

АВТОВОЛНЫ ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ВЯЗКОЕ РАЗРУШЕНИЕ

В.И. Данилов, Д.В. Орлова, Л.Б. Зуев, Г.В. Шляхова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия,

E-mail: dvi@ispms.tsc.ru; тел. (+73822)28-68-62, факс (+73822)49-25-76

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 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 протекает неоднородно на любом этапе и на любом уровне. Еще известные наблюдения Чернова [1] показывали, что при пластическом течении материал разделяется на части, причем, вся деформация оказывается сосредоточенной (локализованной) на границах между такими частями, а они сами остаются практически недеформированными. Проведенные в конце XX века экспериментальные исследования локализации пластического течения (см., например, [2]) подтвердили многообразие форм этого явления и его важную роль на всех этапах пластического течения. В [3] констатируется, что для любых материалов и любых условий нагружения характерно явление макролокализации, а формы локализации строго подчиняются правилу соответствия между распределениями очагов макролокализации, их кинетикой и стадийностью кривой нагружения материала:

- на площадке текучести (коэффициент деформационного упрочнения $\theta = 0$) или на стадии легкого скольжения монокристаллов ($\theta \approx 10^{-3}G$) наблюдаются движущиеся одиночные деформационные фронты;

- картина локализации деформации на стадии линейного упрочнения ($\theta = const$) представляет собой систему эквидистантно расположенных движущихся очагов локализованной деформации, имеющую признаки волнового процесса с постоянными длиной волны λ и скоростью V_{av} ;

- на стадии параболического упрочнения по Тейлору [4] ($\sigma \sim \epsilon^{1/2}$, $\theta \sim \epsilon^{1/2}$) зоны локализации пластической деформации формируют стационарную пространственно периодическую картину с постоянным пространственным периодом λ ;

- на завершающей стадии процесса деформирования (стадия предразрушения) все зоны локализации движутся неравномерно, но самосогласованно к сформировавшемуся на

предыдущей стадии стационарному очагу локализованной пластичности.

Авторами работ [3, 5] показано, что эволюция картин макролокализации на первых трех стадиях может быть представлена как процесс преобразования автоволн локализации пластического течения по схеме: автоволна переключения→фазовая автоволна→стационарная диссипативная структура. В работе [6] нами выдвинуто предположение, что процесс формирования шейки вязкого разрушения связан с кинетическими закономерностями движения очагов локализованной деформации на стадии предразрушения. Углубленному исследованию макролокализации пластической деформации на этой стадии посвящена представленная работа.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ

Экспериментальные исследования были проведены на поликристаллических материалах, перечень которых представлен в табл. 1. Среди них чистые металлы и сплавы с различными типами кристаллических решеток. Размеры зерен материалов менялись в широких пределах от сверхкрупнозернистых (кремнистое железо КЗ) до субмикрокристаллических (А85 и ВТ1-0 СМК). Образцы для исследований в форме двойной лопатки с размерами рабочей части $40 \times 6 \times 1$ или $50 \times 10 \times 1$ мм изготавливались из листов штамповкой, а затем подвергались рекристаллизационному отжигу. Исключение составляли субмикрокристаллические образцы, которые после интенсивной пластической деформации равноканальным угловым прессованием (А85) или abc-прессованием (ВТ1-0) прокатывались в холодную, затем штамповались и отжигались при температурах, ниже температуры рекристаллизации. Механические испытания по схеме одноосного растяжения со скоростью $8,3 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ 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 Людвига: $s(e) = s_0 + Ke^n$ [7], где K – коэффициент деформационного упрочнения, а n – показатель упрочнения. Для выявления стадийности процесса пластического течения была использована методика, предложенная Трефиловым с сотрудниками [8], по которой зависимости $s(e)$ представляются в логарифмических координатах. Участки, соответствующие стадиям пластического течения, в координатах $\ln(s - s_0) - \ln e$ выделяются как прямые с $K = const$ и $n = const$. Таким образом, основным индикатором стадии становится не коэффициент, а показатель деформационного упрочнения n .

