

Макролокализация пластической деформации при прерывистой ползучести алюминий-магниевого сплава АМг6

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

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,
392000 Тамбов, Россия
e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

(Поступило в Редакцию 13 июня 2013 г.)

Комплексом высокоскоростных *in situ* методов исследовали нелинейную динамику пространственно-временной структуры макролокализованной деформации в условиях прерывистой ползучести алюминий-магниевого сплава АМг6 при комнатной температуре. Обнаружены макроскопические скачки деформации амплитудой несколько процентов на кривой ползучести этого сплава. Установлено, что в ходе развития деформационного скачка в материале спонтанно формируется сложная пространственно-временная структура скоррелированно распространяющихся полос макролокализованной деформации. Обсуждено отличие наблюдаемой картины деформационных полос от известной классификации полос деформации Портевена–Ле Шателье.

Введение

Прерывистая ползучесть характерна для многих материалов: металлов и сплавов, ионных кристаллов, льда, полимеров и др. Первые наблюдения скачков пластической деформации в условиях ползучести металлов относятся к первой половине 19-го века [1,2]. Материалы, демонстрирующие прерывистую ползучесть, можно разделить на две группы по масштабному признаку этого явления. К первой группе относятся материалы, проявляющие макроскопическую прерывистую ползучесть, связанную со спонтанной локализацией пластической деформации на макроуровне, которая вызывает развитие скачков деформации амплитудой более $\sim 1\%$. Макроскопическая прерывистая ползучесть наблюдается в металлах и сплавах, демонстрирующих эффект Портевена–Ле Шателье (ПЛШ) [3] при соответствующих температурах и напряжениях: поликристаллические сплавы систем Al–Cu, Al–Mg [4,5], Ni–Cr, Ni–Fe–Cr [6–8]. Ко второй группе относятся материалы, демонстрирующие „мезоскопическую“ прерывистую ползучесть, связанную с динамикой дислокационных скоплений на мезоскопическом структурном уровне (линии и полосы скольжения, двойники и т.д.). Прерывистая ползучесть в этом случае проявляется в виде последовательности скачков деформации амплитудой $\sim 0.1–1 \mu\text{m}$ на кривых ползучести. К этой группе материалов относятся монокристаллы цинка [9], льда [10], щелочногалоидные монокристаллы [11–13], поликристаллическая латунь [14], медь [15], свинец [16], а также ряд полимеров [17]. Для исследования *in situ* микронных и субмикронных скачков деформации используют высокоразрешающие быстродействующие методы на основе лазерного интерферометра [11], индукционного датчика смещения [18], кинофильмирования появления поверхностной ступеньки, связанной с выходом дислокационного скопления [19,20], измерений акустической эмиссии [10] и др.

Следует также отметить явление макролокализации пластической деформации в виде фазовых автоволн, обнаруженных и подробно исследованных методом спеклового интерферометрии при ползучести и активном деформировании широкого круга материалов [21,22]. Это явление, однако, не сопровождается появлением заметных нерегулярностей на деформационных кривых и его, по-видимому, нельзя отнести к прерывистой деформации.

Большинство исследований макроскопической прерывистой деформации посвящено эффекту ПЛШ (см. обзоры [23–25]), значительно меньше — эффекту Савара-Массона — появлению ступеней на деформационных кривых при нагружении с постоянной скоростью $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ [5,26,27–29], 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 Макрейнольдса в 1949 г. скорости „пластической волны“ при ползучести алюминиевого сплава [5] и теоретических предсказаний принципиальной возможности развития макроскопического скачка деформации и распространения солитоноподобной деформационной полосы при $\sigma_0 = \text{const}$, рассмотренных в 1985 г. Кубеном и Эстриным [30] в рамках механизма динамического деформационного старения дислокаций [31].

