

УДК 01; 05

## ПРЕРЫВИСТАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ И СТРУКТУРЫ ПОЛОС МАКРОЛОКАЛИЗОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИИ

© А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов,  
А.А. Денисов, М.Ф. Гасанов

*Ключевые слова:* прерывистая ползучесть; локализация деформации; алюминий-магниевый сплав АМг6; самоорганизующаяся критичность.

Комплексом высокоскоростных *in situ* методов исследовали нелинейную динамику пространственно-временной структуры макролокализованной деформации в условиях прерывистой ползучести алюминий-магниевого сплава АМг6 при комнатной температуре. Установлено, что в ходе развития деформационного скачка в материале спонтанно формируется сложная структура коррелированно распространяющихся полос деформации, которые рассматриваются как «кванты» макролокализованной деформации. Показано, что с ростом длины образца деформационное поведение этого сплава стремится к состоянию самоорганизующейся критичности.

### ВВЕДЕНИЕ

Первые наблюдения скачков пластической деформации в условиях ползучести металлов относятся к первой половине XIX в. [1, 2]. Макроскопическая прерывистая ползучесть наблюдается в металлах и сплавах, демонстрирующих эффект Портевена–Ле Шателье (ПЛШ) [3, 4] при соответствующих температурах и напряжениях: поликристаллические сплавы систем Al-Cu, Al-Mg [5, 6], Ni-Cr, Ni-Fe-Cr [7, 8].

Большинство исследований макроскопической прерывистой деформации посвящено эффекту ПЛШ (см. обзоры [9–11]), значительно меньше – эффекту Савара–Массона, т. е. появлению ступеней на деформационных кривых при нагружении с постоянной скоростью  $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$  [12–15], хотя этот режим нагружения в большей мере соответствует условиям эксплуатации материала, чем режим с заданной скоростью деформации  $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$ . Макроскопическая прерывистая ползучесть и связанная с ней макролокализация пластической деформации остается фактически не исследованной, за исключением первых косвенных измерений скорости «пластической волны» при ползучести алюминиевого сплава в работе [6] и теоретических предсказаний принципиальной возможности развития макроскопического скачка деформации и распространения солитоподобной деформационной полосы при  $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ , рассмотренных в [16] в рамках механизма динамического деформационного старения дислокаций [17].

Изучение механизмов прерывистой ползучести и полосообразования имеет большое практическое значение: большинство конструкционных металлов и сплавов эксплуатируются в условиях заданной приложенной силы (силы тяжести, тяги, трения, лобового сопротивления, подъемной силы и т. д.), а материалы, склонные к данному явлению, – это, в основном, авиационные сплавы и сплавы, используемые в судостроении и автопроме. Внезапное разрушение таких материалов происходит, как правило, по деформационной

полосе, которая зарождается в условиях ползучести вблизи концентратора напряжения.

Вместе с тем, с позиций нелинейной динамики важно понимание механизмов спонтанного формирования пространственно-временных (диссипативных) структур макролокализованной пластической деформации в условиях заданной (контролируемой) внешней силы, т. е. в динамически определенной системе. Цель настоящей экспериментальной работы состоит в выявлении и исследовании такой структуры при прерывистой ползучести алюминий-магниевого сплава АМг6. Выбор материала исследования определялся следующими обстоятельствами: а) сплав АМг6 демонстрирует ярко выраженное прерывистое течение при активном нагружении при комнатной температуре [13–15]; б) этот сплав широко используется при производстве авиационной техники и автомобилей.

### МЕТОДИКА

Поликристаллические образцы сплава АМг6 (Al – 6,03 мас. % Mg – 0,5 мас. % Mn) в форме двухсторонних лопаток с сечением рабочей части  $3 \times 0,7$  мм вырезали из листового проката после холодной прокатки (степень обжатия 0,3). Для исследования размерных эффектов прерывистой ползучести приготавливали образцы с различной длиной рабочей части: 6, 20, 30, 40 мм. Образцы отжигали при температуре 450 °С в течение одного часа и закаливали на воздухе. После термообработки размер зерна составил 10 мкм. Испытания проводили при комнатной температуре в мягкой деформационной машине, описанной в [18]. (При активном деформировании с заданной скоростью нагружения  $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$  сплав АМг6 демонстрирует ступенчатую кривую деформации – эффект Савара–Массона, см. [15, 20]). Через час после закалки образцы испытывали на ползучесть постоянным растягивающим напряжением  $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ , составляющим 80–90 % предела прочности на разрыв  $\sigma_B \approx 310$  МПа.

