

# СТАДИЙНОСТЬ «ИСТИННЫХ» ДИАГРАММ НАГРУЖЕНИЯ

*Е.Е. Дерюгин, Б.И. Суворов*

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

*E-mail: dee@ispms.tsc.ru, тел. (3822)28-68-30*

Получены характеристики диаграмм нагружения поликристаллов  $\alpha$ -Fe, сплавов ВТ1-0 и ВТ-6 с субмикроструктурной (СМК) структурой, а также поликристаллов Al+5%Mg и Al+10%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с хорошо выраженным эффектом прерывистой текучести, с учётом формоизменения образца в зоне формирования шейки перед разрушением. Предложен способ измерения локальной степени пластической деформации в зоне минимального сечения образца. Показано, что для выяснения стадийности процесса деформационного упрочнения материала в процессе нагружения принципиально важен учёт локализации пластической деформации в шейке перед разрушением материала.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Традиционные методы расшифровки экспериментальных диаграмм нагружения дают весьма приближённое представление о действительных закономерностях и механизмах пластической деформации в локальных объёмах материала. Особенно актуальной в механике деформируемого твёрдого тела является проблема расчёта зависимости «напряжение-деформация» для материала на стадии предразрушения, когда возникает и развивается процесс макролокализации пластической деформации в шейке образца [1]. В зоне минимального сечения образца материал испытывает наиболее интенсивную пластическую деформацию и доводится до разрушения. Для выяснения физических механизмов пластической деформации и разрушения материалов принципиальную важность представляет проблема получения кривых «напряжение-деформация», характеризующих механическое поведение материала в зоне образца, где в процессе нагружения формируется шейка и происходит разрушение [2-4].

В данной работе представлены результаты построения таких кривых «напряжение-деформация» на примере ряда поликристаллов по данным измерений локальной степени пластической деформации в зоне минимального сечения плоского образца при растяжении, проводимых с использованием возможностей оптико-телевизионной системы.

## 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

Испытанию подвергались поликристаллы малоуглеродистой стали ( $\alpha$ -Fe) с размером зёрен 20 мкм, технический титан ВТ1-0 и высокопрочный сплав ВТ-6 с субмикроструктурной структурой, которые были получены методом ручьевого прокатки, со средним размером зёрен 200 нм, сплавы Al+5%Mg и Al+10%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с хорошо выраженным эффектом прерывистой текучести и размером зёрен в пределах 40...60 мкм. Выбор материалов обусловлен тем, что в данных сплавах происходит вязкое разрушение материала с образованием чётко выраженной шейки.

Образцы размером рабочей части 18×4×1,5 мм

испытывали на растяжение по схеме, приведенной на рис. 1. Захват представляет собой систему из двух стержней, на которые опираются плечики плоского образца в виде двойной лопаточки.

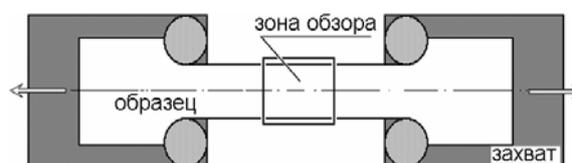


Рис. 1. Схема испытания образца на растяжение

Растяжение проводили на установке типа ИМАШ при комнатной температуре со скоростью движения захватов в ненагруженном состоянии  $v_0 = 0,75$  мкм/с.

## 3. ПЕРЕСТРОЙКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДИАГРАММ «НАГРУЗКА-УДЛИНЕНИЕ» В ДИАГРАММУ «НАПРЯЖЕНИЕ-ДЕФОРМАЦИЯ»

В экспериментах, как правило, в определённом масштабе записывается график зависимости между растягивающей нагрузкой  $F$  и удлинением образца  $\Delta l$ . Данную диаграмму  $F$ - $\Delta l$  обычно перестраивают в условную диаграмму «напряжение-деформация». Условное напряжение  $\sigma_{\text{усл}}$  получают делением значений растягивающей силы  $F$  на первоначальную площадь поперечного сечения образца  $S_0$ :

$$\sigma_{\text{усл}} = F/S_0. \quad (1)$$

Условная деформация  $\varepsilon_{\text{усл}}$  определяется делением удлинения  $\Delta l$  на первоначальную рабочую длину образца  $l_0$ :

$$\varepsilon_{\text{усл}} = \Delta l/l_0. \quad (2)$$

Зависимость «напряжение-деформация» в таком случае качественно не отличается от машинной кривой «нагрузка-удлинение». На рис. 2 кривая 1 является условной кривой «напряжение-деформация» для поликристаллов  $\alpha$ -Fe, полученной в наших экспериментах согласно уравнению (2). По условной диаграмме нагружения обычно определяются табличные механические характеристики стандарт-

ного образца, в том числе и временное сопротивление образца  $\sigma_B = \sigma_{\text{усл}}^{\text{max}}$ .

