

01;05

## О кинетике макродоменов локализованной пластичности на стадии предразрушения металлов

© Л.Б. Зуев, В.И. Данилов

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634021 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 19 апреля 2005 г.)

При экспериментальном исследовании поведения макродоменов локализованной пластичности на заключительной стадии процесса пластического течения при переходе к образованию макроскопической шейки и вязкого разрушения, проведенном на материалах с ГЦК, ОЦК и ГПУ кристаллическими решетками, установлены общие закономерности развития процесса локализации на стадии предразрушения. Они состоят в постоянстве скорости каждого из доменов и их стремлении согласованно двигаться к центру пучка прямых на диаграммах координата–время. Установлена связь характера разрушения с кинетикой рождения и движения доменов локализованной пластичности.

### Введение

В наших работах [1,2] обнаружены особенности характера поведения доменов (очагов) локализованной пластической деформации на заключительной стадии процесса пластического течения моно- и поликристаллов сплава Fe-3 wt %Si (кремнистое железо). Эта стадия, как известно [3], имеет параболический характер, так что напряжение и деформация на ней связаны соотношением  $\sigma \sim \varepsilon^n$ . Оказалось, что при  $n < 1/2$  домены локализованной деформации движутся вдоль образца и скорость их движения  $V$  есть функция  $n$

$$V(n) = V_0(n - q)^2, \quad (1)$$

вид которой установлен в [4] (константа  $q \approx 1/2$ ). В соответствии с (1) при законе деформационного упрочнения  $\sigma \sim \sqrt{\varepsilon}$ , предсказанном Тейлором [3], т.е. при  $n \approx 1/2$ , домены локализованной деформации неподвижны ( $V_{n=1/2} = 0$ ), что неоднократно подтверждено экспериментально [1,2,4,5]. Зависимость (1) включает также соответствующую условию  $n = 1$  стадию линейного упрочнения, на которой скорость движения всех доменов пластичности, имеющих в образце,  $V_{n=1}$  постоянна и одинакова.

В процессе пластического течения показатель параболичности  $n$  в соотношении  $\sigma \sim \varepsilon^n$  постепенно снижается. Это позволило ранее авторам [4,5] выделить множество параболических подстадий с различными показателями параболичности  $n$ . Переход в область значений  $n < 1/2$  приводит, как показали данные работ [1,2], к приобретению доменами локализованной пластичности подвижности. Важной и интересной особенностью их движения на этом этапе деформации является взаимная согласованность скоростей движения отдельных доменов, самопроизвольно возникающая в деформируемом материале.

Смысл такого согласованного движения объясняется рис. 1, а, на котором приведены данные о кинетике движения доменов локализованной деформации в образцах

из субмикроструктурного алюминия, полученного методом равноканального углового прессования<sup>1</sup> [6]. В этом случае движение доменов на заключительной стадии процесса осуществляется так, что графики их движения на диаграммах (положение домена  $X$ –время  $t$ ) прямолинейны и образуют пучок, сходясь к центру с координатами  $X^*$  и  $t^*$ .

### Экспериментальные результаты

В настоящей работе наблюдения [1,2], выполненные на ОЦК кремнистом железе, дополнены результатами аналогичных экспериментов, проведенных на образцах из субмикроструктурного (размер зерна  $30 < D < 100$  nm) чистого ГЦК Al и сплавов на основе ГПУ магния и ОЦК ванадия, состав которых приведен в таблице. Методики определения показателя параболичности  $n$ , а также визуализации и количественного описания кинетики доменов локализованной пластической деформации описаны в [4,5,7].

Результаты, полученные для всех исследованных сплавов, приведены на рис. 1, а–d. Анализ представленных  $X$ – $t$  диаграмм, дополненный результатами традиционного исследования формы кривой течения  $\sigma(\varepsilon)$  и зависимости  $d\sigma/d\varepsilon = \theta(\varepsilon)$ , позволяет отчетливо различать следующие стадии деформационного упрочнения: линейную ( $V = \text{const}$ ,  $n = 1$ ); тейлоровского упрочнения ( $V = 0$ ,  $n \approx 1/2$ ); предразрушения ( $V \neq 0$ ,  $n < 1/2$ ).

Из данных рис. 1 следует, что на этапе предразрушения домены локализованной деформации приобретают скорости, которые различны для каждого из доменов, но сохраняют постоянство во все время их существования. Аналогичный результат был ранее получен в работе [2] для монокристаллов сплава Fe-3%Si. Величина скорости зависит только от места зарождения отдельного домена: чем ближе это место к зоне будущего разрушения, тем медленнее такой домен движется. Согласованно

<sup>1</sup> Авторы благодарны Н.М. Русину за изготовление образцов из субмикроструктурного алюминия.

