

01,07

Прерывистая ползучесть и пространственно-временные структуры макролокализованной пластической деформации

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

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,
Тамбов, Россия

E-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

(Поступила в Редакцию 5 ноября 2013 г.)

Динамику и морфологию полос макролокализованной деформации исследовали комплексом высокоскоростных *in situ* методов в условиях прерывистой ползучести плоских образцов алюминий-магниевого сплава АМг6 с различным соотношением геометрических размеров. Установлено, что в на фронте макроскопического скачка пластической деформации в материале спонтанно формируется сложная структура распространяющихся полос деформации, которые рассматриваются как „кванты“ макролокализованной деформации. Показано, что с ростом длины образца деформационное поведение сплава стремится к состоянию самоорганизующейся критичности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 12-08-33052 и № 13-08-00861).

1. Введение

Спонтанное формирование диссипативных структур в неравновесных системах — одна из нерешенных проблем современной физики конденсированного состояния. Классическими примерами процессов, в которых неустойчивость первоначально однородной неравновесной и нелинейной среды вызывает эволюцию сложных форм фронта разделения, является дендритная кристаллизация переохлажденного расплава (или пересыщенного раствора) [1–5] и формирование структур „вязких пальцев“, когда вязкая жидкость вытесняется менее вязкой жидкостью в пористой среде [6,7]. К их известным аналогам относятся структуры фронтов диффузионного пламени [8], диффузионной агрегации частиц [9], химической реакции и ударной ионизации в пористых средах [10,11], роста популяции бактерий [12] и т.д. В настоящей работе экспериментально исследуется другой пример неравновесного морфогенеза — спонтанное формирование сложных пространственно-временных структур макролокализованной пластической деформации в деформируемом твердом теле в условиях постоянной заданной внешней силы, т.е. в условиях ползучести.

Динамика и морфология локализации деформации на макроуровне обычно исследуется в терминах явлений Людерса [13, 14], прерывистой деформации Портевена-Ле Шателье (ПЛШ) [15–17] или ступенчатой деформации Савара–Массона [18–22] и формирования шейки при разрыве [23,24], которые возникают при активном деформировании материала (как правило, твердых растворов замещения или внедрения) с заданной скоростью $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$ или при его нагружении с заданной скоростью возрастания приложенного напряжения $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$. Подавляющее большинство публикаций в этой области посвящено эффекту ПЛШ и соответственно деформационным полосам ПЛШ (см. обзоры [25–27]).

Макроскопическая прерывистая ползучесть относится к „редким“ явлениям (ей посвящено лишь небольшое количество публикаций [28–33]), поэтому вопросы макролокализации пластической деформации в условиях прерывистой ползучести остаются открытыми.

Вместе с тем, 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, алюминийевые сплавы авиакосмической отрасли 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.

Цель настоящей экспериментальной работы состоит в выявлении и исследовании пространственно-временных структур макролокализованной деформации и их эволюции в зависимости от соотношения геометрических размеров образца 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 [18–22], б) этот сплав широко используется при производстве авиационной техники и автомобилей.

2. Методика

Поликристаллические образцы сплава АМг6 (Al–6.03 wt.%Mg–0.5 wt.%Mn) в форме двухсторонних лопаток с сечением рабочей части 3×0.7 mm 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 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm. Образцы отжигали при температуре 450°C в течение одного часа и закаливали на воздухе. После термообработки размер зерна составил 10 μm . Испытания проводили при комнатной температуре в мягкой деформационной машине, описанной в [34]. Через час после закалки образцы испытывали на ползучесть постоянным растягивающим напряжением $\sigma_0 = \text{const}$, 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-C3-100 kg-3 В чувствительностью 1.5 $\mu\text{V/N}$ и оптическим экстенсометром, представляющим собой триангуляционный лазерный датчик положения фирмы Riffes, который позволяет измерять деформацию образца с точностью 1.5 μm в полосе частот 0–2 kHz. Скорость регистрации данных этих датчиков устанавливали равной 2 kHz. Измерения датчиков усилия и деформации синхронизировали с цифровой высокоскоростной видеокамерой VS-FAST/G6 НПК „Видеоскан“, с помощью которой велась видеосъемка поверхности для выявления полос макролокализованной деформации. Скорость видеосъемки варьировали от 500 до 2000 frames/s. Данные видеосъемки обрабатывали с помощью компьютерной программы вычитания последовательных цифровых изображений [34]. При скорости съемки 500 frames/s и формате изображения 1024 \times 1280 пикселей пространственное разрешение составило около 8 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, 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).