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,

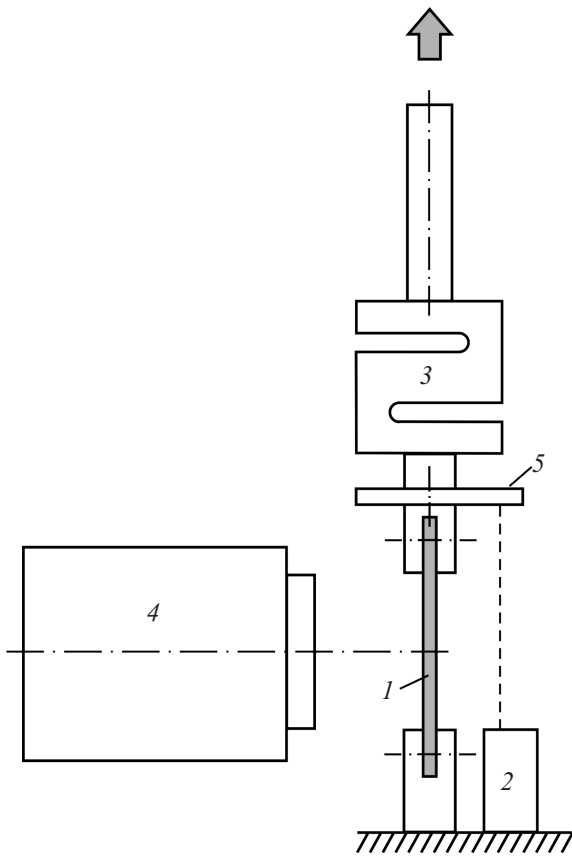


Рис. 1. Схема измерительной ячейки: 1 — образец, 2 — триангуляционный лазерный датчик смещения, 3 — датчик усилия, 4 — высокоскоростная видеокамера; 5 — металлическое зеркало.

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 [27–29], б) этот сплав широко используется при производстве авиационной техники и автомобилей.

1. Методика

Поликристаллические образцы сплава АМг6 (Al–6.03 мас.%Mg–0.5 мас.%Mn) в форме двусторонних

лопаток с размером рабочей части $6 \times 3 \times 0.7$ mm вырезали из листового проката после холодной прокатки (степень обжатия 0.3). Образцы отжигали при температуре 450°C в течение одного часа и закаливали на воздухе. После термообработки размер зерна составил $10 \mu\text{m}$. Испытания проводили при комнатной температуре в мягкой деформационной машине, описанной в [32]. (При активном деформировании с заданной скоростью нагружения $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ сплав АМг6 демонстрирует ступенчатую кривую деформации — эффект Савара–Массона, см. [29,33]). Через час после закалки образцы испытывали на ползучесть постоянным растягивающим напряжением $\sigma_0 = \text{const}$, составляющим 80–90% предела прочности на разрыв $\sigma_B \approx 310 \text{ MPa}$.

При развитии быстропротекающих пластических неустойчивостей вследствие инерционности „мягкой“ деформационной машины механическая система „машина–образец“ может частично разгружаться. Для изучения корреляций силового и деформационного откликов измерительная ячейка (рис. 1) была снабжена датчиком усилия Zemic H3-C3-100kg-3В чувствительностью $1.5 \mu\text{V/N}$ и оптическим экстенсометром, представляющим собой триангуляционный лазерный датчик положения фирмы Riftec, который позволяет измерять деформацию образца с точностью $1.5 \mu\text{m}$ 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“. Скорость видеосъемки поверхности составляла 500 frames/s.

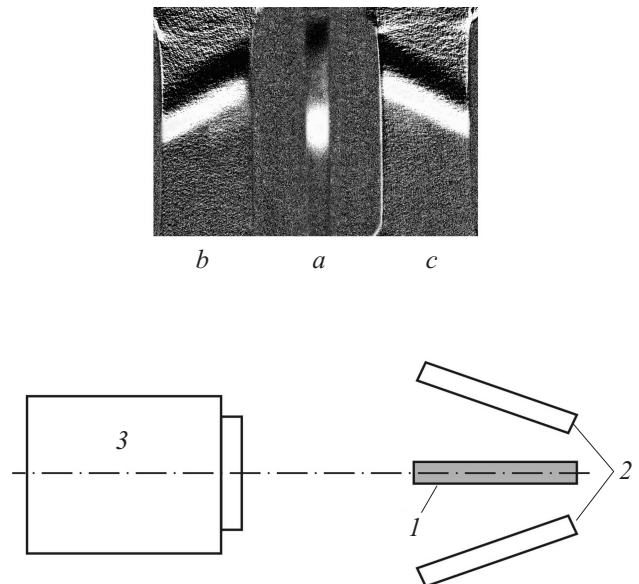


Рис. 2. Схема видеосъемки с двумя зеркалами для получения синхронных изображений полос на боковой и противоположных фронтальных гранях плоского образца. 1 — образец (ось растяжения перпендикулярна плоскости чертежа), 2 — зеркала, 3 — видеокамера. На вставке — фотографии деформационной полосы: a — на боковой поверхности, b и c — на противоположных фронтальных поверхностях.