Таблица 1

Исследованные материалы и их характеристики

Сплав, марка, тип решетки, состав	Размер зерен, мкм	Стадии кривой нагружения
Алюминий А85, ГЦК, 99,85% Al	< 0,5 (СМК)	Параболическая Тейлора, предразрушения
	50 (КЗ)	Линейная, параболическая Тейлора, предразрушения
Дуралюмин Д1, ГЦК, Al+3,5%Cu+0,5%Mn+0,2%Mg	30	То же
Циркониевый сплав Э125, ГПУ, Zr+2,5%Nb	3 (α -Zr), <0,3 (β -Nb)	“-
Магниевого сплава МА8, ГПУ, Mg+1,7%Mn+0,25%Ce	12	“-
	15 (КЗ)	“-
Титан ВТ1-0, ГПУ, 99,6% Ti	< 0,1 (СМК)	Параболическая Тейлора, предразрушения
	5	Линейная, параболическая Тейлора, предразрушения
Сталь 40Х13, ОЦК, Fe+13%Cr+0,4%C	8 (феррит), 1,5 (карбиды)	То же
	5·10 ³ (КЗ)	То же
Кремнистое железо Э3413, ОЦК, Fe+3%Si	50 (МЗ)	Параболическая Тейлора, предразрушения

Набор стадий пластического течения был различен для исследованных материалов (см. табл. 1). У большинства материалов обнаруживались линейная ($n = 1$) и 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 (МЗ) 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).

Регистрация и анализ картин локализации производились фиксированием полей смещений точек деформируемого образца методом двухэкспозиционной спекл-фотографии, который подробно описан в [5]. Информация о деформации, содержащаяся в каждой спеклограмме, представлялась в виде картин пространственных распределений одной из компонент тензора пластической дилатации, соответствующей локальному удлинению ϵ_{xx} . Как показано на рис. 1, на этих картинах отчетливо выделяются очаги макролокализации деформации. Для анализа эволюции картин локализации удобно использовать зависимости положений очагов локализации на оси образца от времени.

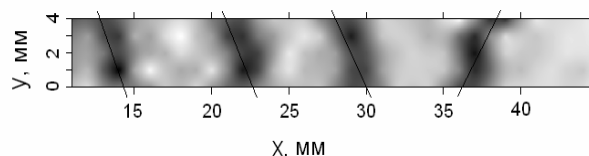


Рис. 1. Распределение очагов локализованной деформации на стадии Тейлора в образце СМК-Ti

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На начальных стадиях нагружения кинетика и пространственное положение очагов локализации находились в полном согласии с правилом соответствия [5]. На рис. 1 можно видеть, что на стадии Тейлора очаги расположены эквидистантно и наклонены относительно направления, нормального к оси растяжения, под углом 37...43°. В конце стадии Тейлора непосредственно перед началом стадии предразрушения один из очагов локализованной деформации, оставаясь неподвижным, ориентируется нормально к оси растяжения. Остальные очаги пространственного положения не меняют, но накопление деформации в них идет медленнее.

С началом стадии предразрушения, где показатель деформационного упрочнения $n < 1/2$, неподвижные на стадии Тейлора очаги локализации начинают перемещаться вдоль оси растяжения (рис. 2), приближаясь к отмеченным выше высокоамплитудным зонам, которые остаются неподвижными вплоть до разрушения. Очаги, движущиеся по разные стороны от неподвижной зоны (см. рис. 2,а), имеют противоположные наклоны, а подходящие к неподвижной зоне с одной стороны (см. рис. 2,б) – одинаковые. Особенностью их движения является взаимосогласованность скоростей перемещения, вследствие которой все очаги достигают неподвижной зоны локализации одновременно. В этом случае графики зависимостей положений подвижных очагов от времени $X(t)$ образуют, как видно на рис. 2, пучки прямых, координаты полюсов которых X^* и t^* располагаются вблизи неподвижной зоны локализации.

Для количественного описания кинетики очагов на стадии предразрушения начало координат системы отсчета удобно совместить с неподвижной зоной локализации. В таком случае координата произвольно взятого i -го очага ξ_i определяет скорость его перемещения:

$$V_i(\xi) = \alpha \xi_i + \alpha_0, \quad (1)$$

где α – и α_0 – эмпирические константы.

