

01,07

## Разрушение алюминий-магниевого сплава при воздействии импульсного лазерного излучения в условиях ползучести

© А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.Ф. Гасанов, М.А. Желтов, К.А. Проскуряков, С.С. Кочегаров

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

E-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

(Поступила в Редакцию 15 мая 2018 г.)

С помощью высокоскоростной видеосъемки исследовали стадию предразрушения и развитие магистральной трещины, инициированные импульсным лазерным ИК-излучением на поверхность алюминий-магниевого сплава АМг6, деформируемого одноосным растяжением в условиях ползучести. Выявлена роль макрополос пластической деформации в развитии последнего деформационного скачка амплитудой  $\sim 10\%$ , зарождении и распространении магистральной трещины. Обсуждается возможный механизм разрушения.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП Тамбовского государственного университета им. Г.Р. Державина при поддержке Российского научного фонда (проекты № 17-79-10404 и № 18-19-00304).

DOI: 10.21883/FTT.2018.11.46670.135

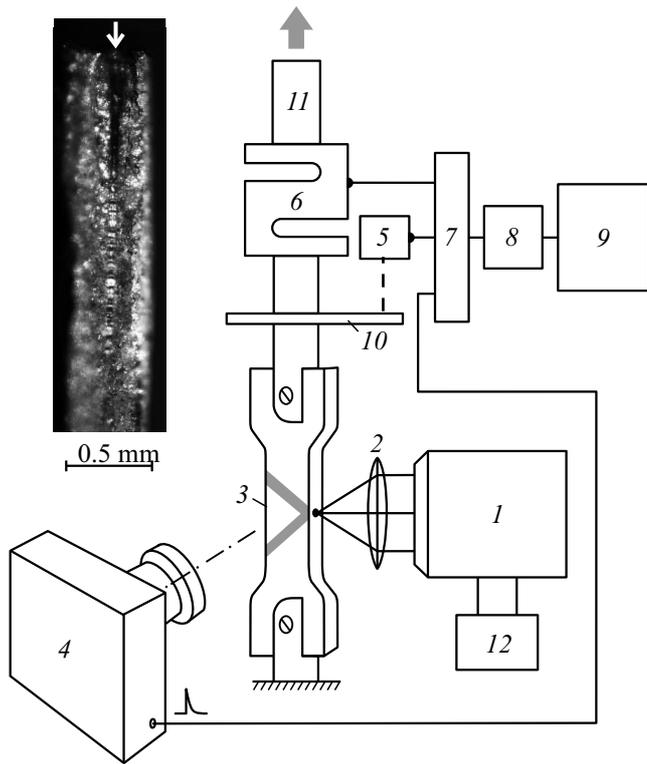
### 1. Введение

Алюминий-магниевые сплавы относятся к коррозионно-стойким свариваемым сплавам с высокой удельной прочностью. Они нашли применение в авиакосмической отрасли и автопроме. Проблема повышения надежности и долговечности этих сплавов требует изучения их физических, механических и эксплуатационных свойств в условиях внешних воздействий, способных вызвать катастрофическое развитие механических неустойчивостей и разрушение. Сплавы системы Al–Mg, как и многие алюминиевые сплавы, склонны к проявлению механической неустойчивости в виде прерывистой деформации как в условиях металлообработки, так и в условиях эксплуатации [1–3]. Влияние внешних воздействий на прерывистую деформацию Портевена-Ле Шателье (ПЛШ) и связанное с ней образование деформационных полос сводилось, главным образом, к исследованию влияния температуры и скорости деформирования для тестирования моделей эффекта ПЛШ [4–7]. В ряде работ [8–11] исследовали влияние предварительной термической, термомеханической обработки и текстуры на характеристики прерывистой деформации. В [12,13] обнаружено и исследовано явление подавления электрическим током эффекта ПЛШ и полосообразования в некоторых сплавах систем Al–Mg–Mn, Al–Li–Mg и Al–Zn–Cu–Mg. В [14,15] изучалось влияние коррозионной среды, а в [16] — импульсного ИК-излучения на развитие пластической неустойчивости алюминий-магниевого сплава. В последнем случае оценивали влияние пробивания лазерным импульсом сквозного отверстия в плоском образце сплава АМг6 на динамику пространственно-временных структур деформационных полос и прерывистую деформацию при растяжении образца с заданной скоростью роста приложенного напряжения  $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ . Показано, что локальное действие импульса лазерного излучения выполняет роль триггера — „спускового