Для фундаментальных исследований, преследующих цель определения механизмов пластической деформации, важно, как можно точнее, описать «истинную» диаграмму «напряжение-деформация», которая соответствует материалу, испытываемому все стадии развития пластической деформации от начала нагружения до его разрушения. В первом приближении при расчёте напряжения течения учитывают прежде всего уменьшение поперечного сечения в процессе нагружения материала, предполагая, что образец в рабочей части деформируется в макроскопическом масштабе однородно. При этом текущее значение поперечного сечения образца  $S$ , как правило, определяют из условия постоянства объёма  $V_0 = S_0 l_0 = \text{const}$  при пластическом формоизменении материала. Если относительное увеличение длины рабочей части образца в произвольный момент времени равно  $\varepsilon_{\text{усл}} = \Delta l / l_0$ , то при этом условии выполняется равенство  $S_0 l_0 = S l (1 + \varepsilon_{\text{усл}})$ , где  $S$  определяет текущее значение поперечного сечения образца. Отсюда находим

$$S = S_0 / (1 + \varepsilon_{\text{усл}}). \quad (3)$$

Уточнённое напряжение течения  $\sigma^*$  тогда будет

$$\sigma^* = F/S = F(1 + \varepsilon_{\text{усл}})/S_0. \quad (4)$$

Очевидно, что кривая  $\sigma^* - \varepsilon_{\text{усл}}$ , рассчитанная с учётом уравнения (4), будет лежать выше условной диаграммы нагружения (см. кривую 2 на рис. 2). С увеличением пластической деформации разница  $\sigma^* - \sigma_{\text{усл}}$  увеличивается. Для  $\alpha$ -Fe максимальное значение напряжения  $\sigma^*_{\text{max}}$  отличается от  $\sigma_B$  уже на 40%. При этом  $\sigma^*_{\text{max}}$  на кривой 2 приходится на более высокую степень пластической деформации.

В опытах на растяжение часто используют другое определение степени пластической деформации с учётом того, что в процессе нагружения наблюдается непрерывное увеличение рабочей длины образца. На стадии однородной макропластической деформации такой учёт не представляет особых затруднений. За бесконечно малый промежуток времени  $dt$  элементарное приращение деформации

$$d\varepsilon = dl/l, \quad (5)$$

где  $l$  – текущее значение рабочей длины образца. Полная деформация  $\varepsilon^*$  определяется интегрированием выражения (5) от  $l_0$  до  $l = l_0 + \Delta l$ :

$$\varepsilon^* = \int_{l_0}^{l_0 + \Delta l} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon_{\text{усл}}). \quad (6)$$

Отличия численных значений  $\varepsilon^*$  и  $\varepsilon_{\text{усл}}$  видны при сравнении соответственно кривых 3 и 2 на рис. 2. Видно, что всегда  $\varepsilon^* < \varepsilon_{\text{усл}}$ . Отличие  $\varepsilon^*$  от  $\varepsilon_{\text{усл}}$  при малых степенях пластической деформации незначительное, но разница  $\varepsilon_{\text{усл}} - \varepsilon^*$  увеличивается по мере нагружения и становится заметной уже при

$\varepsilon > 0,1\%$ . В момент разрушения для  $\alpha$ -Fe эта разница составляет 14%.

Следует отметить, что перестройка диаграмм нагружения согласно условию (4) или (6) не имеет принципиального значения, поскольку качественный вид кривых 2 и 3 при этом не изменяется, изменяется только шкала измерения деформации.

При вязком разрушении, по крайней мере до максимальной нагрузки  $F_{\text{max}}$ , принимают, что в макроскопическом масштабе деформация протекает однородно по всему объёму рабочей части образца. Для получения диаграммы, соответствующей в пределах ошибки эксперимента «истинной» диаграмме «напряжение-деформация», в уравнении (4) вместо  $\varepsilon_{\text{усл}}$  надо использовать значение пластической деформации  $\varepsilon_{\text{эксп}}$ , полученное при экспериментальном измерении степени пластической деформации в зоне формирования шейки (в зоне минимального сечения образца).