3. Результаты и обсуждение

Нагружение образцов проводили в две стадии: стадии активного нагружения с постоянной скоростью возрастания напряжения $\dot{\sigma}_0 = 1$ МПа/с до напряжения $\sigma_0 = (0.8–0.9)\sigma_B$ и стадии собственно ползучести при условном напряжении σ_0 . Спустя время τ_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 на кривой нагружения 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 τ_2 и т.д. Типичная амплитуда деформационного скачка в этих условиях

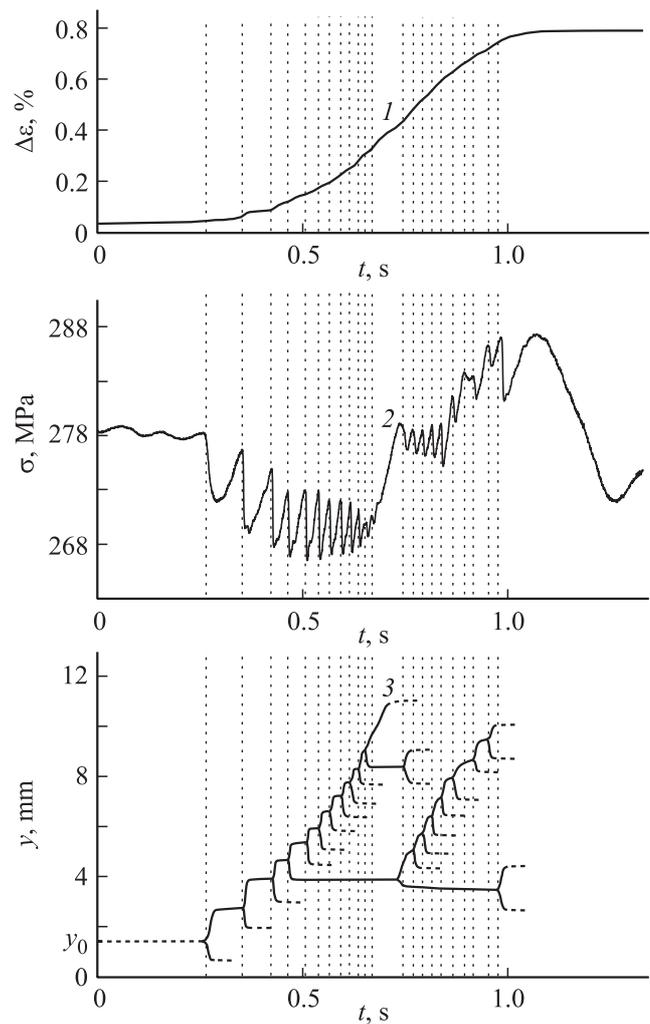


Рис. 1. Временные зависимости приращения деформации $\Delta\varepsilon$ (1) (деформационный скачок), напряжения σ (2) (силовой отклик) и положения y (3) границ полос (корреляционная диаграмма) в образце сплава АМг6 длиной рабочей части 6 mm. y_0 ($= 1.4$ mm) — позиция зарождения первичной полосы. Условное приложенное напряжение ползучести $\sigma_0 = 278$ МПа.

составила $\Delta\varepsilon \sim 1–4\%$, а время ожидания скачка (инкубационное время) $\tau \sim 10–30$ s.

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 $\tau_1 = 30$ s в условиях ползучести при $\sigma_0 = 278$ МПа образца длиной рабочей части 6 mm. Форма фронта скачка деформации близка к сигмовидной логистической кривой с характерным временем нарастания (длительностью фронта) около 760 ms и амплитудой — 0.81% (кривая 1). Силовой отклик содержит более десятка скачков напряжения (кривая 2) амплитудой $\sim 1–10$ МПа и длительностью переднего фронта $\sim 3–10$ ms. Для исследования взаимосвязи структуры силового отклика