крючка“ для быстрой релаксации внутренних напряжений в металле, приводящей к развитию скачка пластической деформации амплитудой несколько процентов. Настоящая работа посвящена исследованию *in situ* динамики и морфологии пластических неустойчивостей на последнем скачке деформации и их роли в развитии магистральной трещины в условиях воздействия лазерного ИК-излучения на боковую поверхность тонкого образца алюминий-магниевого сплава АМг6.

### 2. Методика

Плоские образцы промышленного алюминий-магниевого сплава АМг6 в форме двухсторонних лопаток с размером рабочей части  $6 \times 3 \times 0.5 \text{ mm}$  вырезали машинным способом из листового проката после холодной прокатки. Предварительная термообработка и методика испытания описана в предыдущей работе [16]. Образцы растягивали в условиях ползучести при напряжении, превышающем условный предел текучести сплава АМг6 при комнатной температуре  $\sigma_{0.2} \approx 155 \text{ MPa}$  в мягкой деформационной машине, описанной в [17]. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Лазерный „укол“ поверхности образца наносился с помощью волоконного иттербиевого импульсного ИК-лазера YLP-1-1-50-NC-RG с длиной волны  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$  и средней мощностью 50 W. Излучение лазера 1 собиралось линзой 2 на боковую поверхность  $6 \times 0.5 \text{ mm}$  деформируемого образца 3 в пятно с гауссовым радиусом  $r_0 \approx 70 \mu\text{m}$ . Видеосъемку фронтальной поверхности  $6 \times 3 \text{ mm}$  вели с помощью высокоскоростной видеокамеры 4 (VS-FAST/G6 НПО „Видеоскан“) со скоростью 500 frames/s. Деформационный и силовой отклики на локальное воздействие импульсного ИК-излучения регистрировали с помощью датчика положения 5, в качестве которого использовали лазерный триангуляционный датчик фирмы Riftec с чувствительностью  $1.5 \mu\text{m}$ , и с



**Рис. 1.** Схема установки для исследования *in situ* действия импульсного лазерного излучения на полосообразование и разрушение деформируемого металла: 1 — импульсный ИК-лазер, 2 — собирающая линза, 3 — плоский образец алюминиевого сплава, 4 — скоростная видеокамера, 5 — лазерный датчик положения, 6 — датчик усилия, 7 — коммутатор, 8 — АЦП, 9 — компьютер, 10 — зеркало, 11 — шток испытательной машины, 12 — блок внешнего управления лазером. На вставке — поверхность разрушения образца сплава АМг6 по зоне лазерного повреждения. Стрелкой отмечена позиция лазерного „укола“ на боковой поверхности образца.