Коэффициенты уравнения, определяющего скорость движения доменов локализованной деформации, координаты места и время разрушения образцов

Характеристика	Al (чистый)	Mg (~ 2.0 wt%Mn, ~ 0.25 wt%Ce)	V (~ 2.3 wt%Zr, ~ 0.4 wt%C)	Fe-Si (~ 3 wt%Si)
$\alpha, s^{-1}$	$1.13 \cdot 10^{-3}$	$4.64 \cdot 10^{-3}$	$7.24 \cdot 10^{-3}$	$1.32 \cdot 10^{-3}$
$\alpha_0, m \cdot s^{-1}$	$6.7 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-2}$	$-6.1 \cdot 10^{-4}$	$-1.27 \cdot 10^{-3}$
$X^* = \alpha_0/\alpha, mm$	6.2	3.7	$-8 \cdot 10^{-3}$	1.0
$t^* = t_0 + 1/\alpha, s$	1174	1265	980	2560

движущиеся на стадии предразрушения новые домены локализованной пластичности могут стартовать как с одной стороны от стационарного домена (рис. 1, *a, c*), так и по обе стороны от него (рис. 1, *b, d*).

Экстраполируя участки прямых  $X(t)$ , для которых  $n < 1/2$ , до пересечения, можно показать, что во всех случаях образуются пучки, и найти координаты их центров  $X^*$  и  $t^*$ , которые близки к месту и моменту

разрушения образца для каждого из исследованных материалов. Это означает, что уже с начала этого этапа скорости движения доменов локализованной деформации автоматически синхронизированы таким образом, чтобы обеспечивался их одновременный „приход“ в центр. Нередко для определения  $X^*$  и  $t^*$  требуется экстраполяция зависимости  $X(t)$  к большим временам, как это можно видеть на рис. 1, *a, c*. Следовательно,

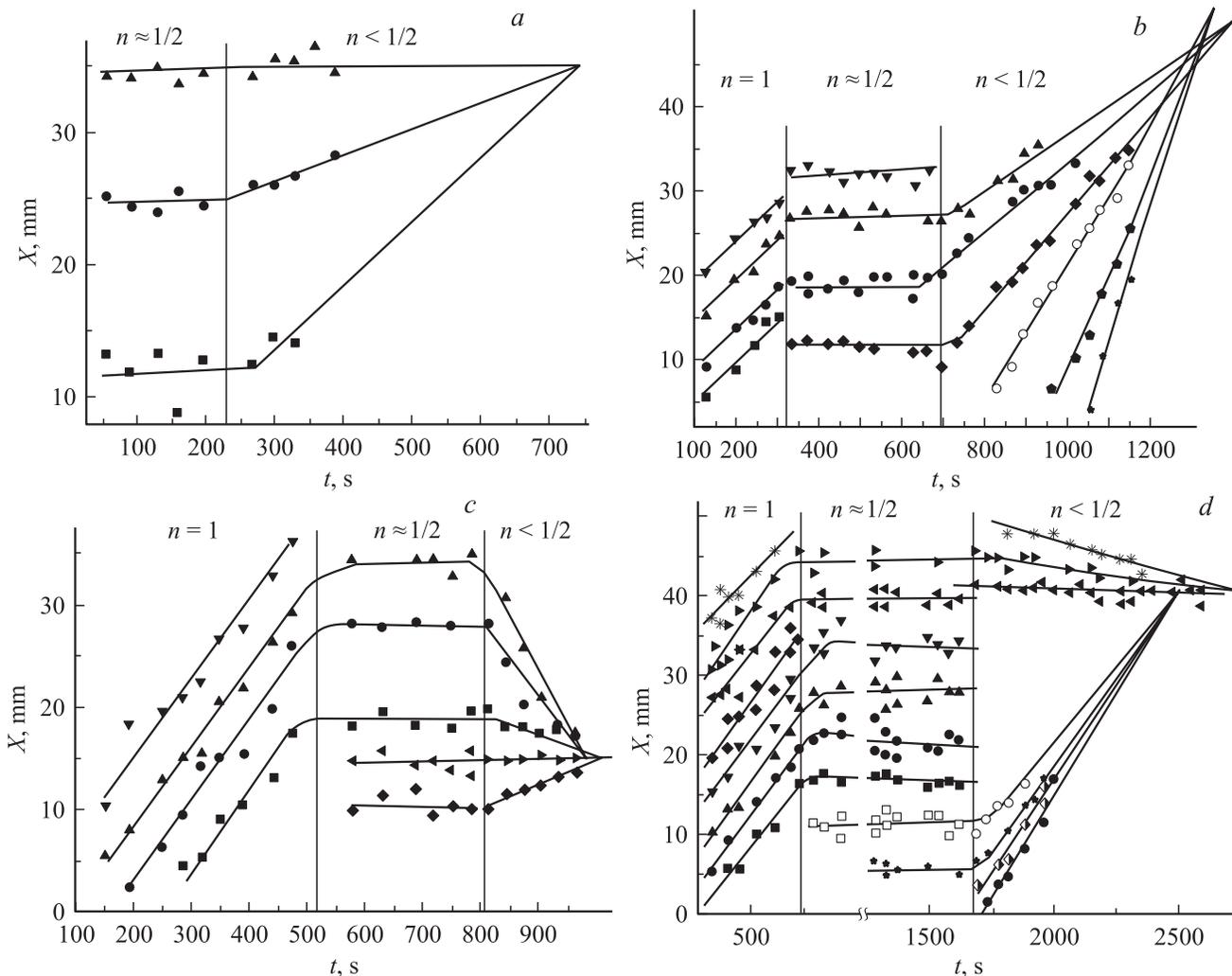
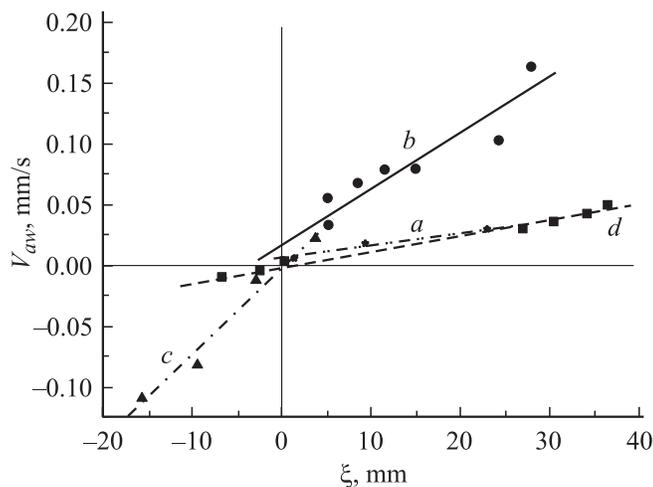