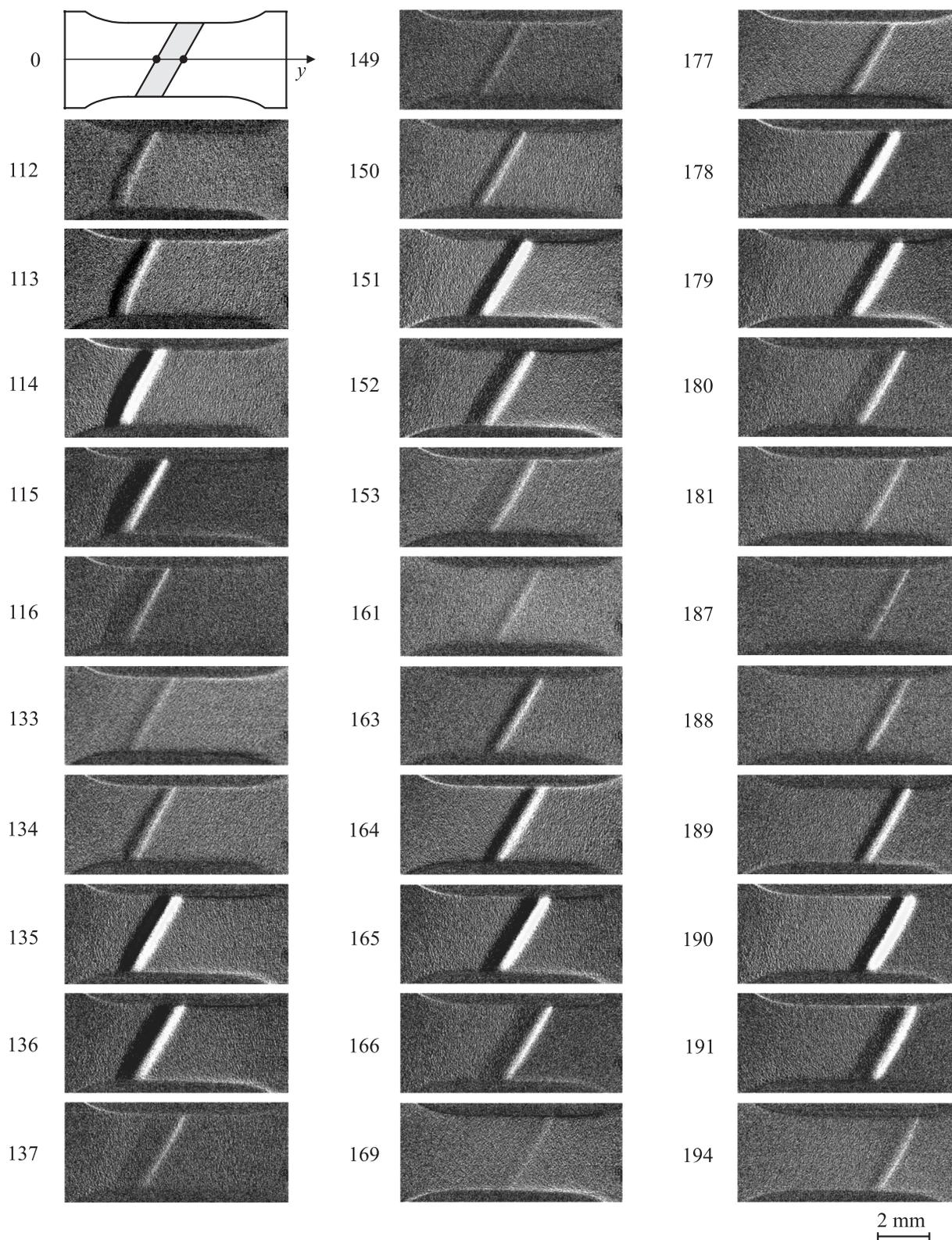


Рис. 2. Результаты компьютерной обработки цифрового видеофильма роста и размножения деформационных полос на фронте спонтанного скачка пластической деформации амплитудой 0.81% в сплаве АМг6 в условиях ползучести при $\sigma_0 = 278$ МПа (форма фронта скачка представлена на рис. 1, кривая I). Цифры — номера кадров видеосъемки со скоростью 500 frames/s. На вставке — схема измерения координаты y границы полосы.

с пространственно-временной структурой полос макролокализованной деформации строили корреляционную диаграмму $y(t)$ — временную зависимость координаты полосы (рис. 1, кривая 3) по данным видеосъемки со скоростью 500 frames/s фронтальной поверхности рабочей части образца (со стороны грани 3×6 mm). Эта диаграмма синхронизировалась с данными записи скачка деформации $\Delta\varepsilon(t)$ и силового отклика $\sigma(t)$.