Для изучения корреляций силового и деформационного откликов измерительная ячейка была снабжена датчиком усилия Zemic H3-C3-100kg-3B чувствительностью 1,5 мкВ/Н и оптическим экстенсометром, представляющим собой триангуляционный лазерный датчик положения фирмы Ritec, который позволяет измерять деформацию образца с точностью 1,5 мкм в полосе частот 0–2 кГц. Скорость регистрации данных этих датчиков устанавливали равной 2 кГц. Измерения датчиков усилия и деформации синхронизировали с цифровой высокоскоростной видеокамерой VS-FAST/G6 НПК «Видеоскан». Скорость видеосъемки поверхности варьировали от 500 до 2000 кадр/с.

Для исследования кинетики и морфологии полос макролокализованной деформации на поверхности металла данные видеосъемки обрабатывали с помощью компьютерной программы вычитания последовательных цифровых изображений [13, 18]. Для регистрации всех полос деформации плоского образца размером фронтальной поверхности 6×3 мм поле зрения видеокамеры выбиралось 10×10 мм, что при скорости съемки 500 кадр/с и формате изображения 1024×1280 пикселей соответствует разрешению около 8 мкм/пиксель, т. е. размер пикселя приблизительно равен среднему размеру зерна. Такая методика предназначена для исследования *in situ* временной эволюции рельефа поверхности металла, связанного с динамикой локализации деформации в области, размером от нескольких зерен (мезоуровень) до размера образца (макроуровень).

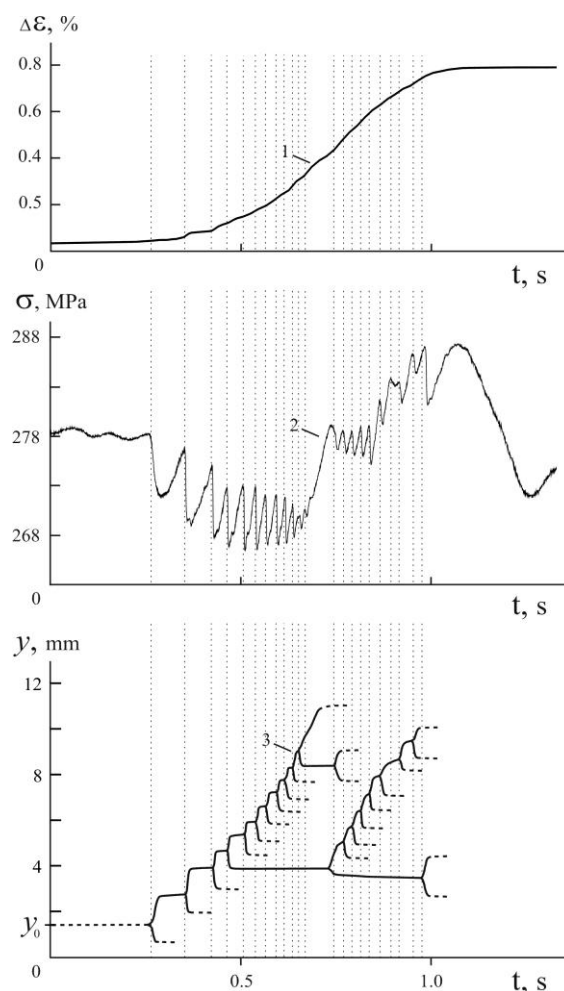
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Нагружение образцов проводили в две стадии: стадии активного нагружения с постоянной скоростью возрастания нагрузки  $\dot{F}_a = \text{const}$  до момента времени  $t_0$ , соответствующего напряжению  $\dot{\sigma}_0 = (0,8-0,9)\sigma_B$  (линия ОА на рис. 3) и стадии собственно ползучести при условном напряжении  $\sigma_a = \sigma_0 = F_0(t_0)/S_0$  (здесь  $S_0$  – начальное сечение образца). Спустя время  $\tau_1$  после начала стадии ползучести образец теряет устойчивость, и на его поверхности спонтанно распространяется сложная пространственно-временная структура полос макролокализованной деформации, которая сопровождается скачком пластической деформации амплитудой в несколько процентов. Следующий скачок деформации возникает только после дополнительного нагружения образца напряжением  $\Delta\sigma_1 \sim 5-10$  МПа; скачок происходит после выдержки образца при напряжении  $\sigma_0 + \Delta\sigma_1$  в течение времени  $\tau_2$  и т. д. При напряжениях  $\sigma_a \approx 250-280$  МПа, составляющих 80–90 %  $\sigma_B$ , инкубационное время  $\tau$  обычно равно 20–30 с.