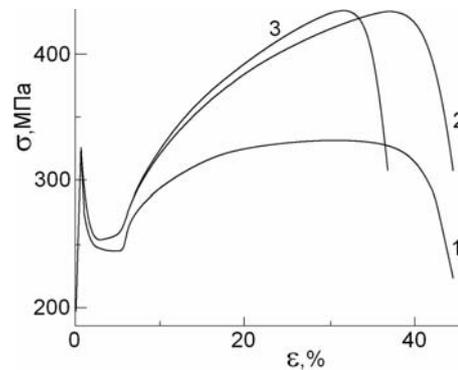


Рис. 2. Кривые  $\sigma - \varepsilon$  поликристаллического  $\alpha$ -Fe, рассчитанные согласно уравнению (1) (кривая 1), уравнению (4) (кривая 2) и уравнению (6) (кривая 3)

Ниже описан способ измерения локальной степени пластической деформации  $\varepsilon_{\text{эксп}}$  в зоне формирования шейки с использованием возможностей оптико-телевизионной системы. «Истинные» диаграммы «напряжение-деформация» строили согласно уравнению

$$\sigma = F/S = F(1 + \varepsilon_{\text{эксп}})/S_0. \quad (7)$$

Рассмотрим способ измерения локальной степени пластической деформации с помощью оптико-телевизионной системы более подробно на примере поликристаллов  $\alpha$ -Fe. Сначала получали последовательность профилей лицевой поверхности образца по компьютерным изображениям, фиксируемым через каждые 3 с в процессе растяжения. Рис. 3 иллюстрирует изменение ширины образца в зоне формирования шейки в  $\alpha$ -Fe. В ходе пластической деформации на контурах фиксируются довольно устойчивые неровности, которые играют роль естественных отметок. По смещениям двух близко расположенных отметок относительно друг друга в области минимального сечения образца определяли приращение степени пластической деформации.

На рис. 4 изображена последовательность контуров края образца, изменяющихся по мере деформации до разрушения, в зоне минимального сечения.

Контуры располагали так, чтобы одна из отметок ложилась на вертикальную линию.

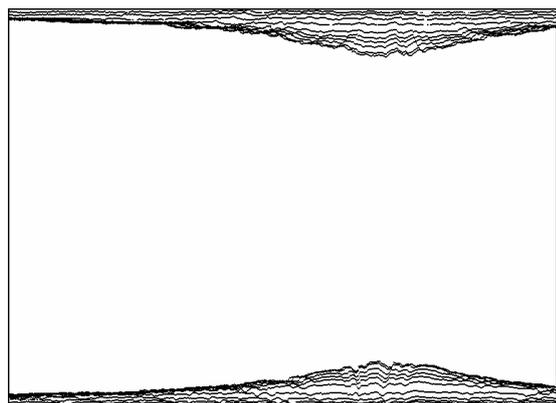


Рис. 3. Изменение ширины плоского образца  $\alpha$ -Fe в ходе формирования шейки

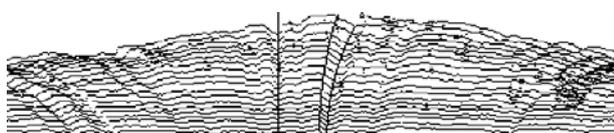


Рис. 4. Определение смещений по траекториям отметок на контурах образца  $\alpha$ -Fe

Подобные измерения проведены для всех исследованных материалов.

Из приведенного рис. 4 видно, что по мере формирования шейки смещения отметок относительно друг друга происходят в ускоряющемся (нелинейном) режиме. Каждому смещению соответствует приращение определённой степени пластической деформации. Напряжение в минимальном сечении вычисляли по уравнению (7). Следует учитывать тот факт, что чем меньше расстояние между отметками, тем больше будет расчётная степень пластической деформации. Однако при уменьшении расстояния между отметками теряется точность измерения смещения. Расстояние между выбранными отметками при измерении в процессе растяжения менялось от 0,4 до 0,9 мм. Зона формирования шейки составляла не менее 5 мм на рабочей длине образца, равной 18 мм. Интервал 0,4 мм достаточно мал, и в нём можно считать макропластическую деформацию однородной. Для более точных расчётов, конечно, надо учитывать неоднородность пластической деформации и в минимальном сечении образца.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ 4.1. АРМКО-ЖЕЛЕЗО