Фрагмент видеопленки, демонстрирующего начальную стадию развития полос деформаций 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 оси растяжения (см. [20]). В ходе расширения полосы ее „центр тяжести“ остается неподвижным. Расширение полосы состоит из двух стадий: 1) стадии очень быстрого расширения в течение 1–3 ms со скоростью границ порядка нескольких десятков см/с, на которой ширина полосы достигает более 90% ее конечного значения (около 2 mm) (кадры 112–115); 2) стадии медленного роста в среднем со скоростью не более 3 mm/s. На этой стадии скорость границ полосы вдоль оси растяжения монотонно падает, и когда она достигает нижней границы (приблизительно около 1 mm/s), границы полосы в разные моменты времени генерируют вторичные полосы.

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 mm, минимальная — 0.75 mm, т. е. сопоставима с толщиной образца (0.7 mm).

В результате эстафетной передачи деформации от одной полосы к другой макролокализованная деформация распространяется вдоль оси растяжения образца. В терминах феноменологической классификации деформационных полос ПЛШ на типы полос *A*, *B* и *C* [15], например, левую ветвь корреляционной диаграммы (кривая 3 на рис. 1) можно рассматривать как „прыгающую“ полосу типа *B*. В отличие от сложившегося в литературе [15,25] представления о полосе ПЛШ как о солитоноподобной (уединенной) пластической волне, обе границы которой движутся в одну сторону, „прыгающая полоса типа *B*“ представляет собой пространственно-временную структуру из нескольких деформационных полос, каждая из которых зарождается на границе предшествующей полосы и

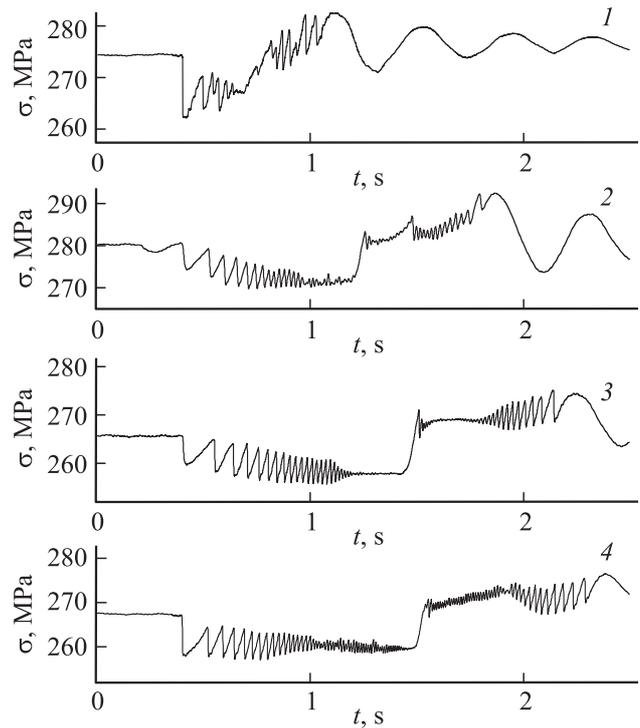


Рис. 3. Силовые отклики — зависимости $\sigma(t)$ для четырех образцов с различной длиной рабочей части на развитие в них скачков пластической деформации в условиях ползучести: 1 — 6 mm, 2 — 20 mm, 3 — 30 mm, 4 — 40 mm.

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% вызывает упругие колебания механической системы машина-образец (рис. 3, кривая 1).

Описанная картина эволюции деформационных полос и временная структура силового отклика $\sigma(t)$ механической системы существенно изменяются при увеличении длины рабочей части образца. На рис. 3 представлено сравнение зависимости $\sigma(t)$ для образцов длиной 6, 20, 30 и 40 mm, в которых развивается деформационный скачок почти одинаковой амплитуды, 3–4%, при приблизительно одинаковом напряжении ползучести, 265–280 MPa. Из рисунка видно, что с ростом рабочей длины образца от 6 до 40 mm структура силового отклика становится более упорядоченной, и в образцах длиной 40 mm, как будет показано ниже, статистика скачков напряжения стремится к критической, т. е. характеризующей состояние самоорганизующейся критичности.