На рис. 1 представлены типичные результаты синхронной записи датчиков деформации и усилия (кривые 1 и 2, соответственно) в ходе спонтанного развития деформационного скачка после инкубационного времени  $\tau_1 = 30$  с в условиях ползучести при  $\sigma_0 = 278$  МПа образца длиной рабочей части 6 мм. Форма фронта скачка деформации близка к сигмовидной логистической кривой с характерным временем нарастания (длительностью фронта) около 760 мс и амплитудой –

0,81 % (кривая 1). Структура силового отклика содержит более десятка скачков нагрузки (кривая 2) амплитудой  $\sim 1-10$  МПа и длительностью переднего фронта  $\sim 3-10$  мс. Для исследования взаимосвязи структуры силового отклика с пространственно-временной структурой полос макролокализованной деформации строили корреляционную диаграмму  $y(t)$  – временную зависимость координаты  $y$  полосы (рис. 1, кривая 3) по данным видеосъемки со скоростью 500 кадр/с фронтальной поверхности рабочей части образца (со стороны грани 3×6 мм). Эта диаграмма синхронизировалась с данными записи скачка деформации  $\Delta\epsilon(t)$  и силового отклика  $\sigma(t)$ .

Фрагмент видеofilmа, демонстрирующего начальную стадию развития полос деформации на фронтальной поверхности, показан на рис. 2. Деформационный скачок начинается с зарождения и расширения первичной полосы деформации вблизи неподвижной галтели образца. Полоса представляет собой расширяющуюся шейку, наклоненную под углом около 60° к



**Рис. 1.** Временные зависимости приращения деформации  $\Delta\epsilon$  (1) (деформационный скачок), напряжения  $\sigma$  (2) (силовой отклик) и положения  $y$  (3) границ полос (корреляционная диаграмма) в образце сплава АМг6 длиной рабочей части 6 мм.  $y_0 (=1,4$  мм) – позиция зарождения первичной полосы. Условное приложенное напряжение ползучести  $\sigma_0 = F_0/S_0 = 278$  МПа

оси растяжения (см. [15]). В ходе расширения полосы ее «центр тяжести» остается неподвижным. Расширение полосы состоит из двух стадий: 1) стадии очень быстрого расширения в течение 1–3 мс со скоростью границ порядка нескольких десятков см/с, на которой ширина полосы достигает более 90 % ее конечного значения (около 2 мм) (кадры 112–115); 2) стадии медленного роста в среднем со скоростью не более 3 мм/с. На этой стадии скорость границ полосы вдоль оси растяжения монотонно падает, и, когда она достигает нижней границы, приблизительно около 1 мм/с, границы полосы в разные моменты времени генерируют вторичные полосы.

На примере, представленном на рис. 1, вторичные полосы зарождаются преимущественно на правой (на рис. 2) границе полосы, которая двигалась вправо от неподвижной галтели. Вторичная полоса идентична по кинетике расширения и морфологии первичной (материнской) полосе и также представляет собой расширяющуюся шейку, центр тяжести которой остается неподвижным в ходе расширения. Например, средняя линия полосы на кадре 136 в точности совпадает с правой границей полосы на кадре 115. Далее граница вторичной полосы генерирует полосу третьего поколения (см. кадры 149–152) и т. д. В результате развитие пространственно-временных неустойчивостей на фронте спонтанного деформационного скачка описывается бифуркационным деревом, представленным на рис. 1 в виде корреляционной диаграммы  $y(t)$  (кривая 3). Средняя ширина полос составила около 1,5 мм, минимальная – 0,75 мм, т. е. сопоставима с толщиной образца (0,7 мм).

В результате эстафетной передачи деформации от одной полосы к другой макроскопически локализованная деформация распространяется вдоль оси растяжения образца. В терминах феноменологической классификации деформационных полос ПЛШ на типы полос А, В и С [19], например, левую ветвь корреляционной диаграммы (кривая 3 на рис. 1) можно рассматривать как «прыгающую» полосу типа В. В отличие от сложившегося в литературе [9, 10] представления о полосе ПЛШ как о солитоноподобной (уединенной) пластической волне, обе границы которой движутся в одну сторону, «прыгающая полоса типа В» представляет собой пространственно-временную структуру из нескольких мезоскопических деформационных полос, каждая из которых зарождается на границе предшествующей полосы и расширяется таким образом, что ее «центр тяжести» остается неподвижным. После того, как деформационные полосы «обрабатывают» всю рабочую область образца, скорость деформации резко затухает, и скачок завершается. Наблюдаемый макроскопический скачок деформации амплитудой около 1 % (кривая 1) вызывает упругие колебания механической системы машина–образец (см. рис. 1, кривая 2 и рис. 3).