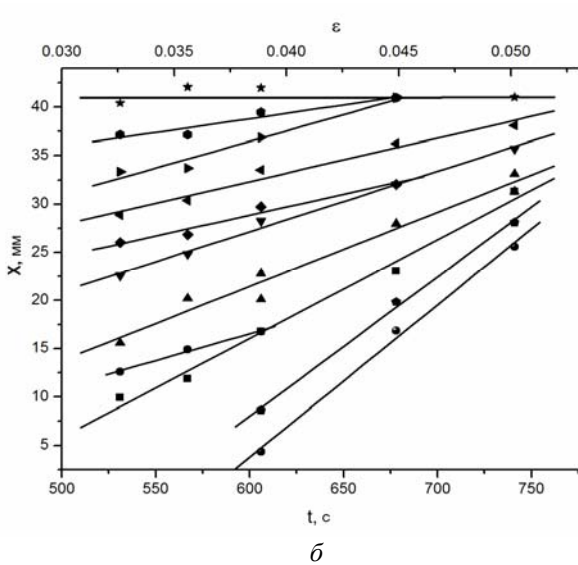
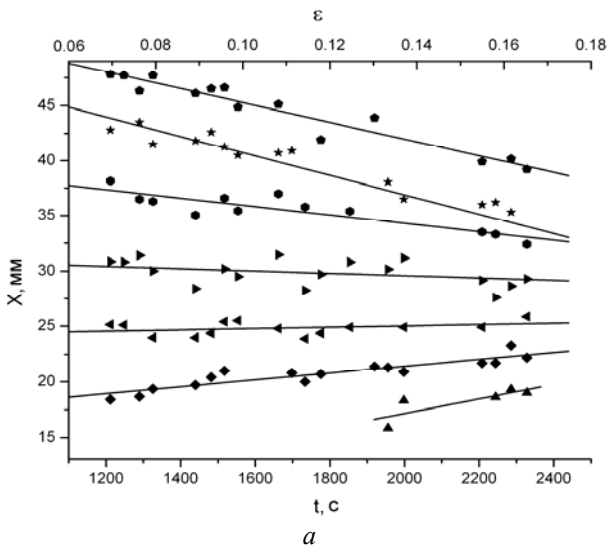


Рис. 2. Диаграммы движения очагов локализации на стадии предразрушения: а – кремнистое железо (МЗ), б – сталь 40Х13

Рассмотрим физический смысл (1). В начале стадии предразрушения каждый очаг локализации симметрично окружен соседними, так как на тейлоровской стадии очаги расположены эквидистантно. В таком случае уменьшение расстояния между очагами с одинаковыми полями напряжений и деформаций создает силу отталкивания, объясняющую, почему очаги, зародившиеся дальше от места будущего разрушения, движутся с большей скоростью. Положим, что скорость движения очагов локализованной деформации есть термически активированный процесс [4], описываемый соотношением:

$$V_{aw} = V_0 \exp[-(U - \gamma\sigma)/kT] = \Phi \exp \gamma\sigma/kT, \quad (2)$$

где $\Phi = V_0 \exp(-U/kT) \approx const$. Вызывающее движение очагов напряжение σ – разность $\sigma \approx \sigma_f - \sigma_{obs}$, где σ_f – напряжение течения в образце, а вклад от неподвижного препятствия σ_{obs} падает с ростом расстояния до него, т.е. $\sigma_{obs} \sim 1/\xi$. В качестве такого препятствия имеет смысл рассматривать неподвижный высокоамплитудный очаг локализованной пластичности, сформировавшийся в конце стадии Тейлора и определяющий место будущего разрушения. С учетом увеличения числа очагов и спада напряжения с расстоянием можно записать: $-d\sigma_{obs}/d\xi \sim 1/\xi^2$, откуда, очевидно, что $\sigma_{obs} \sim const - \ln \xi$. Подстановка последнего соотношения в (2) приводит к зависимости $V_{aw} \sim \xi$, эквивалентной (1).