При используемой схеме нагружения типичная зависимость условной кривой «напряжение-деформация» для армко-железа согласно уравнениям (1) и (2) на рис. 5 представлена кривой 1. Наблюдается характерный для этого материала сильно выраженный «зуб» и площадка текучести [5, 6]. Интересно отметить, что отклонение кривой  $\sigma$ - $\varepsilon$  от прямой упругой деформации фиксируется при внешнем напряжении  $\sigma_0 \approx 200$  МПа, которое существенно ниже уровня внешнего напряжения, соответствующего не только верхнему пределу текучести  $\sigma_{\text{верх}} \approx 330$  МПа, но и площадке текучести  $\sigma_{\text{Н}} \approx$

250 МПа. Высота «зуба» текучести от образца к образцу при использованной схеме нагружения (см. рис. 2) характеризуется высоким значением  $\Delta\sigma \approx (78 \pm 3)$  МПа. Учёт изменения сечения в среднем по рабочей части образца изменяет количественные характеристики кривой «напряжение-деформация», не изменяя качественного вида (см. рис. 2, кривая 2).

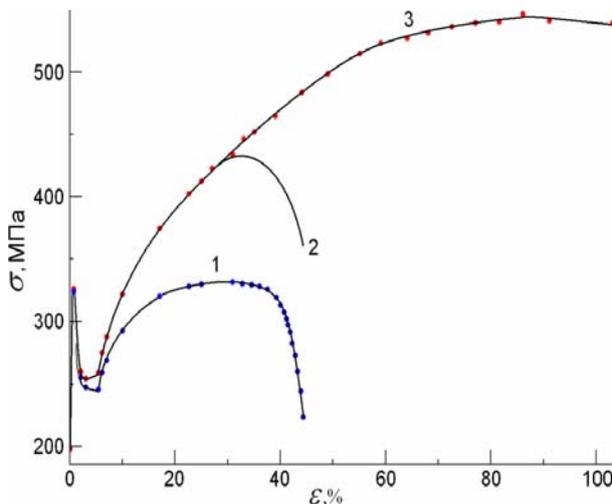


Рис. 5. Кривые  $\sigma$  –  $\varepsilon$  для  $\alpha$ -Fe, рассчитанные согласно уравнению (1) (кривая 1), уравнению (4) (кривая 2) и уравнению (7) (кривая 3)

Кривая 3 на рис. 5 относится к материалу в минимальном сечении образца, который испытал пластическую деформацию до разрушения. Видно, что кривая «напряжение-деформация» в результате уточнения претерпела существенные качественные и количественные изменения.

1. Начиная с верхнего предела текучести «истинное» (уточнённое) напряжение течения материала становится выше по сравнению с тем, которое предсказывает инженерная обработка измеренной экспериментально зависимости «нагрузка-удлинение» образца. По мере нагружения это отличие резко увеличивается. Предел прочности материала в зоне разрушения оказывается в 1,5 раза выше, чем временное сопротивление образца  $\sigma_B$ .

2. Пластичность материала в зоне разрушения превышает 120 %, что в 2,5 раза больше максимального значения пластической деформации, определяемой по кривой 1 на рис. 5.

3. На уточненной диаграмме не наблюдается участка падающего напряжения. Происходит непрерывное деформационное упрочнение материала. Представление полученной зависимости  $\sigma$  –  $\varepsilon$  в координатах  $\sigma$  –  $(\varepsilon - \varepsilon_{\text{plate}})^{1/2}$  (рис. 6) свидетельствует о том, что за площадкой текучести упрочнение развивается по параболическому закону до очень высокой степени пластической деформации (до 60 %). На кривой 1 (см. рис. 6) это соответствует моменту существенного уменьшения внешней нагрузки. Упрочнение материала протекает до определённого предела. Начиная с  $\varepsilon \approx 60$  % коэффициент упрочнения быстро уменьшается, и далее накопление пластической деформации уже не требует увеличения напряжения течения.