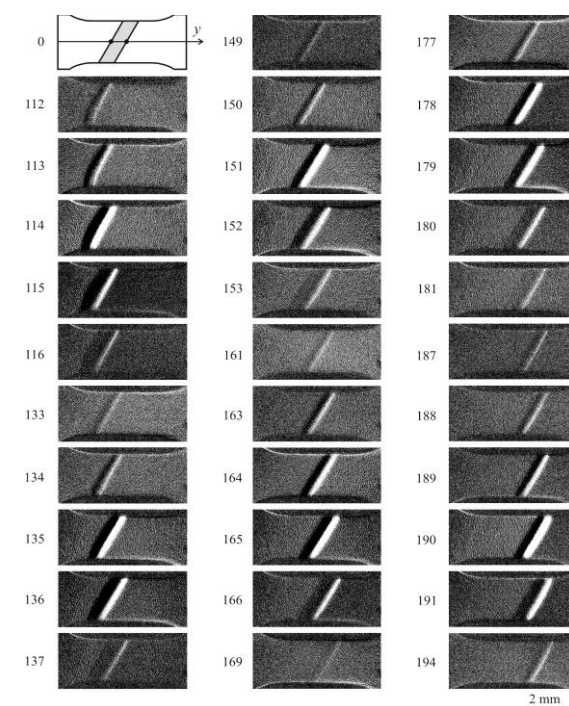
Описанная картина эволюции деформационных полос и временная структура силового отклика  $\sigma(t)$  механической системы существенно изменяется при увеличении длины рабочей части образца. На рис. 3 представлено сравнение зависимости  $\sigma(t)$  для образцов длиной 6, 20, 30 и 40 мм, в которых развивается деформационный скачок почти одинаковой амплитуды, 3–4 %, при приблизительно одинаковом напряжении ползучести, 265–280 МПа. Из рис. 3 видно, что с ростом рабочей длины образца от 6 до 40 мм структура

силового отклика становится более упорядоченной, и в образцах длиной 40 мм, как будет показано ниже, статистика скачков напряжения стремится к критической, которая характеризуется состоянием самоорганизующейся критичности.

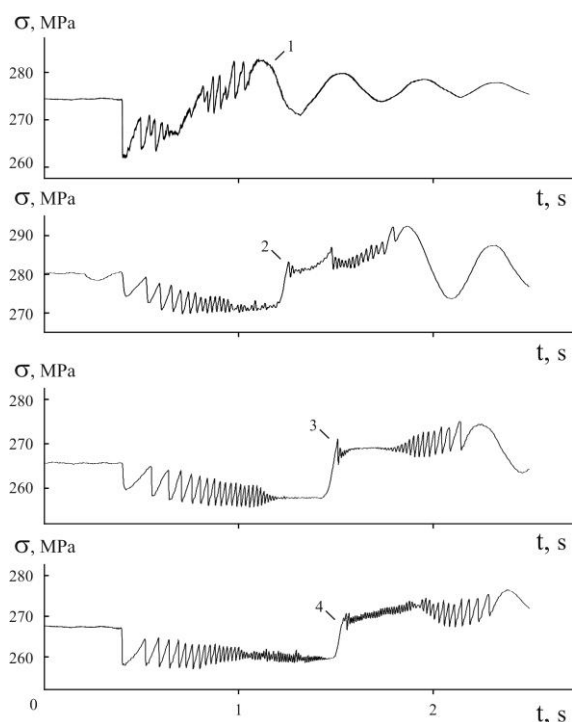
Рассмотрим более детально структуру силового отклика и пространственную структуру деформационных полос в образцах длиной 40 мм. На рис. 4 представлены синхронные записи скачка деформации и силового отклика, а также корреляционная диаграмма деформационных полос в условиях ползучести образца сплава АМг6 размерами 0,7×3×40 мм. Видеосъемку фронтальной поверхности 3×40 мм вели со скоростью 2000 кадров/с. При условном напряжении  $\sigma_0 = 268$  МПа после инкубационного времени  $\tau \approx 20$  с спонтанно развивается скачок амплитудой 1,6 мм, т. е. 4 % относительной деформации и длительностью фронта  $t_{fr} \approx 2$  с (кривая 1).

В силовом отклике механической системы машина–образец в ходе развития этого скачка наблюдается более 100 скачков разгрузки (кривая 2).

Корреляционная диаграмма состоит из двух ветвей, разделенных точкой перегиба зависимости  $\Delta\epsilon(t)$ , т. е. моментом времени, где средняя скорость деформации образца в скачке достигает максимального значения  $\dot{\epsilon}_m \approx 0,04$  с<sup>-1</sup>. С позиции феноменологической классификации деформационных полос ПЛШ деформационный скачок начинается с зарождения у одной из галтелей образца (момент зарождения отмечен буквой О



**Рис. 2.** Результаты компьютерной обработки цифрового видеопленки роста и размножения деформационных полос на фронте скачка пластической деформации амплитудой 0,8 % в сплаве АМг6 в условиях ползучести при  $\sigma_0 = 278$  МПа (форма фронта скачка представлена на рис. 1, кривая 1). Цифры – номера кадров видеосъемки со скоростью 500 кадр/с. На вставке – схема измерения координаты границы полосы  $y$



