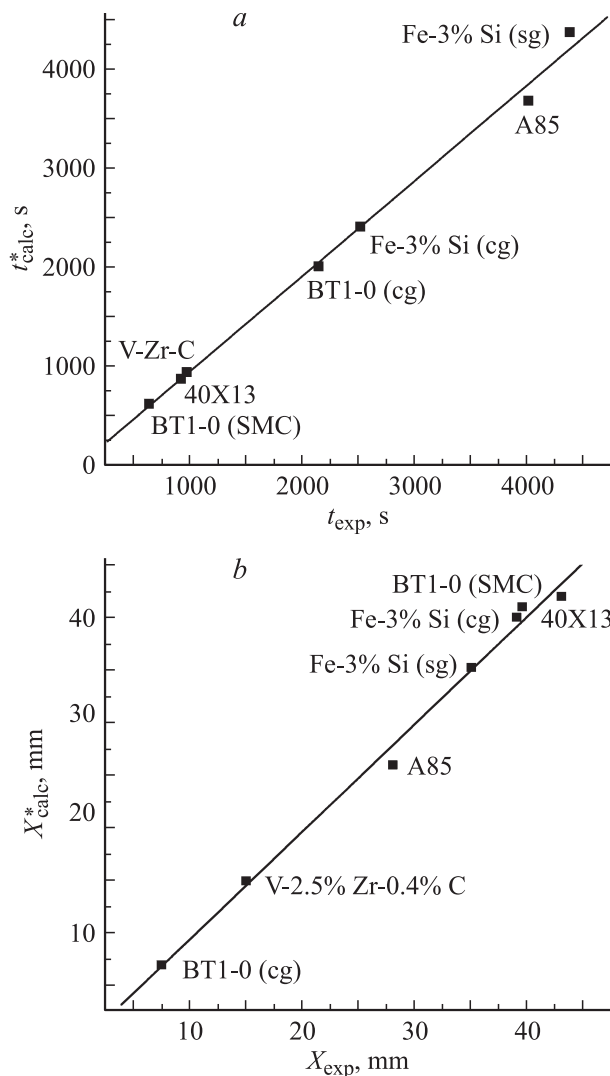
$$X_{\text{calc}}^* = C + gX_{\text{exp}}^* \quad (5b)$$

где  $A = 28s$ ,  $b = 0.96 \approx 1$ ,  $C = 0.8 \text{ mm}$ ,  $g \approx 1$ . Соответствующие графики представлены на рис. 6; коэффициенты корреляции величин  $X_{\text{calc}}^*$  и  $X_{\text{exp}}^*$ , а также  $t_{\text{calc}}^*$  и  $t_{\text{exp}}^*$  близки к единице. Так как  $A \ll t_{\text{exp}}^*$  и  $A \ll t_{\text{calc}}^*$ , величина  $C$  сравнима по точности определения координат очагов деформации ( $\pm 0.5 \text{ mm}$ ), а  $b \approx g \approx 1$ . Из этого следует, что пространственно-временные координаты полюса графиков движения очагов на стадии предразрушения близки к координатам места и времени реального разрушения, а формулы (4a) и (4b) допускают оценку этих параметров с приемлемой для прогнозирования точностью.

Кроме того, в пластичных материалах с продолжительной стадией предразрушения существует возможность предсказать пространственно-временные координаты зоны разрушения, у мелкозернистого кремнистого железа стадия предразрушения находится в пределах 0.08–0.22. Для определения положений очагов



**Рис. 5.** Зависимости  $V(\xi)$ : 1 — в ванадиевом сплаве; 2 — Э125; 3 — BT1-0 (кз); 4 — Fe-3%Si (кз); 5 — А85 (СМК); 6 — А85 (кз); 7 — Д1; 8 — МА8; 9 — BT1-0 (СМК); 10 — 40X13.



**Рис. 6.** Корреляционные зависимости между расчетными и экспериментально зарегистрированными пространственно-временными координатами разрушения  $t_{\text{calc}}^*$  (a).  $X_{\text{calc}}^*$  и  $X_{\text{exp}}^*$  (b). SMC — submicrocrystalline, cg — coarse-grained, sg — small-grained.

локализованной деформации главной экспериментальной процедурой является последовательная регистрация двухэкспозиционных спекл-фотографий (спеклограмм) с шагом по деформации  $\sim 0.02$ , так что в этом материале на стадии предразрушения было зарегистрировано 20 спеклограмм, т.е. охвачен интервал 0.08–0.15. Каждая спеклограмма дает информацию о положениях очагов локализованной деформации для конкретного значения интегральной деформации (времени деформирования) образца. Совокупность данных от последовательности спеклограмм позволяет определить скорости движения каждого очага. Зависимость скоростей очагов от начальных координат на рис. 4 построена по данным всех спеклограмм. Следовательно, расчет момента времени и места разрушения по константам  $\alpha$  и  $\alpha_0$  осуществлен при анализе последовательности из 20 спеклограмм

за 0.07 общей деформации до начала падения условных напряжений и визуально наблюдаемого локального уменьшения сечения образца (образования шейки разрушения). Однако при определении скоростей очагов можно использовать лишь часть спеклограмм.