Рассмотрим более детально структуру силового отклика и пространственную структуру деформационных полос в образцах длиной 40 mm. На рис. 4 представлены синхронные записи скачка деформации и силового отклика, а также корреляционная диаграмма деформацион-

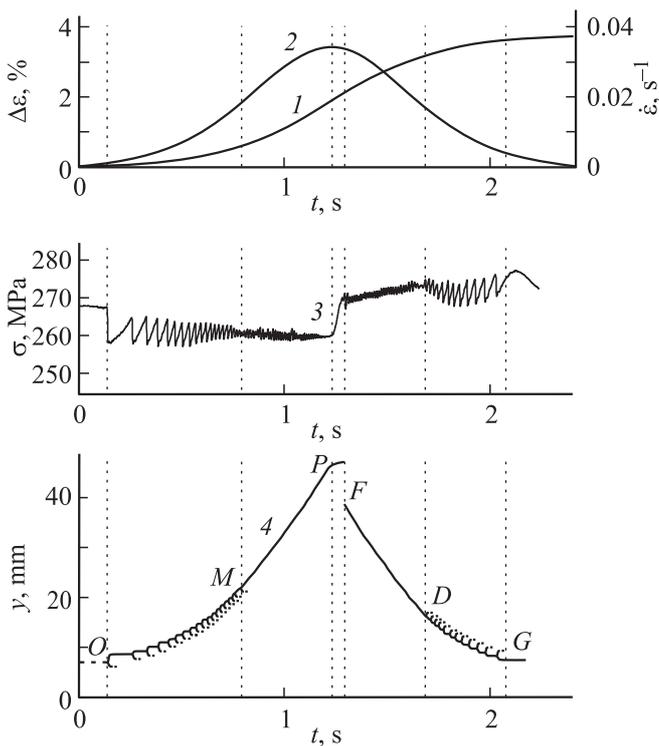


Рис. 4. Временные зависимости приращения деформации $\Delta\varepsilon$ (1), скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ в скачке (2), силового отклика σ (3) и координаты y границы полосы (корреляционная диаграмма) (4) в образце сплава АМг6 с длиной рабочей части 40 мм.

ных полос в условиях ползучести образца сплава АМг6 размерами $0.7 \times 3 \times 40$ мм. Видеосъемку фронтальной поверхности 3×40 мм вели со скоростью 2000 frames/s. 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 3).

Корреляционная диаграмма состоит из двух ветвей, разделенных точкой перегиба зависимости $\Delta\varepsilon(t)$, т.е. моментом времени, где средняя скорость деформации образца в скачке достигает максимального значения $\dot{\varepsilon}_m \approx 0.04 \text{ s}^{-1}$ (см. кривую 2). С позиции феноменологической классификации деформационных полос ПЛШ деформационный скачок начинается с зарождения у одной из галтелей образца (момент зарождения отмечен буквой O на кривой 4 на рис. 4) полосы типа B , которая затем скачками распространяется вдоль образца. По мере движения этой полосы частота скачков возрастает, и вблизи точки M скачки исчезают (точнее, они перестают выявляться при скорости видеосъемки 2000 frames/s) и происходит переход от полосы типа B к полосе типа A , которая непрерывно (без заметных скачков) распространяется до момента времени P , когда полоса

достигает противоположной галтели. Между моментами времени, соответствующих точкам P 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 A , а затем, приблизительно после точки D — скачками, т.е. проявляет динамику, характерную для полосы типа B . После достижения этой полосой границы рабочей длины образца в точке G деформационный скачок завершается.

Анализ данных видеосъемки и корреляционной диаграммы показывает, что „полоса типа B “ представляет собой пространственно-временную структуру, состоящую из нескольких десятков (в данном примере около 30-ти) деформационных полос, каждая из которых, за исключением первичной, как было установлено в предыдущем примере (рис. 1 и 2), зарождается на границе предшествующей полосы и распространяется таким образом, что ее центр тяжести остается неподвижным. Эволюция каждой такой полосы сопровождается скачком треугольной формы в структуре силового отклика $\sigma(t)$ механической системы: быстрая фаза зарождения и расширения продолжительностью $\sim 1\text{--}3$ мс сопровождается разгрузкой системы амплитудой до ~ 10 МПа, а медленная фаза расширения продолжительностью $\sim 10\text{--}100$ мс — восстановлением нагрузки почти до исходного (до зарождения полосы) значения.