**Рис. 3.** Силовые отклики – зависимости  $\sigma(t)$  для четырех образцов с различной длиной рабочей части на развитие в них скачков пластической деформации в условиях ползучести: 1 – 6 мм, 2 – 20 мм, 3 – 30 мм, 4 – 40 мм

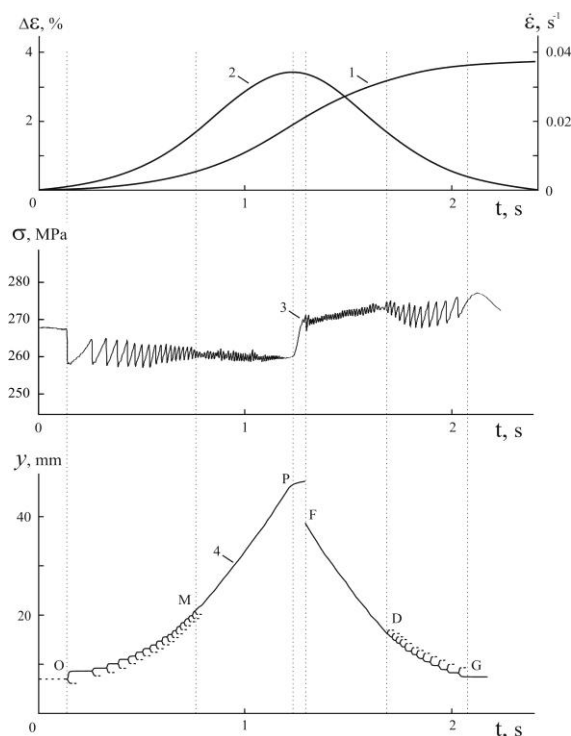
на кривой 4 на рис. 4) полосы типа В, которая затем скачками распространяется вдоль образца. По мере движения этой полосы частота скачков возрастает, и вблизи точки М скачки исчезают (точнее они перестают выявляться при скорости видеосъемки 2000 кадров/с), и происходит переход от полосы типа В к полосе типа А, которая непрерывно (без заметных скачков) распространяется до момента времени Р, когда полоса достигает противоположной галтели. Между моментами времени, соответствующими точкам Р и F, полоса распространяется с затухающей скоростью в области лопатки. В силовом отклике на этом временном интервале наблюдается рост нагрузки, скорость деформации достигает максимального значения, а ускорение верхнего захвата мягкой испытательной машины проходит через нулевое значение. В точке F у этой галтели зарождается новая полоса, которая движется в противоположном направлении. Ее динамика отмечена противоположной тенденцией: сначала она распространяется непрерывно как полоса ПЛШ типа А, а затем, приблизительно после точки F, – скачками, т. е. проявляет динамику, характерную для полосы типа В. После достижения этой полосой границы рабочей длины образца в точке G деформационный скачок завершается.

Анализ данных видеосъемки и корреляционной диаграммы показывает, что «полоса типа В» представляет собой пространственно-временную структуру, состоящую из нескольких десятков (в данном примере около 30) деформационных полос, каждая из которых, за исключением первичной, как было установлено в предыдущем примере (см. рис. 1 и 2), зарождается на границе предшествующей полосы и распространяется таким образом, что ее центр тяжести остается неподвижным. Эволюция каждой такой полосы сопровожда-

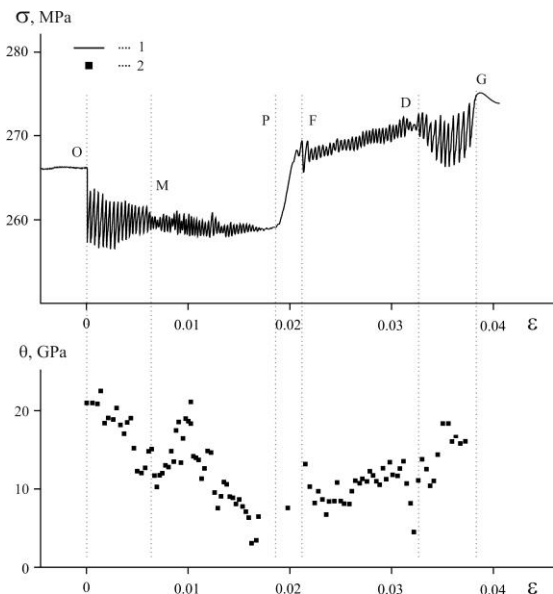
ется скачком треугольной формы в структуре силового отклика  $\sigma(t)$  механической системы: быстрая фаза зарождения и расширения продолжительностью  $\sim 1$ – $3$  мкс сопровождается разгрузкой системы амплитудой до  $\sim 10$  МПа, а медленная фаза расширения продолжительностью  $\sim 10$ – $100$  мс – восстановлением нагрузки почти до исходного (до зарождения полосы) значения.