Из анализа размерностей коэффициентов α и α_0 следует, что $\alpha = 1/t$, где t – время движения очагов на стадии предразрушения, а соотношение $\xi^* = \alpha_0/\alpha$ представляет собой отклонение полюса от неподвижного очага. Тогда в лабораторной системе отсчета, где 0 совпадает с положением неподвижного захвата нагружающего устройства, местоположение полюса и время его достижения очагами локализации выразятся как

$$X^* = X_0 + \xi^* = X_0 + \alpha_0 / \alpha; \quad (3a)$$

$$t^* = t_0 + 1/\alpha, \quad (3б)$$

где t_0 – момент начала стадии предразрушения. Рассчитанные по (3а) и (3б) положение полюса и время его достижения для кремнистого железа оказались $X^* = 35$ мм и $t^* = 3680$ с. В действительности разрушение образца произошло через 4015 с после начала деформирования на расстоянии 35 мм от неподвижного захвата испытательной машины.

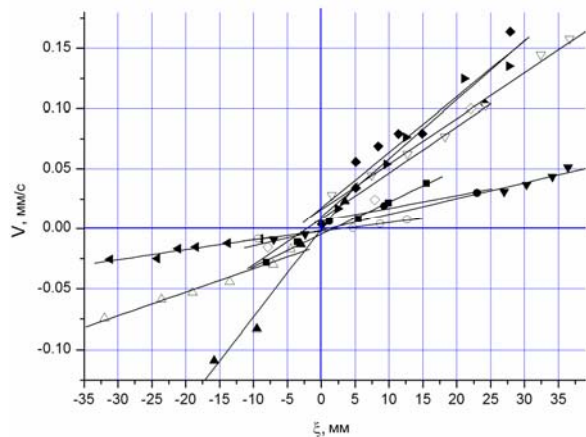


Рис. 3. Зависимости $V(\xi)$: ванадиевый сплав – ▲; Э125 – △; ВТ1-0 (КЗ) – ◀; Fe-3%Si (КЗ) – ▼; А85 (СМК) – ●; А85 (КЗ) – ■; Д1 – ◇; МА8 – ◆; ВТ1-0 (СМК) – ▶; 40Х13 – ▽

Следовательно, 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. Линейная зависимость скоростей движения очагов локализации от их координат выполняется для всех исследованных материалов, что можно видеть на рис. 3. По этим данным, используя (1), (3а) и (3б), были рассчитаны значения времени и места разрушения образцов t_{calc}^* и X_{calc}^* остальных материалов.

На рис. 4, а и б показано сравнение этих значений с реально зафиксированными t_{exp}^* и X_{exp}^* . Видно, что между этими величинами существует тесная корреляция, которая описывается уравнениями:

$$t_{calc}^* = A + bt_{exp}^* ; \quad (4a)$$

$$X_{calc}^* = C + gX_{exp}^* , \quad (4б)$$

где $A = 28$ с; $b = 0,96 \approx 1$; $C = 0,8$ мм; $g = 1,03$. Так как $A \ll t_{exp}^*$ и $A \ll t_{calc}^*$, величина C сравнима с точностью определения координат очагов деформации ($\pm 0,5$ мм), а $b \approx g \approx 1$, то следует, что пространственно-временные координаты полюса графиков движения очагов на стадии предразрушения близки к координатам места и времени реального разрушения. При этом для расчета этих данных достаточно определить положения и скорости очагов локализации в начале стадии предразрушения, когда падение условных напряжений не происходит, а визуально наблюдаемая шейка разрушения еще не сформировалась.

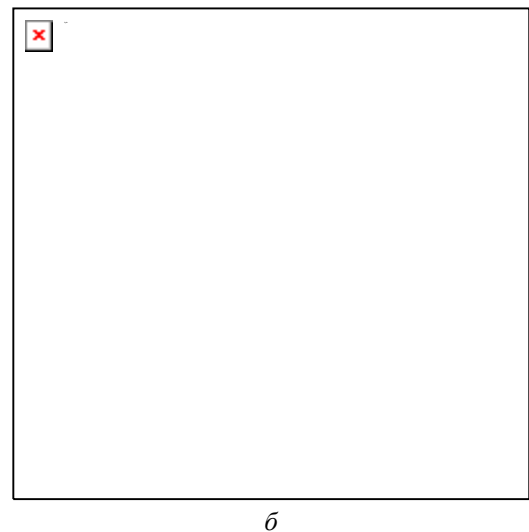
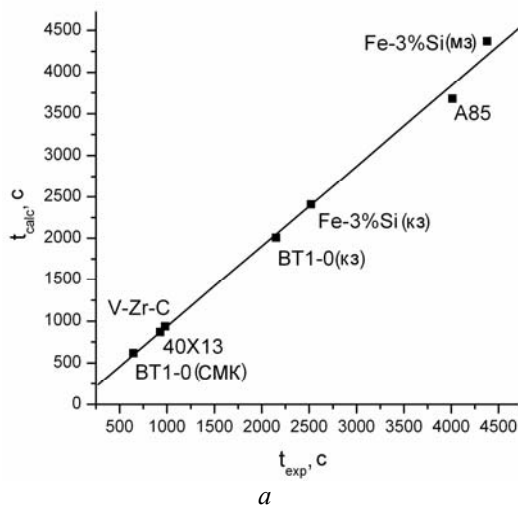