Силовым откликом, 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 АМг6. 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 3) видно, скачки в силовом отклике продолжаются и на стадии эволюции полос типа A (стадии MP и FD). Можно предположить поэтому, что „полоса типа A “ распространяется не непрерывно, а мелкими скачками и в этом отношении отличается от „полосы типа B “ более высокой частотой скачков и меньшей их амплитудой, т.е. представляют собой более компактную пространственно-временную структуру полос пластической деформации.

В качестве другого важного отображения можно рассмотреть зависимость $\sigma(\varepsilon)$ в ходе развития макроскопического деформационного скачка, которая строится исключением времени из данных цифровых датчиков усилия и положения, т.е. зависимостей $\sigma(t)$

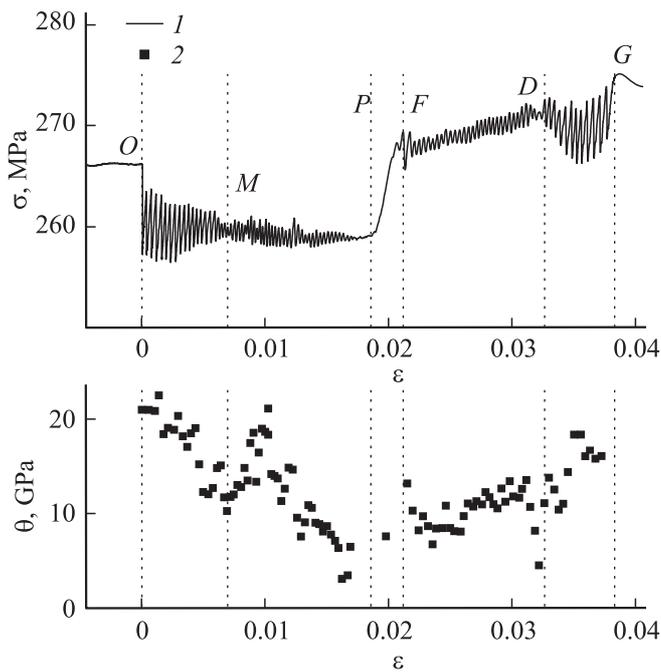


Рис. 5. Зависимость от деформации ε напряжения σ (1) и коэффициента упрочнения θ (2) между повторяющимися скачками разгрузки образца при развитии деформационного скачка, представленного на рис. 4.

и $\Delta\varepsilon(t)$ (рис. 4, кривые 1 и 3). Зависимость напряжения от деформации растяжения (диаграммы растяжения $\sigma-\varepsilon$) обычно строят для характеристики механических свойств материалов при активном деформировании; для ползучести более традиционным является построение кривой ползучести $\varepsilon(t)$. Тем не менее, в условиях прерывистой ползучести диаграмма растяжения $\sigma(\varepsilon)$ 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 $\sigma(\varepsilon)$ можно оценить коэффициенты упрочнения после скачка разгрузки как $\theta = \Delta\sigma/\Delta\delta$, где $\Delta\sigma$ — амплитуда скачка напряжения, $\Delta\delta$ — приращение относительной деформации между соседними скачками напряжения. Оценки показывают, что коэффициент упрочнения максимален после первого скачка $\theta_{\max} \approx 23$ GPa и затем постепенно уменьшается до минимального значения около $\theta_{\min} \sim 1$ GPa 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 A“ (стадии MP и FD). На стадии DG распространения „полосы типа B“ коэффициент упрочнения снова увеличивается (до значения ~ 18 GPa) и деформационный скачок затухает. Переходы между поведением пластических неустойчивостей типов A и B отмечены, как видно на рис. 5, особенностями на деформационной зависимости коэффициента упрочнения.

Следует отметить, что приращение относительной деформации между скачками $\Delta\delta$ почти не меняется в ходе развития макроскачка деформации и составляет $\Delta\delta = (3.0 \pm 0.57) \times 10^{-2}\%$. 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 ~ 0.3 до ~ 10 MPa, а гистограмма амплитуд скачков напряже-