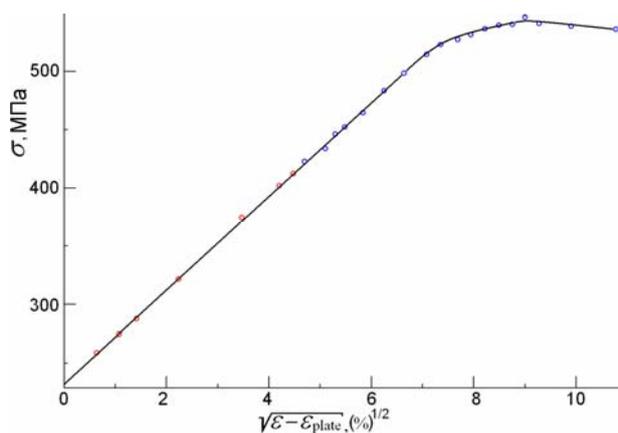


Рис. 6. Зависимость  $\sigma - (\varepsilon - \varepsilon_{\text{plate}})^{1/2}$  для  $\alpha\text{-Fe}$ , рассчитанная с учётом локализации пластической деформации в зоне шейки

#### 4.2. СПЛАВЫ ВТ-6 И ВТ1-0 С СМК-СТРУКТУРОЙ

Типичная зависимость условной кривой «напряжение-деформация» для высокопрочного сплава ВТ-6 приведена на рис. 7, кривая 1. Характерными особенностями кривых нагружения субмикроструктурных материалов, полученных методами интенсивной пластической деформации (ИПД), являются низкая пластичность, высокая прочность и наличие продолжительной стадии падающего внешнего приложенного напряжения [3, 4]. Этому условию удовлетворяет и сплав ВТ-6. Степень пластической деформации, соответствующая пределу прочности испытываемого образца, не превышает 5 % (см. рис. 7, кривые 1 и 2). «Истинная» кривая  $\sigma - \varepsilon$  представлена на рис. 7 под номером 3.

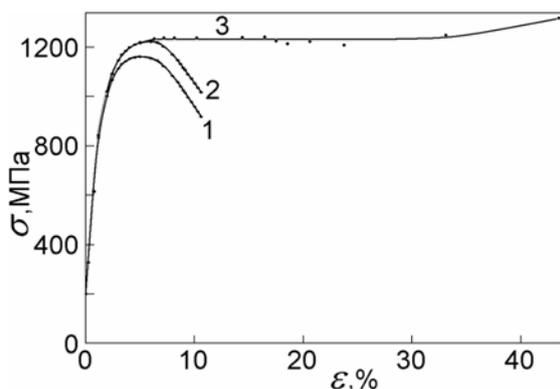


Рис. 7. Кривые  $\sigma - \varepsilon$  для СМК-сплава ВТ-6, рассчитанные согласно уравнению (1) (кривая 1), уравнению (4) (кривая 2) и уравнению (7) (кривая 3)

Как и в случае  $\alpha\text{-Fe}$ , видно, что в результате уточнения кривая 3 существенно (качественно и количественно) отличается от кривых 1 и 2.

1. С момента достижения предела прочности образца напряжение в минимальном сечении не испытывает значительного деформационного упрочнения до момента разрушения.

2. На кривой нагружения отсутствует стадия падающего напряжения.

3. Пластическая деформация в минимальном сечении достигает значения, на порядок превышающего измеренное до момента достижения временного сопротивления  $\sigma_B$  (48 % по сравнению с 5 %).

Аналогичные закономерности наблюдаются и для материала ВТ1-0 (рис. 8).

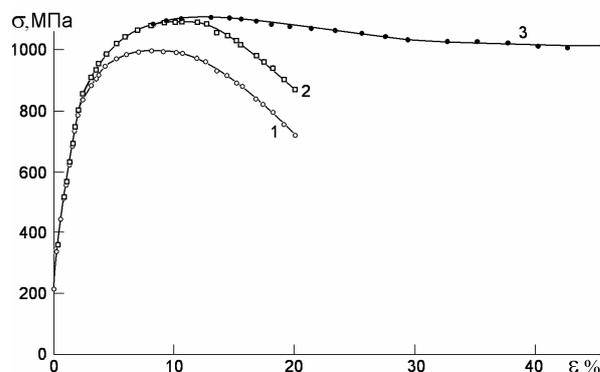


Рис. 8. Кривые  $\sigma - \varepsilon$  для СМК-сплава ВТ1-0, рассчитанные согласно уравнению (1) (кривая 1), уравнению (4) (кривая 2) и уравнению (7) (кривая 3)

Некоторые отличия в поведении кривой 3 СМК материалов ВТ1-0 и ВТ-6, по-видимому, связаны с различным характером локализации пластической деформации на стадии предразрушения. В случае ВТ1-0 шейка формируется в результате накопления пластической деформации в двух макрополосах локализованного сдвига в сопряжённых направлениях максимальных скалывающих напряжений (рис. 9).