Для исследования кинетики и морфологии полос макролокализованной деформации на поверхности металла данные видеосъемки обрабатывали с помощью компьютерной программы вычитания последовательных цифровых изображений [27,32]. Для регистрации всех полос деформации плоского образца размером фронтальной поверхности 6×3 mm поле зрения видеокамеры выбиралось 10×10 mm, что при скорости съемки 500 frames/s и формате изображения 1024×1280 пикселей соответствует разрешению 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). Для синхронной записи полос макролокализованной деформации плоского образца на боковой и противоположных фронтальных поверхностях использовали видеосъемку с двумя зеркалами (рис. 2). Такая схема эксперимента позволяет получать информацию об ориентации плоскости, в которой распространяется полоса относительно оси растяжения, и измерять скорость распространения полосы по толщине образца.

2. Экспериментальные результаты

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 $\sigma_0 = (0.8-0.9)\sigma_B$ (линия OA 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 τ_1 после начала стадии ползучести образец теряет устойчивость, и на его поверхности спонтанно распространяется

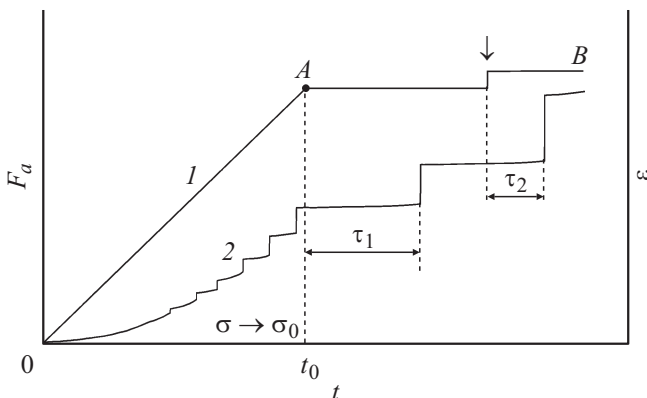


Рис. 3. Схема нагружения образца в мягкой деформационной машине: 1 — временная зависимость приложенной силы F_a ; OA — режим активного нагружения с постоянной скоростью роста внешней силы $\dot{F}_a = \text{const}$ до фиксированной нагрузки $F_0 = \sigma_0 S_0$, AB — режим ползучести, $F_a = F_0 = \text{const}$; 2 — ступенчатая кривая деформации. Стрелкой отмечен момент подгружения после скачка. τ_i — инкубационное время, т.е. время ожидания появления i -го скачка в режиме ползучести.