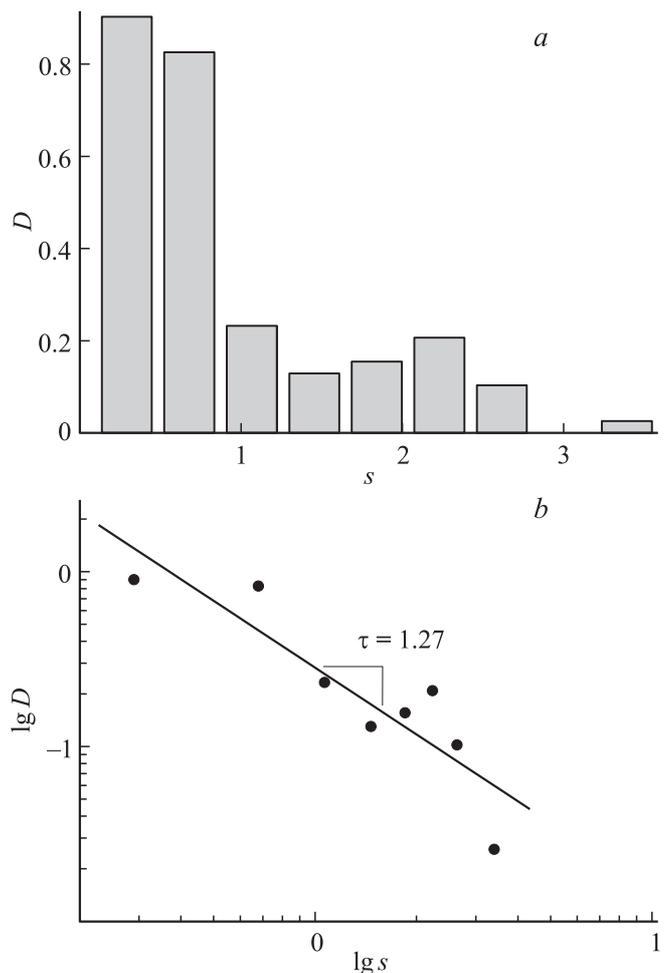


Рис. 6. Статистическая функция распределения нормированных амплитуд скачков напряжения в координатах $D(s)$ (a) и в двойных логарифмических координатах (b).

ния имеет вид, близкий к гиперболическому (рис. 6, а). В двойных логарифмических координатах статистическая функция распределения $D(s) = N^{-1} \delta N / \delta s$ нормированной амплитуды скачка напряжения $s = \Delta\sigma / \langle \Delta\sigma \rangle$ представляет собой линейную зависимость с тангенсом угла наклона к оси s , равным 1.27 (рис. 6, б). 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) [35]. Для СОК свойственно наличие большого количества метастабильных состояний и, следовательно, широкого спектра времен релаксации, т.е. статистическая динамика развития дислокационных лавин, связанных с распространением деформационных полос, является существенно неравновесной, а радиус корреляции охватывает всю систему (или ее макроскопическую часть) [36]. Критическая статистика со степенным законом свидетельствует о возникновении дальнедействующих корреляций дислокационной макрокинетики деформируемого сплава. Для систем с СОК глобальная динамика, как предполагают, управляется дальнедействующими корреляциями между большим числом локальных объектов — неравновесных носителей переноса [36]. 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.

4. Заключение

Обнаружено, что ползучесть алюминий-магниевого сплава АМг6 при комнатной температуре и высоких напряжениях ($\sigma \sim 0.8\sigma_B$) происходит скачками амплитудой $\Delta\varepsilon \sim 1-4\%$. Данные высокоскоростной съемки (со скоростью 500–2000 frames/s) показали, что на фронте макроскопического скачка пластической деформации в материале спонтанно формируется сложная пространственно-временная структура полос макролокализованной деформации, в которой каждая полоса, за исключением первичной, зарождается на границе предшествующей полосы и расширяется таким образом, что ее центр тяжести остается неподвижным. В результате эстафетной передачи деформации от одной полосы к другой макроскопически локализованная деформация распространяется вдоль оси растяжения образца. Силовой отклик $\sigma(t)$ механической системы машина-образец на развитие макроскопического скачка деформации является отображением на одну степень свободы пространственно-временной структуры деформационных полос, в котором каждому скачку разгрузки механической системы соответствует развитие одной полосы деформации.

Установлено, что каждая полоса в структуре деформационных полос 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, стремится к критической, которая характеризуется состоянием самоорганизующейся критичности.