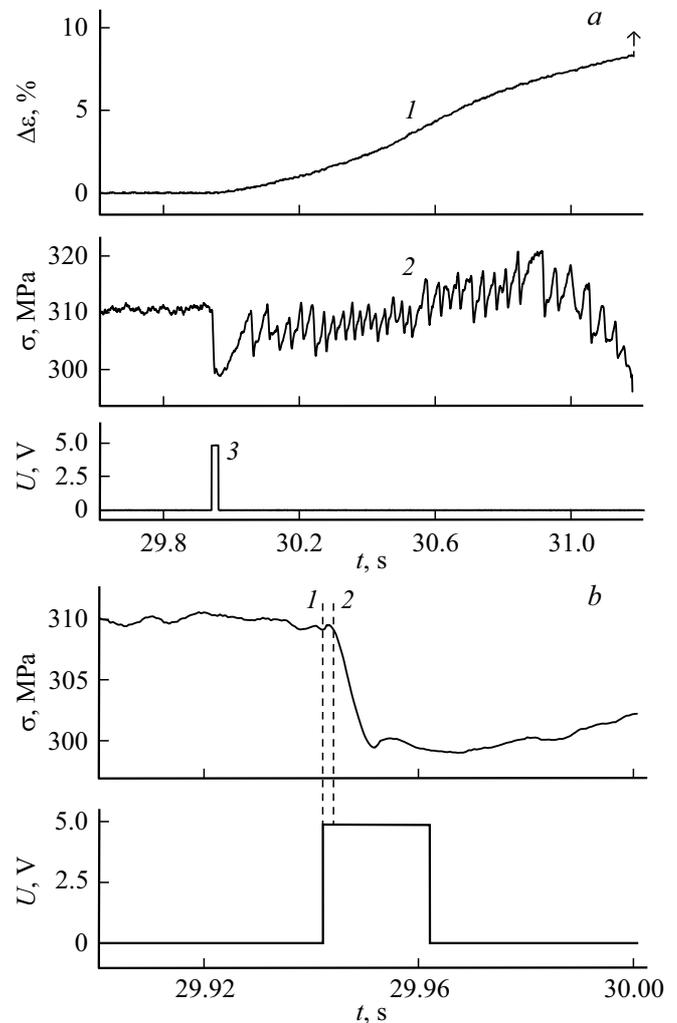
помощью датчика усилия 6 (Zemic НЗ-С3-100kg-3В) с чувствительностью  $1.5 \mu\text{V/N}$  соответственно. Сигнал видеокамеры на частоте съемки вместе с сигналами датчиков положения и усилия подавали на коммутатор 7 и далее на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 8 и компьютер. Частоту регистрации данных устанавливали равной  $2 \text{ kHz}$ , кратной частоте видеосъемки. Как и в работе [16], использовали режим свободной генерации в течение  $20 \text{ ms}$  импульсов излучения длительностью  $120 \text{ ns}$  с частотой следования  $70 \text{ kHz}$  (время генерации задавалось прямоугольным импульсом напряжения длительностью  $20 \text{ ms}$  и амплитудой  $5 \text{ V}$  в режиме внешнего управления лазером). Данный режим будем называть далее одиночным лазерным импульсом длительностью  $t_p = 20 \text{ ms}$ .

После лазерного „укола“ боковой поверхности  $6 \times 0.5 \text{ mm}$  в объеме образца образуется почти цилиндрическая область лазерного повреждения, состоящая из кратера диаметром около  $80 \mu\text{m}$  и глубиной  $500 \mu\text{m}$ , образованного в результате выноса материала (абляции)