Силовой отклик, таким образом, является отображением на одну степень свободы – временной ряд  $\sigma(t)$  – пространственно-временной структуры деформационных полос, спонтанное возникновение которой создает макроскопический деформационный скачок на кривой ползучести сплава АМгб. Главная особенность временного ряда  $\sigma(t)$ , как установлено, состоит в том, что каждый скачок разгрузки соответствует зарождению и расширению одной деформационной полосы. Из рис. 4 (кривая 2) видно, скачки в силовом отклике продолжаются и на стадии эволюции полос типа А (стадии МР и FD). Можно предположить поэтому, что «полоса типа А» распространяется не непрерывно, а мелкими скачками и в этом отношении отличается от «полосы типа В» более высокой частотой скачков и меньшей их амплитудой, т. е. представляет собой более «компактную» пространственно-временную структуру полос пластической деформации.

В качестве другого важного отображения можно рассматривать зависимость  $\sigma(\epsilon)$  в ходе развития макроскопического деформационного скачка, которая строится исключением времени из данных цифровых датчиков усилия и положения, т. е. зависимостей  $\sigma(t)$  и  $\Delta\epsilon(t)$  (рис. 4, кривые 1 и 3). Зависимость напряжения от деформации растяжения (диаграммы растяжения



**Рис. 4.** Временные зависимости приращения деформации  $\Delta\epsilon$  (1), скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  (2) в скачке, силового отклика  $\sigma$  (3) и корреляционная диаграмма  $y$  (4) в образце сплава АМгб длиной рабочей части 40 мм



**Рис. 5.** Зависимость от деформации  $\epsilon$  напряжения  $\sigma$  (1) и коэффициента упрочнения  $\theta$  (2) между повторяющимися скачками разгрузки образца при развитии деформационного скачка, представленного на рис. 4

$\sigma$ – $\epsilon$ ) обычно строят для характеристики механических свойств материалов при активном деформировании; для ползучести более традиционным является построение кривой ползучести  $\epsilon(t)$ . Тем не менее, в условиях прерывистой ползучести диаграмма растяжения  $\sigma(\epsilon)$  может быть полезной для измерения деформации, приходящейся на одну деформационную полосу, исследования переходов между различными типами пластических неустойчивостей, измерения коэффициентов упрочнения на различных стадиях развития деформационного скачка и т. д.

Пример такой зависимости представлен рис. 5. Как видно, она также носит прерывистый характер с почти периодическим по деформации повторением скачков разгрузки. Из прерывистой диаграммы  $\sigma(\epsilon)$  можно оценить коэффициенты упрочнения после скачка разгрузки как  $\theta = \Delta\sigma / \Delta\epsilon$ , где  $\Delta\sigma$  – амплитуда скачка напряжения;  $\Delta\epsilon$  – приращение относительной деформации между соседними скачками напряжения. Оценки показывают, что коэффициент упрочнения максимален после первого скачка  $\theta_{max} \approx 23$  ГПа и затем постепенно уменьшается до минимального значения около  $\theta_{min} \sim 1$  ГПа в окрестности области максимальной скорости деформации образца вблизи точек P и F (см. рис. 5).

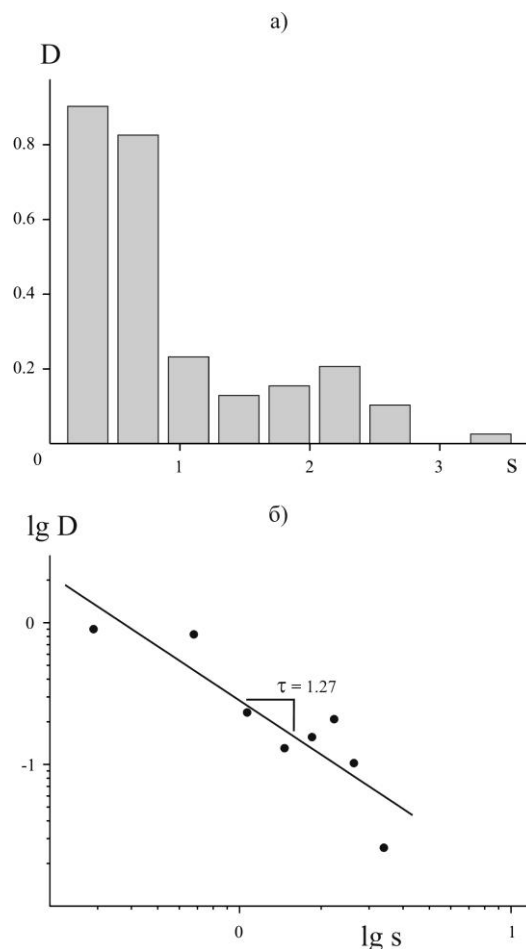
Таким образом, в ходе развития макроскопического деформационного скачка в условиях ползучести материал временно разупрочняется, причем наиболее глубокое разупрочнение реализуется на стадии распространения «полос типа А» (стадии MP и FD). На стадии DG распространения «полосы типа В» коэффициент упрочнения снова увеличивается до значения  $\sim 18$  ГПа, и деформационный скачок затухает. Переходы между поведением типов А и В отмечены, как видно на рис. 5, особенностями на деформационной зависимости коэффициента упрочнения.