Рис. 1. Движение доменов локализованной пластичности в субмикроструктурном алюминии (*a*), магниевом сплаве (*b*), ванадиевом сплаве (*c*) и кремнистом железе (*d*).

место разрушения и время жизни образца до разрушения детерминированы процессами, происходящими на более ранних стадиях пластического течения. При этом надо иметь в виду, что на самом деле домены локализованной деформации, движущиеся на этой стадии процесса, в определенный момент прекращают свое развитие (исчезают), как это хорошо видно на рис. 1, *a, c* в случае Al и Mg. Из всех доменов с течением времени „выживает“ только один, положение которого уже при рождении соответствует месту образования в будущем макроскопической шейки и вязкого разрушения [4]. Обычно, появившись еще на стадии тейлоровского деформационного упрочнения при  $n \approx 1/2$ , такой домен остается затем почти неподвижным вплоть до разрушения, но деформация в нем постепенно растет по мере затухания активности процесса течения в других доменах.

## Обсуждение результатов

Рассмотрим условия, необходимые для формирования пучков прямых  $X(t)$ , показанных на рис. 1. Известно [8], что это возможно, если скорости движения доменов линейно зависят от координат их зарождения  $\xi$  в момент времени  $t = t_0$ , т.е. если  $V(\xi) = \alpha\xi + \alpha_0$ . Здесь  $\alpha$  и  $\alpha_0$  — эмпирические константы. Координату  $\xi$  удобно отсчитывать от центра неподвижного домена локализации, как показано на рис. 1, *a*. Зависимости  $V(\xi)$  для исследованных материалов показаны на рис. 2, а константы  $\alpha$  и  $\alpha_0$  для них приведены в таблице. Скорости движения в зависимости от начального положения доменов локализованной пластичности для разных металлов были определены на наклону графиков на рис. 1. Как показано на рис. 2, зависимость  $V(\xi)$  действительно линейна для всех исследованных образцов. Коэффициент параболического деформационного упрочнения  $\theta = d\sigma/d\varepsilon \sim n\varepsilon^{n-1}$  убывает вместе с показателем параболичности  $n$ . В таком случае в соответствии с данными [5,7] скорость движения фронтов локализованной деформации, для которой



**Рис. 2.** Зависимости  $V(\xi)$  в субмикросталлическом алюминии (*a*), магниевого сплаве (*b*), ванадиевом сплаве (*c*) и кремнистом железе (*d*).