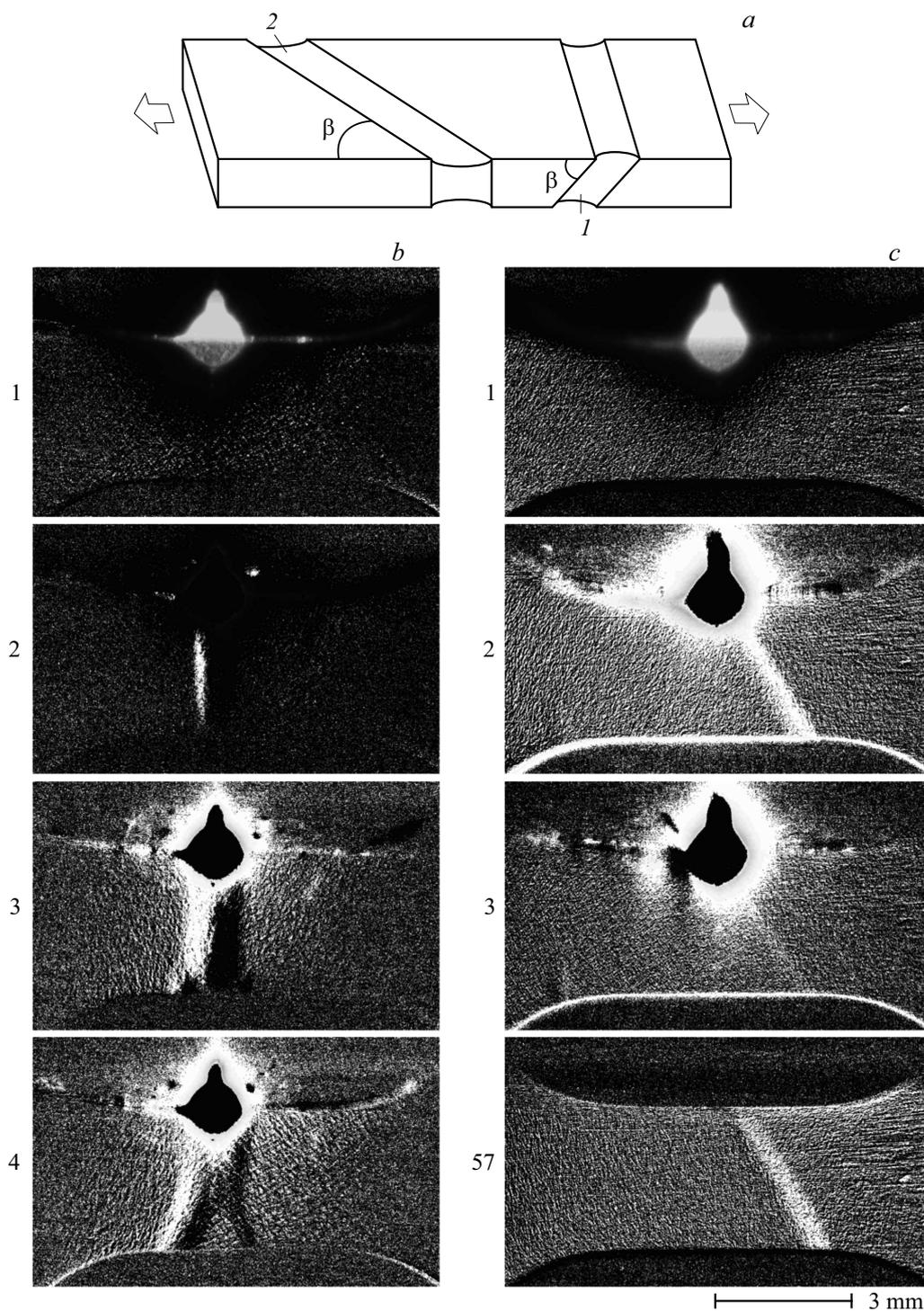
за время лазерного импульса и узкого канала затвердевшего расплава со средним диаметром около  $50 \mu\text{m}$  и глубиной  $0.8\text{--}0.9 \text{ mm}$  (см. вставку на рис. 1). Физические процессы взаимодействия лазерного излучения с поверхностью металла при относительно невысоких плотностях потока  $\sim 10^5\text{--}10^6 \text{ W/cm}^2$ , приводящие к образованию подобных зон лазерного повреждения и микроструктурных изменений в различных металлах и сплавах, хорошо известны из литературы [18–21].

### 3. Результаты и обсуждение

Образцы нагружались в две последовательные стадии: стадии нагружения с постоянной скоростью  $\dot{\sigma}_0 = 1.5 \text{ MPa/s}$  до момента времени, соответствующего приложенному напряжению  $\sigma_0$  и стадии ползучести