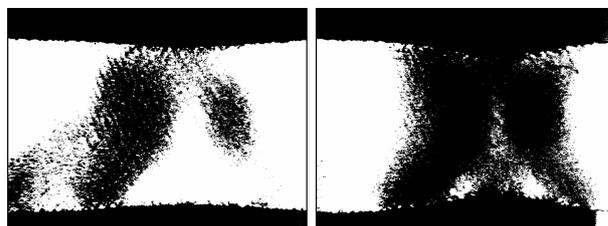


Рис. 9. Формирование шейки в СМК-сплаве ВТ1-0

В сплаве ВТ-6 локализация пластической деформации развивается иначе. Формируется только одна макрополоса локализованного сдвига под углом  $60^\circ$  к оси растяжения (рис. 10).

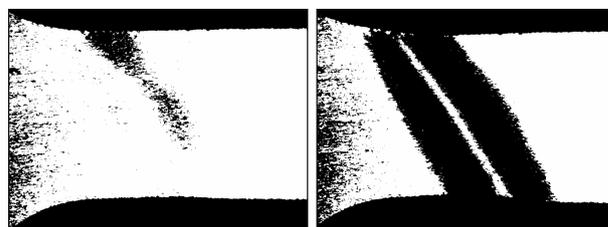


Рис. 10. Формирование шейки в СМК-сплаве ВТ-6

Следует отметить, что в СМК-состоянии максимальные напряжения в сплавах ВТ1-0 и ВТ-6 равны 1100 и 1200 МПа соответственно, т. е. мало отличаются друг от друга. В крупнокристаллическом состоянии временные сопротивления  $\sigma_B$  этих сплавов – 450 и 750 МПа, т. е. отличаются друг от друга существенно [4].

### 4.3. СПЛАВЫ С ЭФФЕКТОМ ПРЕРЫВИСТОЙ ТЕКУЧЕСТИ

Применение развиваемой методики к сплаву  $Al + 10\%Al_2O_3$  с хорошо выраженным эффектом прерывистой текучести выявило следующее (рис. 11): значения пластичности и прочности материала в этом случае получаются выше, нет стадии падающего напряжения, и на стадии предразрушения накопление пластической деформации происходит без заметного изменения внешнего приложенного напряжения. На этом уровне прекращается действие механизма прерывистой текучести.

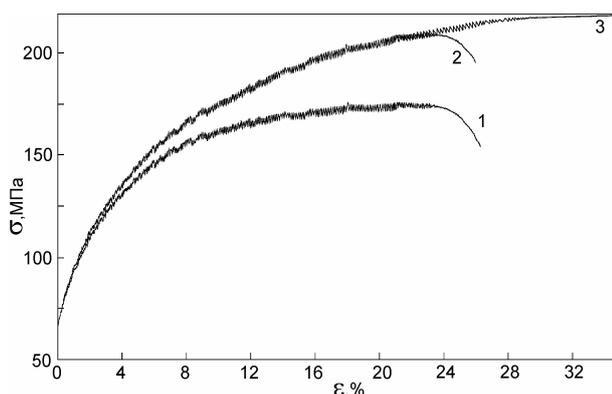


Рис. 11. Кривые  $\sigma - \varepsilon$  сплава  $Al + 10\%Al_2O_3$ , рассчитанные согласно уравнению (1) (кривая 1), уравнению (4) (кривая 2) и уравнению (7) (кривая 3)

В сплаве  $Al + 5\%Mg$  указанные выше тенденции выражены значительно сильнее. Пластичность материала в зоне формирования шейки составляет более 60 % по сравнению с 24 % для условной диаграммы  $\sigma - \varepsilon$ . Прочность в момент разрушения 355 МПа, что на 60 % выше временного сопротивления  $\sigma_B = 220$  МПа. Однако в отличие от сплава  $Al + 5\%Mg$  здесь до самого момента разрушения не прекращается, а наоборот, усиливается действие механизма прерывистой текучести. При этом продолжается непрерывное деформационное упрочнение материала (рис. 12).