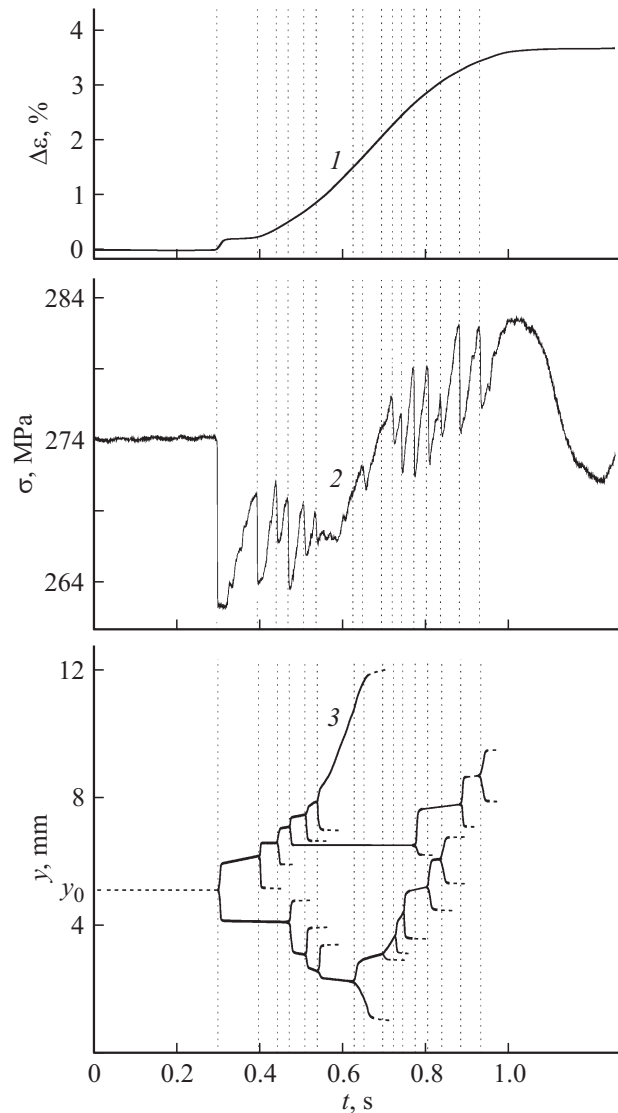


Рис. 4. Временные зависимости приращения деформации $\Delta\epsilon$ (1) (деформационный скачок), напряжение σ (2) (силовой отклик) и положения y (3) границ полос (корреляционная диаграмма). y_0 (равен 5.1 mm) — позиция зарождения первичной полосы. Условное приложенное напряжение ползучести $\sigma_0 = F_0/S_0 = 274$ МПа.

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 τ_2 и т.д. При напряжениях $\sigma_a \approx 250-280$ МПа, составляющих 80–90% σ_B , инкубационное время τ обычно равно 20–30 s.

На рис. 4 представлены типичные результаты синхронной записи датчиков деформации и усилия (кривые 1 и 2 соответственно) в ходе спонтанного развития деформационного скачка после инкубационного времени