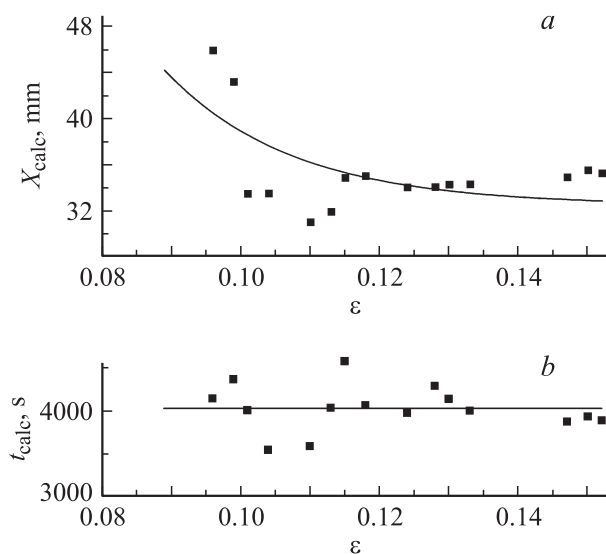
На рис. 7, *a* показано, как меняется расчетное значение  $X_{\text{calc}}^*$ , если использовать данные 20, 19, 18 и далее до пяти спеклограмм. По горизонтальной оси здесь отложены соответствующие спеклограммам деформации. Полученная зависимость удовлетворительно аппроксимируется уравнением

$$X_{\text{calc}}^* = A + B \exp\left(-\frac{\varepsilon_{\text{tot}}}{c}\right), \quad (6a)$$

где  $A = 33 \text{ mm}$ ,  $B = 6910 \text{ mm}$ ,  $c = 0.01$ . Видно, что начиная с  $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.1$  (использовано 8 спеклограмм) расчетное значение  $X_{\text{calc}} \approx 34 \text{ mm}$  практически не меняется и удовлетворительно согласуется с реальным значением  $X_{\text{exp}} \approx 35 \text{ mm}$ . Это значит, что место разрушения образца может быть определено не за 0.07, а за 0.115 общей деформации до достижения временного сопротивления разрушению. Аналогичным образом рассчитывались моменты времени разрушения. Полученная зависимость (рис. 7, *b*) описывается уравнением

$$t_{\text{calc}}^* = D + \chi \exp\left(-\frac{\varepsilon_{\text{tot}}}{g}\right), \quad (6b)$$

где  $D = 3330 \text{ s}$ ,  $\chi = 710 \text{ s}$ ,  $g = 4 \cdot 10^{10}$ . При любых значениях деформации  $\exp(-\varepsilon/b) \approx 1$ , поэтому начиная с 6-й спеклограммы, которая соответствует  $\varepsilon_{\text{tot}} = 0.1$ , рассчитанный момент времени разрушения составляет  $t_{\text{calc}}^* = 4040 \text{ s}$  и удовлетворительно совпадает с реальным временем разрушения образца  $t_{\text{exp}}^* = 4015 \text{ s}$ . Таким образом, проведенный анализ показывает, что для определения положения полюса достаточно иметь информацию о



**Рис. 7.** К расчету пространственно-временных координат разрушения по кинетическим характеристикам очагов локализованной деформации на стадии предразрушения.

**Таблица 2.** Соотношение между деформацией начала стадии предразрушения и относительным удлинением до разрыва

Материал	$\varepsilon_{\text{pre}} + 0.01$	$\delta$	$(\varepsilon_{\text{pre}} + 0.01)/\delta$
A85 (СМК)	0.032	0.067	0.48
BT1-0 (кз)	0.085	0.25	0.34
BT1-0 (СМК)	0.035	0.061	0.57
Ванадиевый сплав	0.108	0.21	0.51
MA8	0.085	0.18	0.47
Fe-3%Si (МЗ)	0.074	0.245	0.3
40X13	0.043	0.065	0.66
Э125	0.08	0.125	0.64

характере движения очагов в начале стадии предразрушения на участке  $\Delta\varepsilon_{\text{tot}} \approx 0.01$ .

Подобная процедура, проведенная для других материалов, позволяет определить величину общей деформации образца или соответствующего момента времени при постоянной скорости деформирования, когда возможно установить положение полюса. В таб. 2 показано соотношение этой деформации с общей деформацией образцов до разрушения. В табл. 2  $\varepsilon_{\text{pre}}$  — деформация в начале стадии предразрушения,  $\delta$  — общая деформация до разрушения. Видно, что предсказать положения полюса, а значит пространственно-временные координаты разрушения, можно при деформациях, составляющих 0.3–0.65 от общей деформации до разрушения образцов исследованных материалов.