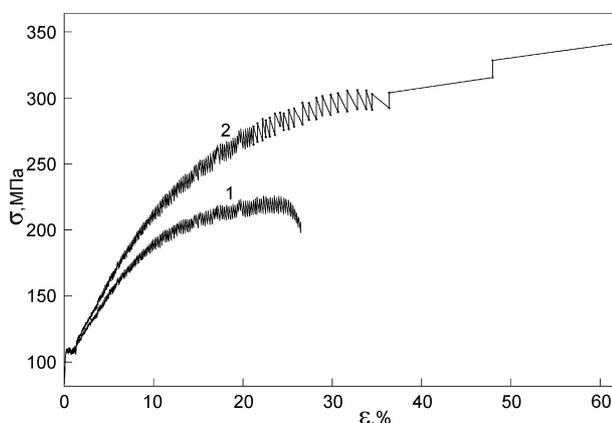


Рис. 12. Кривые  $\sigma - \varepsilon$  сплава  $Al + 5\%Mg$ , полученные без учета (1) и с учетом локализации деформации в шейке образца (2)

### 5. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований получены характеристики «истинных» диаграмм нагружения поликристаллов  $\alpha-Fe$ , ВТ1-0 и ВТ-6 с СМК-структурой, а также поликристаллов  $Al + 10\%Al_2O_3$  и  $Al + 5\%Mg$  с хорошо выраженным эффектом прерывистой текучести. Предложен способ измерения степени пластической деформации в локальной зоне формирования шейки образца. Расчёты показали, что без построения «истинных» диаграмм нагружения материала в локальном объёме (в зоне минимального сечения образца), где данный материал испытывает все стадии накопления пластической деформации и доводится до разрушения, вопрос о стадийности процессов пластической деформации и механизмах деформационного упрочнения данного материала не может быть выяснен однозначно.

Действительные диаграммы нагружения поликристаллов  $\alpha-Fe$ , ВТ1-0 и ВТ-6 с СМК-структурой, а также поликристаллов  $Al + 10\%Al_2O_3$  показывают, что в процессе нагружения материал достигает предельного значения упрочнения, который и определяет уровень напряжения разрушения данного материала. Критическое значение внешнего напряжения, после которого существенного дальнейшего упрочнения материала не происходит, и максимальная величина пластической деформации могут быть использованы в качестве критериев, определяющих состояние материала на стадии предразрушения. Стадийность развития процессов пластической деформации, обсуждаемая в научной литературе, как правило, опирается на базу данных кривых  $\sigma - \varepsilon$  без учёта локализации пластической деформации в минимальном сечении образца [7]. Поэтому корреляция стадий развития субструктур со стадиями кривых нагружения не может считаться достаточно полной без учёта геометрического изменения формы в зоне образования шейки.

Данные о деформационном упрочнении  $\alpha-Fe$  и сплава  $Al + 10\%Al_2O_3$  свидетельствуют о том, что в процессе нагружения материал упрочняется до определённого предела, и дальнейшего существенного деформационного упрочнения материала не происходит. В этих поликристаллах достижению предельного значения упрочнения предшествует продолжительная стадия деформационного упрочнения, развивающегося по параболическому закону.

В случае СМК сплавов ВТ-6 и ВТ1-0 после достижения предела прочности образца деформационное упрочнение материала отсутствует вплоть до разрушения. Этот факт свидетельствует о том, что в процессе ИПД данные материалы уже до испытания были в состоянии предельного деформационного упрочнения. Незначительная степень макропластической деформации (~ 5 %), предшествующая достижению уровня уже существующего до испытания деформационного упрочнения материала, обусловлена тем, что под действием внешнего приложенного напряжения растяжения происходит перераспределение внутренних напряжений в исходном материале, предварительно испытывавшем ИПД, что и определяет незначительную величину пластической

деформации образца до момента достижения предела прочности.

В сплаве Al+5%Mg «истинные» кривые  $\sigma - \epsilon$  хорошо выявляют 4 стадии деформационного упрочнения:

- 1-я стадия – стадия лёгкого скольжения, которая проявляется в виде площадки текучести, на которой прерывистая текучесть протекает при постоянном в среднем внешнем приложенном напряжении;

- 2-я стадия – стадия высокого линейного деформационного упрочнения;

- 3-я стадия – стадия деформационного упрочнения, уменьшающегося по параболическому закону;

- 4-я стадия – линейная стадия деформационного упрочнения с малым значением коэффициента деформационного упрочнения по сравнению с таковым на второй стадии.