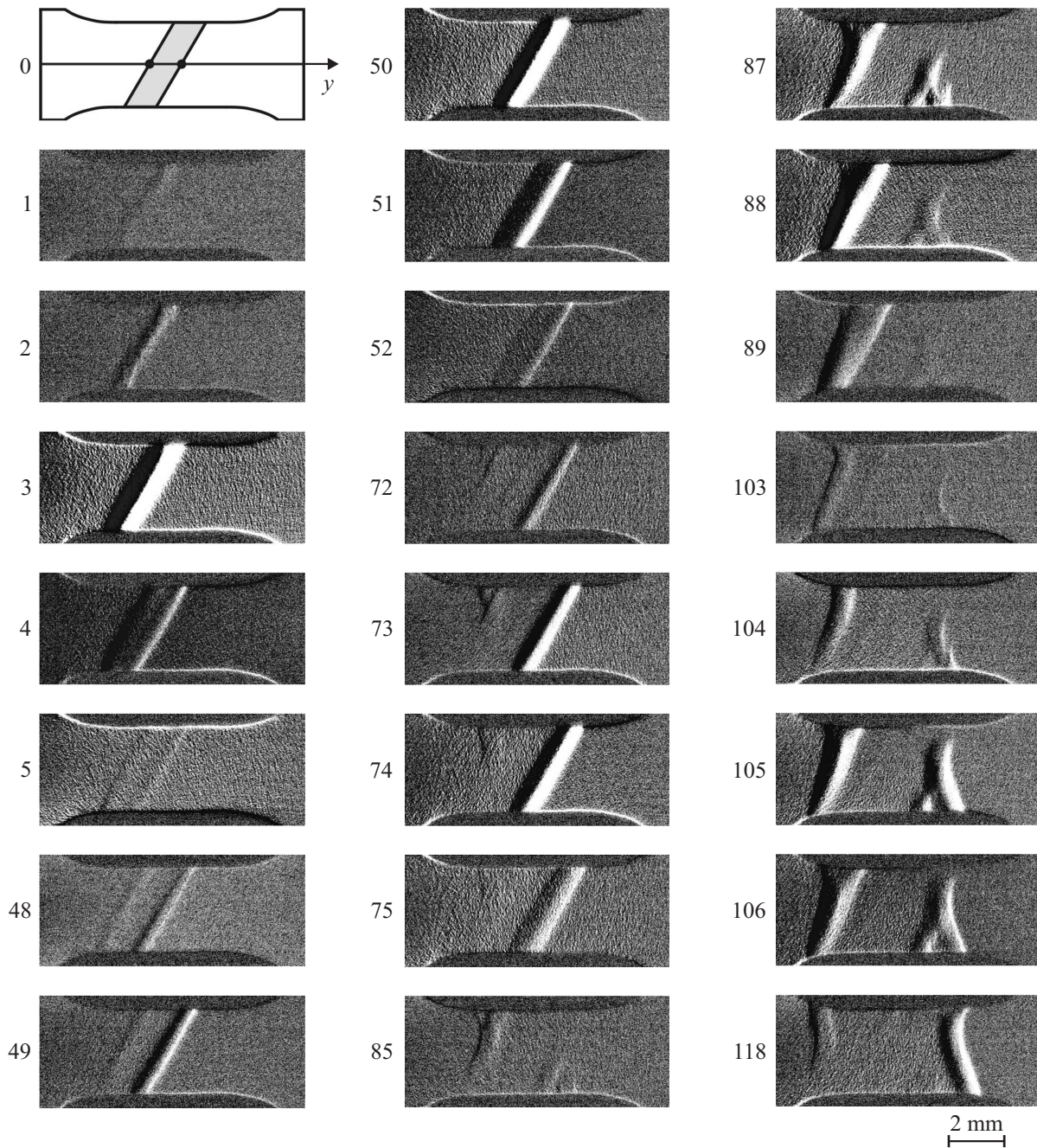


Рис. 5. Результаты компьютерной обработки цифрового видеофильма роста и размножения деформационных полос на фронте скачка пластической деформации амплитудой 4% в сплаве АМг6 в условиях ползучести при $\sigma_0 = 274$ МПа (форма фронта скачка представлена на рис. 4, кривая 1). Цифры — номера кадров видеосъемки со скоростью 500 frames/s. На вставке — схема измерения координаты границы полосы y .

$\tau_1 = 21$ s в условиях ползучести при $\sigma_0 = 274$ МПа. Форма фронта скачка деформации близка к сигмовидной логистической кривой с характерным временем нарастания (длительностью фронта) около 700 ms и амплитудой — 4% (кривая 1). У подножия этого макроскопического скачка обычно наблюдается небольшой (мезоскопический) первоначальный скачок амплитудой около 0.2% и длительностью фронта ~ 10 ms. Структура силового отклика содержит более десятка скачков нагрузки

(кривая 2) амплитудой $\sim 1-10$ МПа и длительностью переднего фронта $\sim 3-10$ ms. Для исследования взаимосвязи структуры силового отклика с пространственно-временной структурой полос макролокализованной деформации строили корреляционную диаграмму $y(t)$ — временную зависимость координаты полосы (рис. 4, кривая 3) по данным скоростной видеосъемки 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 видеofilьма, демонстрирующего начальную стадию развития структуры полос деформаций на фронтальной поверхности, показан на рис. 5. Деформационный скачок начинается с зарождения расширения первичной полосы деформации обычно в центральной части (средней трети рабочей длины) образца. Полоса представляет собой расширяющуюся шейку, наклоненную под углом около 60° к оси растяжения (см. [29]). 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 1–4); 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 (отстоящие на 100–200 ms) генерируют вторичные полосы (см. кадры 48–51, 85–89 на рис. 5). Вторичные полосы идентичны по кинетике расширения и морфологии первичной (материнской) полосе и также представляют собой расширяющиеся шейки (кадры 3, 50, 74, 88). Далее границы вторичных полос генерируют полосы третьего поколения и т.д. В результате развитие пространственно-временных неустойчивостей на фронте спонтанного деформационного „взрыва“ описывается бифуркационным деревом, представленным на рис. 4 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).

Для исследования роли полос деформации в развитие деформационного скачка в условиях ползучести в серии экспериментов проводили синхронную видеосъемку противоположных фронтальных поверхностей образца и боковой поверхности с использованием схемы видеосъемки с помощью двух зеркал (рис. 2). Анализ видеofilьмов показывает, что картина деформационных полос на противоположных фронтальных поверхностях образца абсолютно идентична (см. вставку на рис. 2). Можно утверждать, что полоса макролокализованной деформации — сквозная, т.е. представляет объемный домен с более высокой скоростью пластической деформации по сравнению со скоростью деформации вне полосы. Объем этого домена (объем полосы) равен произведению толщины образца на площадь полосы S_i , т.е. площадь, заключенную между границами полосы. Для исследования корреляции полосообразования с кинетикой скачка пластической деформации площади всех полос, появившихся на поверхности к данному моменту времени t , суммировали и получали суммарную площадь полос $A(t) = \sum S_i(t)$. Эту зависимость затем сравнивали с кривой нагружения на соответствующем временном