Следует отметить, что приращение относительной деформации между скачками  $\Delta\epsilon$  почти не меняется в

ходе развития макроскачка деформации и составляет  $\Delta\epsilon = (3,0 \pm 0,57) \times 10^{-2} \%$ . Учитывая тот факт, что каждый скачок в структуре силового отклика обусловлен зарождением и расширением одной полосы деформации, можно заключить, что каждая такая полоса деформации переносит почти одинаковую деформацию, и поэтому ее можно рассматривать как «квант» макролокализованной деформации.

В то же время амплитуда скачков напряжения  $\Delta\sigma$  распределена в широком интервале значений от  $\sim 0,3$  до  $\sim 10$  МПа, а гистограмма амплитуд скачков напряжения имеет вид, близкий к гиперболическому (рис. 6а). В двойных логарифмических координатах статистическая функция распределения  $D(s) = N^{-1} \delta N / ds$  нормированной амплитуды скачка напряжения  $s = \Delta\sigma / \langle \sigma \rangle$  представляет собой линейную зависимость с тангенсом угла наклона к оси  $s$ , равным 1,27 (рис. 6б). Это означает, что функция распределения амплитуд скачков напряжения подчиняется степенному закону  $D(s) \sim s^{-\tau}$  с показателем степени  $\tau = 1,27$ .

Степенная статистика с показателем  $\tau \sim 1$  является, как известно, одним из признаков состояния самоорганизующейся критичности (СОК) [21]. Для СОК свойственно наличие большого количества метастабильных состояний и, следовательно, широкого спектра времен



**Рис. 6.** Распределение амплитуд скачков напряжения в координатах  $D(s)$  (а) и двойных логарифмических координатах (б)

релаксации, т. е. статистическая динамика развития лавин в системе является существенно неравновесной, а радиус корреляции охватывает всю систему (или ее макроскопическую часть) [22]. Критическая статистика со степенным законом свидетельствует о возникновении дальнедействующих корреляций дислокационной макрокинетики деформируемого сплава. Для систем с СОК глобальная динамика, как предполагается, управляется дальнедействующими корреляциями между большим числом локальных объектов – неравновесных носителей переноса [22]. Из результатов настоящей работы следует, что такими носителями переноса являются расширяющиеся полосы – «кванты» макролокализованной деформации, образующие пространственно-временные структуры, динамика которых соответствует поведению полос ПЛШ типов А и В.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально установлено, что после выдержки в условиях ползучести в течение инкубационного времени ( $\tau \sim 30$  с при  $\sigma_0 \sim 0,8\sigma_B$ ) образец сплава АМг6 спонтанно теряет механическую устойчивость, и на его поверхности зарождается и распространяется пространственно-временная структура полос макролокализованной деформации, которая вызывает развитие: а) деформационного скачка амплитудой в несколько процентов и б) сложной временной структуры скачков напряжения в силовом отклике механической системы машина-образец.

Структура деформационных полос распространяется со средней скоростью около  $\sim 1$  см/с вдоль оси образца за счет последовательного в пространстве и времени зарождения и последующего расширения новых деформационных полос, причем каждая полоса, за исключением первичной, зарождается на границе предшествующей полосы и расширяется со стартовой скоростью  $\sim 0,1-0,3$  м/с таким образом, что ее центр тяжести остается неподвижным. Обнаруженная эстафетная передача деформации от одной полосы к другой в структуре расширяющихся деформационных полос принципиально отличается от представления, известного из литературы [9, 10], о деформационных полосах – носителях прерывистой деформации ПЛШ – как об уединенных (солитоноподобных) волнах пластической деформации, которые с постоянной скоростью распространяются вдоль образца.

Установлено, что каждая полоса в структуре деформационных полос типа А и В переносит почти одинаковую деформацию  $\Delta\delta = (3,0 \pm 0,57) \times 10^{-2}$  %, и поэтому ее можно рассматривать как «квант» макролокализованной деформации. Показано, что с ростом длины образца статистика амплитуд скачков напряжения, связанных с развитием деформационных полос – квантов макролокализованной деформации, стремится к критической, которая характеризуется состоянием самоорганизующейся критичности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Von Gerstner F.A. Über die Festigkeit der Körper // Ann. Chim. Phys. 1832. V. 26. P. 269-279.