## Заключение

На стадии предразрушения картина макролокализованной пластической деформации имеет две главные особенности. Прежде всего, на этой стадии очаги локализованной деформации начинают самосогласованно двигаться так, чтобы обеспечивался их одновременный приход в единый полюс. Из всех очагов локализованной пластичности с течением времени „выживает“ только один, положение которого уже при рождении соответствует месту образования макроскопической шейки и вязкого разрушения. Появившись еще на стадии тейлоровского деформационного упрочнения при  $n \approx 1/2$ , такой очаг остается затем почти неподвижным вплоть до разрушения, но деформация в нем постепенно растет по мере затухания активности процесса течения в других областях. Таким образом, оказывается, что место разрушения и время жизни образца до разрушения детерминированы процессами, происходящими на гораздо более ранних стадиях пластического течения.

Вторая особенность локализации пластического течения на стадии предразрушения состоит в том, что на ней могут появляться новые очаги локализованной пластичности. Они пространственно не связаны с существовавшими ранее на стадии тейлоровского деформационного упрочнения при  $n = 1/2$ . Рождение таких



очагов можно описать в рамках автоволновой двухкомпонентной модели локализации макродеформации [3,4]. Согласно этой модели, способные к самоорганизации открытые системы имеют тенденцию самопроизвольно расслаиваться на информационную (управляющую) и динамическую подсистемы, взаимодействие которых вызывает самоорганизацию внутренних процессов [11]. В случае деформируемой среды информационной подсистемы могут играть сигналы акустической эмиссии (фононы), излучаемые в ходе элементарных релаксационных актов пластического течения, а динамическая подсистема включает процессы движения дислокаций и/или их ансамблей, ответственные за формоизменение. Таким образом формируются автоволны локализованной деформации, относящиеся к классу нелинейных волновых процессов [12]. Объяснить коррелированное развитие пластического течения в очагах, удаленных друг от друга на макроскопическое расстояние  $\sim \lambda$ , можно, учитывая важную роль, которую играют при деформировании импульсы акустической эмиссии. Появление новых очагов локализации деформации на любой стадии течения может соответствовать условию интерференции испускаемых уже имеющимися соседними зонами локализованной деформации акустических волн [13,14]. Стадия предразрушения заканчивается остановкой процессов деформирования во всем объеме деформируемого материала, кроме той его части, которая непосредственно примыкает к месту зарождения шейки и вязкой трещины.

Таким образом, процесс эволюции пластической деформации вместе с переходом от пластического течения к вязкому разрушению есть смена типов автоволн локализованной деформации в такой последовательности: фазовая автоволна  $\rightarrow$  стационарная диссипативная структура  $\rightarrow$  коллапс [11] автоволны или стягивание последней в месте будущего разрушения образца. Кинетические характеристики коллапсирующей на стадии предразрушения автоволны, которые могут быть установлены экспериментально, позволяют предсказывать пространственно-временные координаты разрушения объектов задолго до появления внешних признаков такого разрушения при общей деформации, не превышающей 0.6 деформации при разрыве.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-08-00498).

## Список литературы

- [1] *Kuhlmann-Wilsdorf D.* Dislocations in Solids / Ed. by F.R.N. Nabarro and M.S. Duesbery. Amsterdam, Boston: Elsevier, 2002. P. 213–338.
- [2] *Panin V.E.* // Mat. Sci. Eng. A. 2001. Vol. 319–321. P. 197–200.
- [3] *Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А.* Физика макролокализации пластического течения. Новосибирск: Наука, 2008. 327 с.
- [4] *Zuev L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A., Gorbatenko V.V.* // Phys. Wave Phenom. 2009. Vol. 17. N 1. P. 66–75.
- [5] *Хоникомб Р.* Пластическая деформация металлов. М.: Мир, 1972. 408 с.
- [6] *Зуев Л.Б., Данилов В.И.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 12. С. 102–105.
- [7] *Хилл Р.* Математическая теория пластичности. М.: ГИТТЛ, 1956. 407 с.
- [8] *Данилов В.И., Зуев Л.Б., Горбатенко В.В.* // Заводская лаборатория. 2006. Т. 72. № 12. С. 40–45.
- [9] *Томас Т.* Пластическое течение и разрушение твердых тел. М.: Мир, 1964. 308 с.
- [10] *Инденбом В.Л., Орлов А.Н., Эстрин Ю.З.* Элементарные процессы пластической деформации кристаллов. Киев: Наукова думка, 1978. С. 93–112.
- [11] *Кадолицев Б.Б.* Динамика и информация. М.: Редакция УФН, 1997. 399 с.
- [12] *Davydov V.A., Davydov N.V., Morozov V.G., Stolyarov M.N., Yamaguchi T.* // Cond. Mater. Phys. 2004. Vol. 7. N 3. P. 565–578.
- [13] *Зуев Л.Б., Семухин Б.С., Зариковская Н.В.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 5. С. 57–62.
- [14] *Муравьев Т.В., Зуев Л.Б.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 8. С. 135–139.