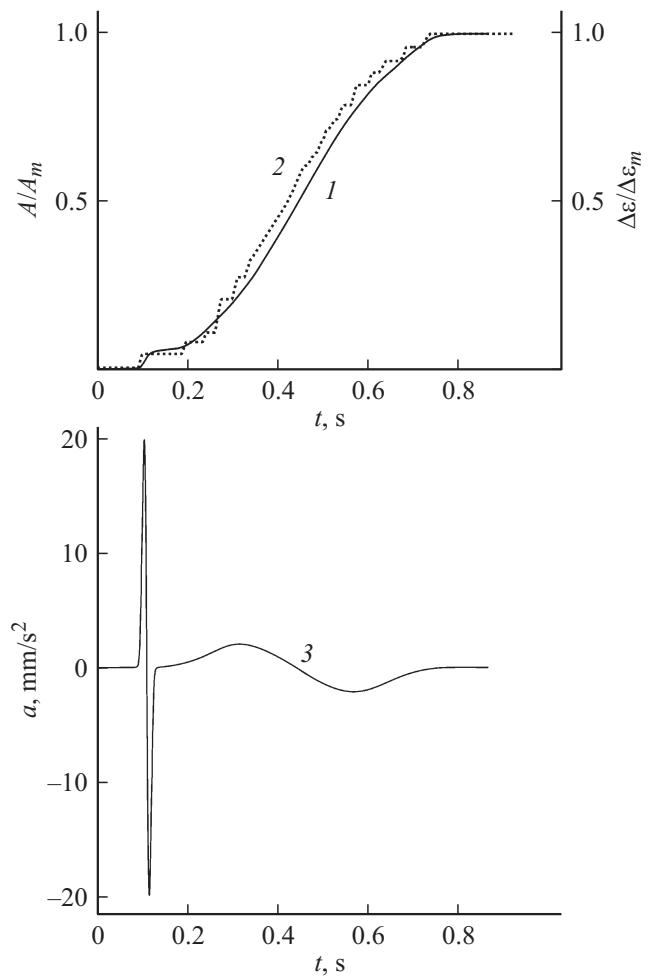


Рис. 6. Сравнение формы фронта деформационного скачка в безразмерных единицах $\delta\varepsilon/\Delta\varepsilon_m$ (1) с временной зависимостью суммарной площади полос A/A_m , нормированной на ее конечное значение A_m (2) и ускорения a (3), которое развивает верхний захват испытательной машины в ходе развития скачка. Здесь $\Delta\varepsilon_m = 4\%$, $A_m = 85 \text{ mm}^2$.

интервале, т.е. с формой скачка деформации $\Delta\varepsilon(t)$. На рис. 6 представлено сравнение временной зависимости суммарной площади полос $A(t)$ и формы фронта деформационного скачка $\Delta\varepsilon(t)$. Высокий коэффициент корреляции $k = 0.9956$ этих зависимостей позволяет заключить, что полосы дают основной вклад в скачкообразную деформацию образца.

3. Обсуждение результатов

Сравнительный анализ временных рядов $\Delta\varepsilon(t)$ и $\sigma(t)$ и корреляционной диаграммы $y(t)$ показывает, что первая быстрая стадия расширения каждой полосы сопровождается скачком разгрузки системы машина-образец, а вторая, медленная, стадия расширения — заметным приростом деформации всего образца и ростом (возвратом) нагрузки по данным измерения датчика усилия (рис. 4). Как видно, резкое падение скорости полос на второй

стадии не сопровождается соответствующим падением скорости деформации образца. Это означает, что на этой стадии деформация осуществляется за счет движения дислокаций внутри полосы. Можно предположить, что скапливаясь у границ полосы, дислокации создают внутренние напряжения, которые затем релаксируют за счет зарождения на одной из границ новой полосы и ее быстрого расширения в основном за счет внутренних напряжений и далее ситуация воспроизводится.

В результате такой эстафетной передачи деформации от одной полосы к другой и т.д. макроскопически локализованная деформация распространяется вдоль образца. В терминах феноменологической классификации деформационных полос ПЛШ на типы полос А, В и С [33], например, верхнюю ветвь корреляционной диаграммы (кривая 3 на рис. 4) можно рассматривать как „прыгающую“ полосу типа В. В отличие от сложившегося в литературе [23,24] 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. Поскольку такая структура распространяется за счет последовательного в пространстве и времени зарождения новых деформационных полос, ее можно рассматривать как волну нуклеации ([29]). После того, как деформационные полосы „обрабатывают“ всю рабочую область образца скорость деформации резко затухает, и скачок завершается. Наблюдаемый макроскопический скачок деформации амплитудой 4% (рис. 4, кривая 1) вызывает упругие колебания механической системы „машина—образец“, хорошо выявляемые в силовом отклике системы $\sigma(t)$ (рис. 4, кривая 2).