Список литературы

- [1] E. Ben-Jacob, P. Garik. *Nature* **343**, 523 (1990).
- [2] E. Brener, H. Müller-Krumbhaar, D. Temkin, T. Abel. *Physica A* **249**, 73 (1998).
- [3] А.А. Шибков, Ю.И. Головин, М.А. Желтов, А.А. Королев, А.А. Власов. *Кристаллография* **46**, 549 (2001).
- [4] А.А. Шибков, М.А. Желтов, А.А. Королев, А.А. Леонов. *Доклады РАН* **389**, 497 (2003).
- [5] А.А. Шибков, Ю.И. Головин, М.А. Желтов, А.А. Королев, А.А. Леонов. *Physica A* **319**, 65 (2003).
- [6] P.G. Saffman, G.I. Taylor. *Proc. Roy. Soc. Lond.* **245**, 312 (1958).
- [7] Е. Федер. *Фракталы*. Мир, М. (1991). 230 с.
- [8] Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махваладзе. *Математическая теория горения и взрыва*. Наука, М. (1980). 479 с.
- [9] T.A. Witten, L.M. Sander. *Phys. Rev. Lett.* **47**, 1400 (1981).
- [10] G. Daccord. *Phys. Rev. Lett.* **58**, 479 (1987).
- [11] L. Niemeyer, L. Pietronero, H.J. Wiesmann. *Phys. Rev. Lett.* **52**, 1033 (1984).
- [12] Y. Kozlovsky, I. Cohen, I. Golding, E. Ben-Jacob. *Phys. Rev. E* **59**, 7025 (1999).
- [13] I. Zhang, Y. Jiang. *Int. J. Plasticity* **21**, 651. (2005).
- [14] А.А. Шибков, М.А. Желтов, А.Е. Золотов, А.А. Денисов. *ФТТ* **53**, 833 (2011).
- [15] K. Chihab, Y. Estrin, L.P. Kubin, J. Vergnol. *Scripta Metall.* **21**, 203 (1987).
- [16] P. Hahner, A. Ziegenbein, E. Rizzi, H. Neuhauser. *Phys. Rev. B* **65**, 134 109 (2002).
- [17] H. Ait-Amokhtar, P. Vacher, S. Boudrahem. *Acta Mater.* **54**, 4365 (2006).
- [18] А.А. Шибков, Р.Ю. Кольцов, М.А. Желтов, А.В. Шуклинов, М.А. Лебедин. *Изв. РАН. Сер. физ.* **70**, 1372 (2006).
- [19] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов. *Известия РАН. Сер. физ.* **76**, 97 (2012).
- [20] А.А. Шибков, А.Е. Золотов. *Письма в ЖЭТФ* **90**, 412 (2009).
- [21] А.А. Шибков, М.А. Желтов, А.Е. Золотов, А.А. Денисов. *Кристаллография* **58**, 511 (2012).
- [22] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, Д.В. Михлик, М.А. Желтов, А.В. Шуклинов, В.А. Аверков, А.А. Денисов. *Деформация и разрушение материалов* **8**, 23 (2009).
- [23] В.Е. Панин, Л.С. Деревягина, Е.Е. Дерюгин. *Физ. мезомех.* **6**, 97 (2003).
- [24] Л.С. Деревягина, В.Е. Панин, А.И. Гордиенко. *Физ. мезомех.* **10**, 59 (2007).

- [25] Y. Estrin, L.P. Kubin. Continuum models for materials with microstructure./ Ed. H.-B. Muhlhaus. Wiley & Sons, New York (1995). P. 395.
- [26] E. Rizzi, P. Hahner. Int. J. Plasticity **20**, 121 (2004).
- [27] A. Yilmaz. Sci. Technol. Adv. Mater. **12**, 063 001 (2011).
- [28] Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч. 2. Наука, М. (1984). 432 с.
- [29] A.W. Mc Reynolds. Met. Transact. **1**, 32 (1949).
- [30] R.L. Klueh, J.F. King. Scripta Met. **13**, 205 (1979).
- [31] R.L. Klueh, J.F. King. J. Nuclear Mater. **98**, 173 (1981).
- [32] R.L. Klueh. Mater. Sci. Eng. **54**, 65 (1982).
- [33] L.P. Kubin, Y. Estrin. Acta Metall. **33**, 397 (1985).
- [34] А.А. Шибков, М.А. Лебедкин, М.А. Желтов, В.В. Скворцов, Р.Ю. Кольцов, А.В. Шуклинов. Заводская лаборатория **71**, 20 (2005).
- [35] P. Bak, C. Tang, K. Wiessenfeld. Phys. Rev. A **38**, 364 (1988).
- [36] H.J. Jensen. Self-Organized Criticality. Cambridge Univ. Press. Cambridge, (1998). 153 p.