2. Savart F. Recherches sur les vibrations longitudinales // Ann. Chim. Phys. 1837. V. 65. P. 337-402.

3. Portevin A., Le Chatelier F. Sur un phenomene observelors de l'essai de traction d'alliages en cours de transformation // Comptes Rendus de l'Academie des Sciences. 1923. V. 176. P. 507-510.

4. Portevin A., Le Chatelier F. Heat treatment of aluminium-copper alloys // Transactions of the American Society of Steel Treating. 1924. V. 5. P. 457-478.

5. Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. М., 1984. Ч. 2. С. 432.

6. McReynolds A.W. Plastic deformation waves in aluminum // Metals Transact. 1949. № 1. P. 32-45.

7. Klueh R.L., King J.F. Unusual creep behavior in a commercial nickel-chromium // Scripta Metallurgica. 1979. V. 13. P. 205-509.

8. Klueh R.L. Discontinuous creep in short-range order alloys // Materials Science and Engineering. 1982. V. 54. P. 65-80.

9. Estrin Y., Kubin L.P. Spatial coupling and propagative plastic instabilities // Continuum models for materials with microstructure / ed. by H.B. Muhlhaus. N. Y.: Wiley & Sons, 1995. P. 395-450.

10. Rizzi E., Hahner P. On the Portevin-Le Chatelier effect: theoretical modeling and numerical results // Int. Journ. Plasticity. 2004. V. 20. P. 121-165.

11. Yilmaz A.J. Temperature and surface potential correlations with serrated flow of low carbon steel // Mater. Sci. 2011. V. 46. P. 3766-3776.

12. Классен-Неклюдова М.В. Закономерности скачкообразной деформации // Журнал русского физ.-хим. общества. Часть физическая. 1928. Т. 60. Вып. 5. С. 373-378.

13. Шибков А.А., Кольцов Р.Ю., Желтов М.А., Шуклинов А.В., Лебедевкин М.А. Динамика спонтанной делокализации пластической деформации при неустойчивом пластическом течении сплавов Аl-Mg // Известия РАН. Серия физическая. 2006. Т. 70. Вып. 9. С. 1372-1376.

14. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А. Механизмы зарождения полос макролокализованной деформации // Известия РАН. Серия физическая. 2012. Т. 76. Вып. 1. С. 97-107.

15. Шибков А.А., Золотов А.Е. Нелинейная динамика пространственно-временных структур макролокализованной деформации // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. Вып. 5. С. 412-417.

16. Kubin L.P., Estrin Y. Portevin-Le Chatelier effect in deformation with constant stress rate // Acta Metall. 1985. V. 33. № 3. P. 397-407.

17. McCormick P.G. A model for the Portevin-Le Chatelier effect in substitutional alloys // Acta Metall. 1972. V. 20. P. 351-360.

18. Шибков А.А., Лебедевкин М.А., Желтов М.А., Скворцов В.В., Кольцов Р.Ю., Шуклинов А.В. Комплекс *in situ* методов исследования скачкообразной пластической деформации металлов // Заводская лаборатория. 2005. Т. 71. Вып. 7. С. 20-27.

19. Chihab K., Estrin Y., Kubin L.P., Vergnol J. The kinetics of the Portevin-Le Chatelier bands in an Al-5 at % Mg alloy // Scripta Metall. 1987. V. 21. P. 203-208.

20. Шибков А.А., Мазилкин А.А., Протасова С.Г., Михлик Д.В., Золотов А.Е., Желтов М.А., Шуклинов А.В. Влияние состояния примесей на скачкообразную деформацию сплава АМг6 // Деформация и разрушение материалов. 2008. Вып. 5. С. 24-32.

21. Bak P., Tang C., Wiessenfeld K. Self-organized criticality // Phys. Rev. A. 1988. V. 38. № 1. P. 364-374.

22. Jensen H.J. Self-Organized Criticality. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1998. 153 p.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 12-08-33052.

Поступила в редакцию 5 июля 2013 г.

Shibkov A.A., Zolotov A.E., Zheltov M.A., Denisov A.A., Gasanov M.F. INTERMITTENT CREEP AND STRUCTURE OF MACRO-LOCAL DEFORMATION BANDS

Complex high-speed *in situ* techniques explored the nonlinear dynamics of the space-time structure macro-local deformation under intermittent creep of aluminum-magnesium alloy АМg6 at room temperature. It is established that in the course of development of strain discontinuity in the material spontaneously formed a complex structure of correlated propagating deformation bands, which are seen as “quanta” macro-local deformation. It is shown that with increasing length of the specimen deformation behavior of the alloy tends to a state of self-organizing criticality.

Key words: intermittent creep; strain localization; aluminum-magnesium alloy АМg6; self-organizing criticality.