В условиях ползучести, когда приложенная внешняя сила поддерживается постоянной, нестационарное поведение сигнала датчика усилия может быть вызвано ускорением механической системы на фронте деформационного скачка: в фазе положительного ускорения подвижного захвата механическая система частично разгружается, а в фазе торможения должен наблюдаться импульс перегрузки. Для оценки ускорения цифровые данные экстенсометра $\Delta l(t)$ дифференцировались дважды по времени с помощью программы Origin. Временная зависимость ускорения верхнего захвата испытательной машины (нижний захват неподвижен) $a(t) = \partial^2 \Delta l / \partial t^2$ на временном интервале, соответствующем длительности переднего фронта деформационного скачка, представлена на рис. 6 (кривая 3). Как видно из рисунка, ускорение достигает максимального значения 20 mm/s^2 на стадии развития первичного мезоскопического скачка, что дает оценку разгрузки образца $\Delta \sigma = \sigma_a a / g \approx 0.56 \text{ МПа}$ (где $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ — ускорение свободного падения, $\sigma_a = 274 \text{ МПа}$ — приложенное напряжение), что почти в 20 раз меньше амплитуды первого скачка разгрузки

системы $\Delta \sigma_1 \approx 10 \text{ МПа}$. В ходе последующего развития макроскопического скачка величина ускорения не превышает 2 mm/s^2 , что соответственно на порядок уменьшает оценку разгрузки образца $\Delta \delta \approx 0.05 \text{ МПа}$. Поэтому наблюдаемые скачки напряжения в структуре силового отклика не связаны с нестационарным движением механической системы машина—образец, а обусловлена спонтанным развитием пластических неустойчивостей в деформируемом материале, обусловленных чередованием процессов деформационного и/или скоростного разупрочнения и упрочнения.

Заключение

Таким образом, алюминий-магниевый сплав АМгб демонстрирует прерывистое течение не только при активном деформировании [27–29], но, как следует из результатов настоящей работы, и в условиях ползучести при комнатной температуре и высоких напряжениях ($\sigma_0 \sim 0.8\sigma_B$). Экспериментально установлено, что после выдержки в условиях ползучести в течение инкубационного времени $\tau \sim 30 \text{ s}$ образец спонтанно теряет механическую устойчивость и на его поверхности зарождается и распространяется пространственно-временная структура полос макролокализованной деформации, которая вызывает развитие деформационного скачка амплитудой в несколько процентов и сложной временной структуры скачков напряжения в силовом отклике механической системы машина—образец.

Структура деформационных полос распространяется со средней скоростью около $\sim 1 \text{ cm/s}$ 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 $\sim 0.1\text{--}0.3 \text{ m/s}$ таким образом, что ее центр тяжести остается неподвижным. Наиболее быстрая стадия расширения новой полосы продолжительностью несколько миллисекунд сопровождается скачком разгрузки образца амплитудой до $\sim 10 \text{ МПа}$. После того, как деформационные полосы обработают всю рабочую область образца, скорость деформации резко падает, и деформационный скачок завершается. Обнаруженная эстафетная передача деформации от одной полосы к другой в структуре расширяющихся деформационных полос принципиально отличается от представления, известного из литературы [23,24] о деформационных полосах — носителях прерывистой деформации ПЛШ — как об уединенных (солитоноподобных) волнах пластической деформации, которые с постоянной скоростью распространяются вдоль образца.

Обнаруженные в работе спонтанно-генерируемые материалом в условиях ползучести пространственно-временные (диссипативные) структуры деформационных полос представляют собой яркое нелинейное явление в физике прочности и пластичности; они возникают в

результате внезапного развития каскада пластических неустойчивостей в динамически определенной системе. Важной характеристикой задачи является время ожидания спонтанного появления деформационного скачка — инкубационное время τ (аналогично времени ожидания появления критического зародыша в переохлажденном расплаве или времени ожидания электрического пробоя и т.д.). Величина τ может зависеть от напряжения ползучести, температуры испытания и структуры сил закрепления дислокаций, что требует дальнейшего исследования.