Рис. 4. Корреляционные зависимости между расчетными и экспериментально зарегистрированными пространственно-временными координатами разрушения

Продемонстрируем это на примере мелкозернистого кремнистого железа. В нем стадия предразрушения находится в пределах 0,08...0,22. Для определения положений очагов локализованной деформации проводится последовательная регистрация двухэкспозиционных спекл-фотографий с шагом по деформации $\sim 0,002$. В этом материале на стадии предразрушения было зарегистрировано 20 спеклограмм, т. е. охвачен интервал 0,095...0,15. Каждая спеклограмма дает информацию о положениях очагов локализованной деформации для конкретного значения интегральной деформации, а значит, и времени деформирования образца. Совокупность данных от последовательности спеклограмм позволяет определить скорости движения каждого очага. Зависимость скоростей очагов от начальных координат (см. рис. 3) построена по данным всех спеклограмм. Следовательно, расчет момента времени и места разрушения по константам α и α_0 осуществлен за 0,07 общей деформации до начала падения условных напряжений. Однако при определении скоростей очагов можно использовать данные лишь части спеклограмм.

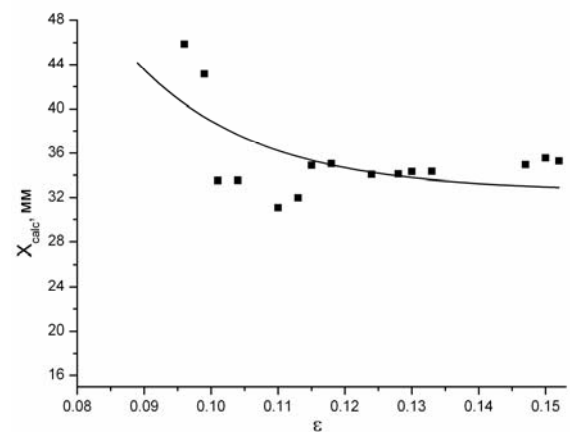


Рис. 5. Зависимость расчетной координаты места разрушения от величины общей деформации на стадии предразрушения

На рис. 5 показано, как меняется расчетное значение X_{calc}^* , если использовать данные 20, 19, 18 и так далее до 5 спеклограмм.

По горизонтальной оси здесь отложены соответствующие спеклограммам значения

деформации. Полученная зависимость удовлетворительно аппроксимируется уравнением:

$$X_{calc}^* = A + B \exp(-\varepsilon_{tot}/c), \quad (5)$$

где $A = 33$ мм, $B = 6910$ мм, $c = 0,01$. Видно, что начиная с $\varepsilon_{tot} = 0,1$ (использовано 8 спеклограмм) расчетное значение $X_{calc} \approx 34$ мм практически не меняется и удовлетворительно согласуется с реальным значением $X_{exp} \approx 35$ мм. Это значит, что место разрушения образца может быть определено не за 0,07, а за 0,115 общей деформации до достижения вершины кривой $\sigma(\varepsilon)$.

Аналогично рассчитывался момент времени разрушения. Полученная зависимость (рис. 6) описывается уравнением

$$t_{calc}^* = D + \chi \exp(-\varepsilon_{tot}/g), \quad (6)$$

где $D = 3330$ с; $\chi = 710$ с; $g = 4 \cdot 10^{10}$.