установлена зависимость  $V \sim 1/\theta$ , должна возрастать по мере уменьшения  $n$  и соответствующего уменьшения  $\theta$ . Этот же рост достигается при  $n < 1/2$  в силу уравнения (1).

Отвечающие месту и времени разрушения значения координат центра пучка

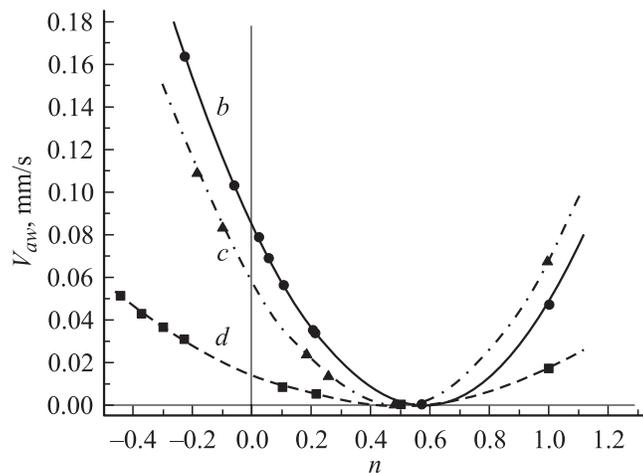
$$X^* = \alpha_0/\alpha, \quad t^* = t_0 + 1/\alpha$$

вычислены по аналогии с [8] и также приведены в таблице. Существование таких центров во всех исследованных материалах позволяет считать его общим признаком процесса локализации на стадии предразрушения и полагать, что причиной наблюдаемого схождения доменов локализованной пластичности в координатах  $X-t$  можно считать автоматически выполняющееся в растягиваемом образце условие  $V(\xi) = \alpha\xi + \alpha_0$  для значений их скоростей движения на стадии предразрушения при  $n < 1/2$ .

Выше отмечалось, что домены локализованной деформации могут зарождаться как по обе стороны от места будущего разрушения (сплав V, Fe-3%Si), так и с одной стороны от него (Al, сплав Mg). При этом домены, зарождающиеся по разные стороны от неподвижного, имеют углы наклона разного знака к оси растяжения. Это, возможно, определяет разный характер вязкого разрушения в менее (ОЦК) и более (ГЦК и ГПУ) пластичных материалах [9]. Такое предположение подтверждается различиями в строении зон разрушения, наблюдаемыми после разрыва образцов. В более пластичных материалах (Al, сплав Mg) возникает типичная картина вязкого разрушения срезом, в то время как образцы из сплавов V и Fe-3%Si имеют в изломе заметно большую долю хрупкого разрушения [1].

Далее, используя соотношение (1) и номируя квадратичную зависимость  $V(n)$  по экспериментально полученным значениям  $V_{n=1}$  и  $V_{n=1/2} = 0$ , соответствующим стадиям линейного и тейлоровского деформационного упрочнения ( $n = 1$  и  $n \approx 1/2$  соответственно), можно оценить значения показателя  $n$  для каждого из подвижных доменов локализованной пластичности во всех исследованных материалах, кроме субмикросталлического алюминия.<sup>2</sup> Результаты такой обработки, приведенные на рис. 3, демонстрируют интересную особенность зависимости  $V(n)$ , которая состоит в появлении отрицательных значений показателя параболичности  $n < 0$  для наиболее быстро движущихся доменов локализованной пластичности. Как известно, такое условие отвечает падающей ветви условной диаграммы деформации [9,10], но при этом определяемый для образца в целом показатель параболичности  $n$  остается на этой стадии положительным. Интересно отметить, что те домены локализованного пластического течения, для которых  $n < 0$ , самопроизвольно зарождаются на стадии предразрушения и геометрически не связаны с областями локализации, появившимися на стадии тейлоровского упрочнения и остающимися неподвижными, пока  $\sigma \sim \sqrt{\varepsilon}$ , т.е. при  $n \approx 1/2$ .

<sup>2</sup> В этом случае стадия линейного упрочнения не наблюдалась и скорость, отвечающая значению  $n = 1$ , не могла быть измерена.



**Рис. 3.** Зависимости скорости движения доменов локализованной пластичности  $V(n)$  в магниевом сплаве (*b*), ванадиевом сплаве (*c*) и кремнистом железе (*d*).