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

Список литературы

- [1] *von Gerstner F.A.* // Ann. Chim. Phys. 1832. Vol. 26. P. 269–279.
- [2] *Savart F.* // Ann. Chim. Phys. 1837. Vol. 65. P. 337–402.
- [3] *Portevin A., Le Chatelier F.* // Seances Acad. Sci. 1923. Vol. 176. P. 507–510.
- [4] *Белл Дж.Ф.* Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч. 2. М.: Наука, 1984. 432 с.
- [5] *McReynolds A.W.* // Metals Transact. 1949. N 1. P. 32–45.
- [6] *Klueh R.L., King J.F.* // Scripta Metallurgica. 1979. Vol. 13. P. 205–509.
- [7] *Klueh R.L., King J.F.* // J. of Nuclear Materials. 1981. Vol. 98. P. 173–189.
- [8] *Klueh R.L.* // Mater. Sci. and Engineer. 1982. Vol. 54. P. 65–80.
- [9] *Рожанский В.Н.* // УФН. 1958. Т. LXV. Вып. 3. С. 387–406.
- [10] *Weiss J., Grasso J.-R.* // J. Phys. Chem. B. 1997. Vol. 101. N 32. P. 6113–6117.
- [11] *Шнейцман В.В., Песчанская Н.Н., Степанов В.А.* // ФТТ. 1984. Т. 26. Вып. 8. С. 2387–2489.
- [12] *Шнейцман В.В., Песчанская Н.Н., Смирнов Б.И.* // ФТТ. 1998. Т. 40. Вып. 4. С. 690–693.
- [13] *Никаноров С.П., Кардашев Б.К.* Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. М.: Наука, 1985. 256 с.
- [14] *Ardley G.W., Cottrel A.H.* // Proc. Roy. Soc. A. 1953. Vol. 219. N 2. P. 328–334.
- [15] *Курлаев А.Р., Сидорин Ю.В.* // ДАН СССР. 1990. Т. 311. Вып. 3. С. 609–612.
- [16] *Могильникова Т.Т.* // Вопросы атомной науки и техники. 2009. Вып. 6. С. 42–46.
- [17] *Песчанская Н.Н., Якушев П.Н., Егоров В.М., Берштейн В.А., Vokobza L.* // ФТТ. 2002. Т. 44. Вып. 9. С. 1609–1613.
- [18] *Даниленко Л.И., Зиновьев М.В., Коваль В.А.* // ПТЭ. 1973. Вып. 2. С. 213–215.
- [19] *Neuhauser H.* / Dislocation in Solids. Ed. by F.R.N. Nabarro. Amsterdam: North-Holland Company, 1983. Vol. 6. P. 319–440.
- [20] *Hampel A., Neuhauser H.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1987. Vol. 100. N 1. P. 441–449.
- [21] *Данилов В.И., Коновалов С.В., Журавлева С.В., Зувев Л.Б., Громов В.Е.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 3. С. 94–97.
- [22] *Зувев Л.Б., Баранникова С.А.* Физика прочности и экспериментальная механика. Новосибирск : Наука. 2011. 350 с.
- [23] *Estrin Y., Kubin L.P.* / Continuum models for materials with microstructure / Ed. by H.-B. Muhlhaus. NY: Wiley & Sons, 1995. P. 395–450.
- [24] *Rizzi E., Hahner P.* // Int. Journ. Plasticity. 2004. Vol. 20. P. 121–165.
- [25] *Yilmaz A.J.* // Mater. Sci. 2011. Vol. 46. P. 3766–3776.
- [26] *Классен-Неклюдова М.В.* // Журнал русского физ.-хим. общества, часть физическая. 1928. Т. 60. Вып. 5. С. 373–378.
- [27] *Шибков А.А., Кольцов Р.Ю., Желтов М.А., Шуклинов А.В., Лебедкин М.А.* // Известия РАН. Серия физ. 2006. Т. 70. Вып. 9. С. 1372–1376.
- [28] *Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А.* // Известия РАН. Серия физ. 2012. Т. 76. Вып. 1. С. 97–107.
- [29] *Шибков А.А., Золотов А.Е.* // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. Вып. 5. С. 412–417.
- [30] *Kubin L.P., Estrin Y.* // Acta Metall. 1985. Vol. 33. N 3. P. 397–407.
- [31] *McCormick P.G.* // Acta Metall. 1972. Vol. 20. P. 351–360.
- [32] *Шибков А.А., Лебедкин М.А., Желтов М.А., Скворцов В.В., Кольцов Р.Ю., Шуклинов А.В.* // Заводская лаборатория. 2005. Т. 71. Вып. 7. С. 20–27.
- [33] *Шибков А.А., Мазилкин А.А., Протасова С.Г., Михлик Д.В., Золотов А.Е., Желтов М.А., Шуклинов А.В.* // Деформация и разрушение материалов. 2008. Вып. 5. С. 24–32.
- [34] *Chihab K., Estrin Y., Kubin L.P., Vergnol J.* // Scripta Metall. 1987. Vol. 21. P. 203–208.