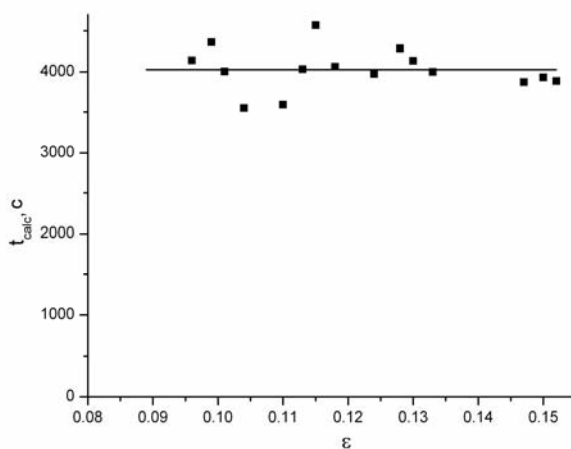


Рис. 6. Зависимость расчетного момента времени разрушения от величины общей деформации на стадии предразрушения

При любых значениях деформации $\exp(-\varepsilon/b) \approx 1$, поэтому начиная с 6-й спеклограммы, которая соответствует $\varepsilon_{tot} = 0,1$, рассчитанный момент времени разрушения составляет $t_{calc}^* = 4040$ с и удовлетворительно совпадает с реальным временем разрушения образца $t_{exp}^* = 4015$ с.

Подобная процедура была выполнена для других материалов. В табл. 2 показано соотношение между величиной общей деформации $\varepsilon_{pre} + 0,01$, при которой уже можно определить пространственно-временные координаты места разрушения, и относительным удлинением образцов до разрыва δ . Видно, что предсказать положения полюса, а значит, и координаты места разрушения можно при деформациях, составляющих 0,3...0,65 δ , для всех образцов исследованных материалов.

Наблюдаемому явлению схождения очагов локализации предлагается следующая интерпретация. Развитие макроскопической деформации носит автоволновой характер. Однако, если на ранних стадиях деформирования (легкое скольжение, стадия линейного упрочнения, стадия параболического упрочнения Тейлора) формируются устойчивые автоволны или

стационарные периодические распределения, т. е. весь образец в целом участвует в деформационном процессе, то на стадии предразрушения всякие деформационные процессы начинают стягиваться к месту формирования шейки разрушения, и активно деформирующаяся часть образца сокращается.

Таблица 2

Соотношение между деформацией начала стадии предразрушения и относительным удлинением до разрыва

Материал	$\varepsilon_{pre} + 0,01$	δ	$(\varepsilon_{pre} + 0,01)/\delta$
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

Так как в рамках автоволновой концепции каждая стадия пластического течения представлена определенным типом автоволн, коллапс [9] автоволн соответствует стадии предразрушения. Коллапс автоволны является заключительным этапом развития волнового процесса локализованной пластической деформации, в ходе которого последняя стягивается и захлопывается с образованием нового дефекта – разрушающей вязкой трещины. Можно предположить, что движущиеся на стадии предразрушения очаги локализации находятся в разных условиях с точки зрения напряженно-деформированного состояния материала и, именно, поэтому имеют разную скорость движения. Из исследования характеристик автоволн на стадии линейного упрочнения известно [3, 5], что скорость очагов локализации тем меньше, чем больше коэффициент деформационного упрочнения. Есть основания полагать, что на стадии предразрушения скорость движения очагов локализованной деформации таким же образом определяется коэффициентом упрочнения. Тогда следует предположить, что деформационные характеристики материала в зоне каждого очага локализации на стадии предразрушения должны быть различны. Показатель деформационного упрочнения определяет величину коэффициента упрочнения на стадиях, где $n < 1$, как $\theta = d\sigma/d\varepsilon \sim n\varepsilon^{n-1}$. В работе [10] было установлено эмпирическое соотношение между скоростью автоволн локализованной деформации и показателем деформационного упрочнения в виде

$$V = V_0(n - q)^2, \quad (7)$$

где V_0 – и q – константы, причем $q = 0,5$. Это соотношение справедливо для любой стадии. Действительно, на стадии линейного упрочнения, когда $n = 1$, скорость движения очагов локализованной пластичности $V = V_0/4 = \text{const}$. В

интервале $\frac{2}{3} \geq n \geq \frac{1}{2}$, т. е. при значении, близком к показателю деформационного упрочнения Тейлора $n = \frac{1}{2}$, $V = 0$, очаги стационарны. Когда достигается условие $n < \frac{1}{2}$, очаги снова приобретают способность двигаться, причем, по мере уменьшения n скорость их движения должна возрастать, так как уменьшается коэффициент деформационного упрочнения θ .