Наблюдаемые закономерности могут быть объяснены в рамках предположения о том, что показатель параболичности  $n$  принимает разные, в том числе и отрицательные, значения в каждом из движущихся на стадии предразрушения доменов локализованной пластичности. Это в свою очередь вынуждает признать, что деформационные свойства отдельных объемов материала и способность этого материала упрочняться в ходе пластического течения на этой стадии процесса становятся неодинаковыми. Такая точка зрения подтверждается результатами исследования эволюции дислокационной структуры в доменах пластического течения на разных стадиях процесса деформирования, проведенного в [11] и показавшего, что развитие дислокационной субструктуры в доменах локализованной деформации опережает эти процессы в зонах между доменами.

## Выводы

Результаты представленных исследований позволяют сформулировать следующие важные представления об особенностях поведения материала на стадии предразрушения перед образованием в образце макроскопической шейки.

1. Картины эволюции зон локализованной деформации непосредственно перед образованием макроскопической шейки показывают, что место разрушения определяется достаточно рано [4]. После устойчивого параболического деформационного упрочнения по Тейлору ( $n \approx 1/2$ ) начинается переходная стадия с  $n < 1/2$ , которая завершается образованием макроскопической шейки с последующим развитием вязкого разрушения. Возможно, что такое изменение  $n$  отвечает моменту потери устойчивости пластического течения [12–14].

2. Наблюдаемые на стадии предразрушения картины свидетельствуют о том, что образование макроскопической шейки состоит в укорочении активной зоны

пластической деформации на этой стадии и затухании пластического течения в остальной части объема образца. В ходе образования шейки по мере роста общей вытяжки образца происходит также постепенное уменьшение длины волны локализованной деформации.

3. Можно полагать, что на стадии предразрушения в деформируемом образце возникают независимо эволюционирующие (в смысле деформационного упрочнения-разупрочнения) домены локализованной деформации. Иначе говоря, в пределах одного образца могут сосуществовать как упрочняющиеся ( $n > 0, \theta > 0$ ), так и разупрочняющиеся ( $n < 0, \theta < 0$ ) домены, движущиеся с постоянной для каждого из них скоростью, величина которой линейно зависит от координаты места рождения домена локализованного течения.

4. Формирование шейки и зарождение зоны разрушения начинаются задолго до собственно разрыва и являются результатом взаимосогласованного движения доменов локализованного пластического течения, приводящего к их „конденсации“ вблизи места вязкого разрушения. Положение последнего достаточно рано фиксируется одним рождающимся в конце стадии тейлоровского упрочнения доменом, а момент разрушения определяется согласованным движением всех доменов локализованной пластической деформации.

## Список литературы

- [1] Данилов В.И., Шляхова Г.В., Зуев Л.Б., Кунавина М.А., Рузанова Ю.В. // ФММ. 2004. Т. 98. Вып. 3. С. 107–112.
- [2] Баранникова С.А., Данилов В.И., Зуев Л.Б. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 10. С. 52–56.
- [3] Фридель Ж. Дислокации. М.: Мир, 1967. 643 с.
- [4] Полетика Т.М., Нариманова Г.М., Колосов С.В., Зуев Л.Б. // ПМТФ. 2003. Т. 44. Вып. 2. С. 132–142.
- [5] Zuev L.B., Danilov V.I., Poletika T.M., Barannikova S.A. // Int. J. Plasticity. 2004. Vol. 20. N 7. P. 1227–1249.
- [6] Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. Процессы пластического структурообразования металлов. Минск: Наука і тэхніка, 1994. 232 с.
- [7] Zuev L.B., Danilov V.I. // Phil. Mag. A. 1999. Vol. 79. N 1. P. 43–57.
- [8] Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д. Элементы математической физики. М.: Наука, 1973. 351 с.
- [9] Макклиток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение металлов. М.: Мир, 1970. 443 с.
- [10] Стружанов В.В., Миронов В.И. Деформационное разупрочнение материала в элементах конструкций. Екатеринбург: Институт машиноведения УрО РАН, 1995. 190 с.
- [11] Зуев Л.Б., Полетика Т.М., Нариманова Г.М. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 12. С. 74–77.
- [12] Aifantis E.C. // Int. J. Non-Linear Mech. 1996. Vol. 31. N 6. P. 797–809.
- [13] Малыгин Г.А. // ФТТ. 2005. Т. 47. Вып. 2. С. 236–241.
- [14] Малыгин Г.А. // ФТТ. 2005. Т. 47. Вып. 5. С. 870–875.