Выявленные закономерности и отличия в поведении кривых нагружения исследованных материалов вполне корректно можно объяснить на основе подходов физической мезомеханики и неравновесной термодинамики [8, 9].

В исследованных материалах не обнаружены признаки деформационного разупрочнения на стадии предразрушения, которые отмечаются в некоторых работах [10]. Наоборот, можно предположить, что на самом деле в испытанных материалах имеет место дополнительно слабое деформационное упрочнение, если учесть, что пластическая деформация максимальна в центре шейки [4]. В данной работе расчеты проводились в приближении однородного распределения макропластической деформации в минимальном поперечном сечении образца.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов* / Под ред. Трефилова В.И. Киев: «Наукова думка», 1987, 248 с.

2. Т.М. Полетика, А.П. Пшеничников. Нелинейный характер локализации деформации в ГПУ-сплавах циркония // *ЖТФ*. 2009, т.79, №3, с. 54-58.
3. А.В. Панин, А.А. Сон, Ю.Ф. Иванов, В.И. Копылов. Особенности локализации и стадийность пластической деформации субмикроструктурного армо-железа с полосовой фрагментированной субструктурой // *Физическая мезомеханика (7)*. 2004, №3, с. 5-16.
4. Л.С. Деревягина, В.Е. Панин, А. Гордиенко. Самоорганизация пластических сдвигов в макрополосах локализованной деформации в шейке высокопрочных поликристаллов и ее роль в разрушении материалов // *Физическая мезомеханика (10)*. 2007, №4, с. 59-71.
5. А.Х. Коттрелл. Прерывистая текучесть // *Структура и механические свойства металлов*. М.: «Металлургия», 1967, с. 210-224.
6. А.Х. Крюссар. Новые концепции о пределе текучести в железе и малоуглеродистой стали // *Структура и механические свойства металлов*. М.: «Металлургия», 1967, с. 276-286.
7. Н.А. Конева. Природа стадийности пластической деформации // *Соросовский образовательный журнал*. 1998, №10, с. 100-105.
8. В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин. Физическая мезомеханика и неравновесная термодинамика как методологическая основа наноматериаловедения // *Физическая мезомеханика*. 2009, №4, с. 7-26.
9. В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин. Неравновесная термодинамика деформируемого твёрдого тела как многоуровневой системы // *Физическая мезомеханика (11)*. 2008, №2, с. 9-30.
10. В.Е. Панин, Е.Е. Дерюгин. Самоорганизация полос локализованного сдвига и фазовые волны переключения в поликристаллах // *Физическая мезомеханика (2)*. 1999, №1-2, с. 77-87.

Статья поступила в редакцию 15.06.2011 г.

## СТАДІЙНІСТЬ «СПРАВЖНІХ» ДІАГРАМ НАВАНТАЖЕННЯ

*Є.Є. Дерюгін, Б.І. Суворов*

Отримано характеристики діаграм навантаження полікристалів  $\alpha$ -Fe, сплавів ВТ1-0 і ВТ-6 з субмікроструктурною (СМК) структурою, а також полікристалів Al+5% Mg і Al+10% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> з добре вираженим ефектом переривчастої текучості, з урахуванням формозміни зразка в зоні формування шийки перед руйнуванням. Запропоновано спосіб вимірювання ступеня пластичної деформації в локальній зоні мінімального перерізу зразка. Показано, що для з'ясування стадійності процесу деформационного зміцнення матеріалу в процесі навантаження принципово важливий облік локалізації пластичної деформації в локальному об'ємі зразка на стадії формування шийки перед руйнуванням матеріалу

## STAGES OF THE “ACTUAL” LOADING DIAGRAM

*Ye.Ye. Deryugin, B.I. Suvorov*

Characteristics of the loading diagrams for polycrystalline  $\alpha$ -Fe, alloys ВТ-1 and ВТ-6 with submicrocrystalline (SMC) structure, as well as polycrystalline Al+5% Mg and Al+10% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with a pronounced effect of intermittent flow, were obtained, taking into account the deformation of the sample in zone of the neck formation before the fracture. The method for measuring the degree of plastic deformation in the local zone of minimum cross-section was offered. It is shown that for determination the stages of strain hardening material during loading is fundamentally important the consideration of plastic strain localization in the local volume of the sample at the stage forming the neck before the fracture of the material.