Зависимость $V_{av}(n)$ может быть использована для анализа поведения очагов локализованной деформации на стадии предразрушения. В частности, она позволяет определить индивидуальные показатели деформационного упрочнения для каждого очага локализованной деформации (нужно только пронормировать это уравнение на постоянную скорость автоволны на стадии линейной упрочнения и учесть, что на параболической стадии Тейлора $V_{av} = 0$). На рис. 7 отражена особенность зависимости $V_{av}(n)$ для ряда материалов, которая состоит в появлении в некоторых случаях отрицательных значений показателя деформационного упрочнения $n < 0$ для отдельных наиболее быстро движущихся очагов локализованной пластичности.

При этом определяемый по диаграмме σ - ε для образца в целом показатель деформационного упрочнения $n > 0$. Было замечено также, что те очаги локализованного пластического течения, для которых $n < 0$, зарождаются на стадии предразрушения самопроизвольно и геометрически не связаны с неподвижными областями локализации, существовавшими на стадии тейлоровского упрочнения, пока $\sigma \sim \varepsilon^{1/2}$, т. е. при $n \approx \frac{1}{2}$.

Как известно, условие $n < 0$ отвечает падающей ветви условной диаграммы деформации и соответствует потере устойчивости процесса и деформационному разупрочнению материала [11]. Значит, деформационные свойства отдельных объемов материала и способность этого материала упрочняться в ходе пластического течения на стадии предразрушения становятся неодинаковыми.

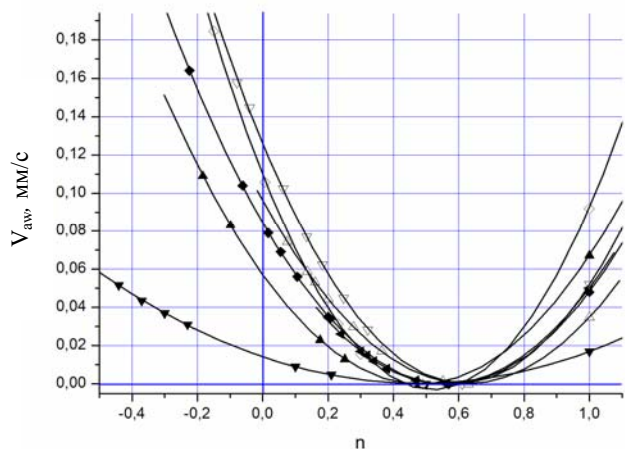


Рис. 7. Зависимости скоростей движения очагов локализованной пластичности $V_{av}(n)$: ванадиевый сплав – \blacktriangle ; Э125 – Δ ; ВТ1-0 (К3) – \blacktriangleleft ; Fe-3%Si (К3) – \blacktriangledown ; Д1 – \diamond ; МА8 – \blacklozenge ; 40Х13 – ∇

Данная точка зрения подтверждается результатами исследования эволюции

дислокационной структуры в очагах пластического течения на разных стадиях процесса деформирования [10], показавшего, что развитие дислокационной субструктуры в очагах локализованной деформации опережает эти процессы в зонах между очагами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На стадии предразрушения картина макролокализованной пластической деформации имеет ряд существенных особенностей. 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 $n \approx \frac{1}{2}$, такой очаг остается затем неподвижным вплоть до разрушения, но деформация в нем постепенно растет по мере затухания активности процесса течения в других областях. Кинетика всех очагов локализации на стадии предразрушения позволяет определить пространственно-временные координаты разрушения объекта.

Во-вторых, каждому очагу соответствует локальный показатель упрочнения, который отличается от среднего показателя упрочнения стадии предразрушения в целом. Наибольший показатель упрочнения соответствует стационарной зоне локализации. Для остальных очагов он меньше и меньше среднего значения в общем по стадии. Таким образом, на стадии предразрушения происходит сокращение активной зоны пластической деформации и затухание пластического течения в остальной части объема образца.