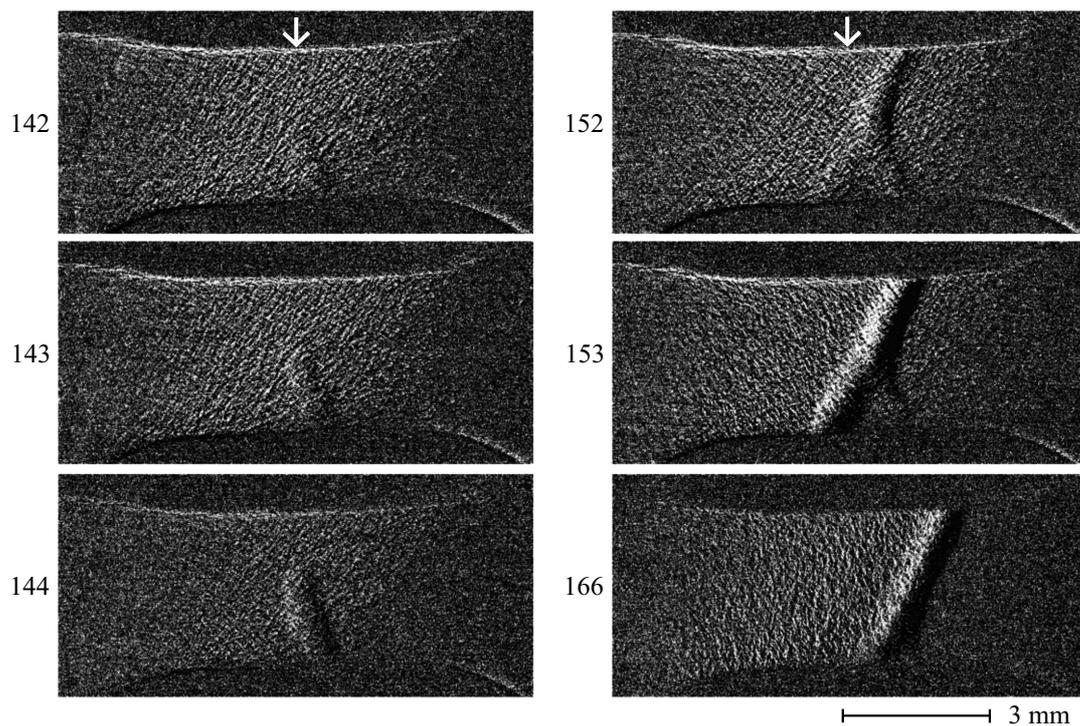
**Рис. 2.** *a* — синхронная запись скачка деформации 1  $\Delta\epsilon(t)$ , силового отклика 2  $\sigma(t)$  и прямоугольного импульса напряжения  $U(t)$  в режиме внешнего управления лазером. Стрелкой отмечен момент разрушения образца. *b* — фрагмент записи  $\sigma(t)$  и  $U(t)$  с более высоким временным разрешением; цифрами 1 и 2 отмечены моменты зажигания лазерной искры и появления первичной полосы деформации, соответственно.



**Рис. 3.** Геометрия деформационных полос, инициированных лазерным „уколом“ в первые миллисекунды взаимодействия лазерного излучения с боковой поверхностью деформируемого плоского образца: *a* — схематическое изображение полос 1-го и 2-го типа; *b* — инициирование полосы 1-го типа; *c* — инициирование полосы 2-го типа. Числа — номера кадров. Скорость видеосъемки — 500 frames/s.

при напряжении  $\sigma_0 = \text{const}$ . Для исследования деформационных процессов, предшествующих разрушению в условиях ползучести значение  $\sigma_0$  выбиралось близким к пределу прочности  $\sigma_0 \approx 0.96\sigma_B = 310 \text{ MPa}$ , где  $\sigma_B = 320 \text{ MPa}$  — предел прочности сплава АМг6 на

разрыв. Предварительные эксперименты показали, что время ожидания спонтанного (в отсутствии внешних воздействий) развития последнего скачка с разрушением образца при данном напряжении составляет около 40 s. В экспериментах с лазерным воздействием спустя время



**Рис. 4.** Динамика встречной полосы деформации относительно позиции нанесения лазерного „укола“, отмеченной стрелкой. Скорость видеосъемки 500 frames/s. Числа — номера кадров.