Третья 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 $n = \frac{1}{2}$. Это наиболее быстро движущиеся очаги, для которых $n < 0$. Следовательно, в ходе пластического течения на стадии предразрушения могут сосуществовать как упрочняющиеся, так и разупрочняющиеся очаги локализованной пластичности. Данный процесс можно описать в рамках автоволновой двухкомпонентной модели локализации макродеформации. Согласно этой модели открытые системы имеют тенденцию самопроизвольно расслаиваться на информационную и динамическую подсистемы, взаимодействие которых вызывает самоорганизацию внутренних процессов [9]. В случае деформируемой среды роль информационной подсистемы играют 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 [3, 5]. В рамках этих представлений появление характерного макроскопического масштаба $\sim \lambda$ может соответствовать условию интерференции испускаемых уже имеющимися соседними зонами локализованной деформации акустических волн.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Д.К. Чернов. *Д.К. Чернов и наука о металлах*. М.: «Металлургиздат», 1950, 196 с.
2. J.J. Gilman. *Micromechanics of shear banding // Mech. Mater.* 1994, v. 17, N 1, p. 83-94.
3. L.B. Zuev. On the waves of plastic flow localization in pure metals and alloys // *Ann. Phys.* 2007, v. 16, N 4, p. 286-310.
4. Р. Хоникомб. *Пластическая деформация металлов*. М.: «Мир», 1972, 408 с.
5. Л.Б. Зуев, В.И. Данилов, С.А. Баранникова. *Физика макролокализации пластического течения*. Новосибирск: «Наука», 2008, 328 с.
6. Л.Б. Зуев, В.И. Данилов. О кинетике макродеформов локализованной пластичности на стадии предразрушения металлов // *Журнал технической физики*. 2005, т. 75, № 12, с. 102-105.
7. Р. Хилл. *Математическая теория пластичности*. М.: ГИТТЛ, 1956, 407 с.
8. В.И. Трефилов, В.Ф. Моисеев, Э.П. Печковский. *Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов*. Киев: «Наукова думка», 1987, 245 с.
9. Б.Б. Кадомцев. *Динамика и информация*. М.: Редакция УФН, 1997, 399 с.
10. Л.Б. Зуев, Т.М. Полетика, Г.Н. Нариманова. О связи между макролокализацией пластического течения и дислокационной структурой // *Письма в ЖТФ*. 2003, т. 29, № 12, с. 74-77.
11. В.В. Стружанов, В.И. Миронов. *Деформационное разупрочнение материала в элементах конструкций*. Екатеринбург: Институт машиноведения УрО РАН, 1995, 190 с.

Статья поступила в редакцию 23.06.2011 г.

АВТОХВИЛІ ЛОКАЛІЗОВАНОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ І В'ЯЗКА РУЙНАЦІЯ

В.І. Данілов, Д.В. Орлова, Л.Б. Зуєв, Г.В. Шляхова

Представлені результати дослідження характеру локалізації макродеформації на стадії переходу від пластичної течії до в'язкої руйнації широкого кола металевих матеріалів. Встановлено, що закономірності цього процесу мають єдину природу із власно пластичною деформацією і являють собою зміну автохвиль локалізованої деформації у послідовності: фазова автохвиля—стаціонарна дисипативна структура—коллапс автохвилі або її стягнення на місці майбутньої руйнації зразка. Кінетичні характеристики колапсуючої на стадії предруйнації автохвилі, які можуть бути встановлені експериментально, дозволяють прогнозувати просторово-часові координати руйнації об'єктів задовго до появи зовнішніх ознак такої руйнації.

THE LOCALIZED PLASTIC DEFORMATION AUTOWAVES AND DUCTILE RUPTURE

V.I. Danilov, D.V. Orlova, L.B. Zuev, G.V. Shlyakhova

The localization of macrodeformation during the transition from plastic flow to ductile rupture is studied for a wide class of metals. It is found that the mechanism behind this process is the same as that behind plastic deformation and as such can be described as a change in the type of localized deformation autowave in the following sequence: phase autowave—steady dissipative structure—collapse of autowave or its contraction at the site of ensuing failure. The kinetic characteristics of an autowave collapsing at the prefailure stage, which can be found experimentally, allow one to predict the spatio-temporal coordinates of rupture long before its signs appear.