$\tau = 30$  s после начала стадии ползучести центральная область боковой поверхности  $6 \times 0.5$  mm деформируемого образца подвергалась воздействию лазерного импульса длительностью  $t_p = 20$  ms и средней мощности излучения  $P = 50$  W. Плотность потока излучения при этом составляла  $F_0 = P/S_0 = 3.25 \cdot 10^5$  W/cm<sup>2</sup>, где  $S_0 = \pi r_0^2 = 1.54 \cdot 10^{-4}$  cm<sup>2</sup> — площадь исходной поверхности, подвергаемой излучению. Такое воздействие импульсного лазерного „укола“ вызывает развитие гигантского деформационного скачка амплитудой около 10%, который заканчивается разрушением образца.

На рис. 2 показаны результаты синхронной записи датчиков деформации и усилия (кривые 1 и 2 соответственно) и прямоугольного импульса напряжения (кривая 3) в цепи управления лазера. Силовой отклик  $\sigma(t)$ , представленный кривой 2, состоит из характерных скачков разгрузки системы машина-образец амплитудой  $\sim 3$ –10 МПа, которые, как показывают данные скоростной видеосъемки, обусловлены зарождением, расширением и распространением полос макролокализованной деформации (см. также [22,23]).

Отметим, что при растяжении плоских образцов сплава, демонстрирующего прерывистую деформацию возникают полосы двух типов (рис. 3, a): полосы, пересекающие под углом  $\beta$  к оси растяжения узкую грань образца, а под прямым углом — широкую грань (тип 1) и полосы, пересекающие под углом  $\beta$  к оси растяжения широкую грань, а под прямым — узкую (тип 2) [24]. Эксперимент показывает, что  $\beta \approx 50$ – $60^\circ$ , что указывает

на преимущественно сдвиговую моду деформации в полосах макролокализованной деформации. По данным видеосъемки со скоростью 500 frames/s первичные полосы 1-го или 2-го типа зарождаются в зоне лазерного укола в пределах двух миллисекунд после зажигания лазерной искры над боковой поверхностью образца. Это время по порядку величины согласуется с характерным временем перемещения теплового фронта от центра лазерного укола до ребра плоского образца  $\tau_1 \sim L^2/a \approx 1.5$  ms (где  $L = w/2 = 0.25$  mm — половина толщины образца,  $a = 0.43 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s — коэффициент температуропроводности сплава АМг6 [25]), где расположен потенциальный дислокационный источник полосы. Время „простреливания“ полосы деформации через все сечение не превышает 2 ms, так что оценка снизу средней скорости вершины  $v_t$  полосы составляет не менее  $\sim 1$  m/s. Полосы 2-го типа, как правило, переходят в полосы 1-го типа. Эта тенденция показана на рис. 3, b (кадр 4).

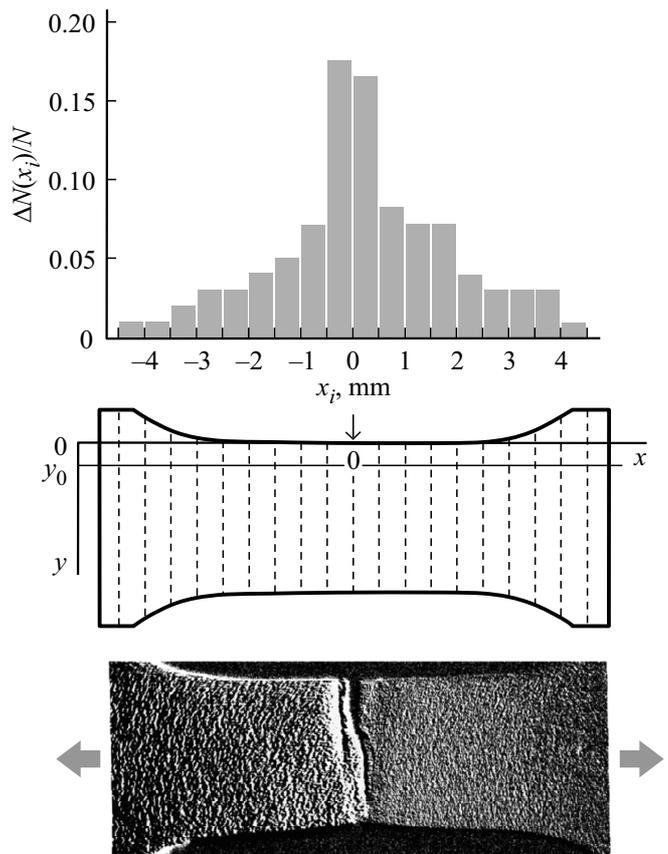
Типичный пример морфологического перехода между полосами разных типов, характерный для деформационной картины полос непосредственно после лазерного укола боковой поверхности показан на рис. 4. Зародыш полосы 1-го типа, растущий навстречу зоне лазерного повреждения от источника на противоположной боковой поверхности с начальной скоростью вершины  $\sim v_t \sim 30$  cm/s временно останавливается на расстоянии около 1 mm от позиции лазерного укола (рис. 4, кадр 144), а затем „уходит“ в сторону, превращаясь в полосу 2-го типа (кадры 152–166).

Естественным препятствием развитию полосы в этой ситуации является зона лазерного повреждения, которая простирается от боковой поверхности в объем образца на глубину 1.2–1.4 mm при плотности потока излучения  $3 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$  и длительности импульса 20 ms (см. вставку на рис. 1).

Рассмотрим теперь пространственно-статистическое распределение полос деформации в ходе развития последнего скачка деформации, спровоцированного лазерным уколом. Для этого фронтальная поверхность рабочей части образца с исходным размером  $6 \times 3 \text{ mm}$  условно разбивалась на 12 эквидистантных нормальных сечений  $x = x_i$ , так чтобы расстояние между соседними сечениями было приблизительно равно ширине полосы  $x_{i+1} - x_i = 0.5 \text{ mm}$ . С учетом возможного появления полос в области лопаток количество сечений составило  $N_c = 18$ . Затем по данным видеосъемки последнего скачка подсчитывали количество границ полос  $\Delta N(x_i)$  пересекающих  $i$ -е сечение и строили гистограмму  $\Delta N(x_i)/N$ , где  $N$  — общее количество границ полос до видимого появления магистральной трещины (рис. 5). Как видно, гистограмма имеет резкий максимум в области лазерного укола, которая таким образом является аттрактором деформационных полос в ходе развития последнего деформационного скачка, начиная с момента зажигания лазерной искры (с задержкой  $\sim 1 \text{ ms}$ ) до старта магистральной трещины через временной интервал около секунды после окончания лазерного импульса.

Такое пространственное распределение деформационных полос существенно отличается от случая воздействия импульсного лазерного излучения на фронтальную поверхность образца. В предыдущей статье авторов [16] было установлено, что при сквозном пробивании отверстия в деформируемом образце сплава АМгб таких же размеров и тех же параметрах импульса лазерного излучения, сфокусированного на фронтальную поверхность образца размерами  $6 \times 3 \text{ mm}$ , полосы деформации напротив „отталкиваются“ от зоны воздействия лазерного излучения. В результате гистограмма полос имеет нулевой участок в радиусе около 0.6 mm относительно центра лазерного укола, совпадающем с зоной структурного упрочнения, характеризуемой повышенным значением микротвердости (см. рис. 3, а и рис. 6, в [16]). Острый пик на гистограмме полос в области лазерного повреждения боковой поверхности размерами  $6 \times 0.5 \text{ mm}$  (рис. 5) играет ключевую роль в последующем развитии вязкого разрушения сплава АМгб. На рис. 6 показан фрагмент видеofilма длительностью около 120 ms, соответствующий окончанию последнего деформационного скачка, который завершается распространением магистральной трещины.

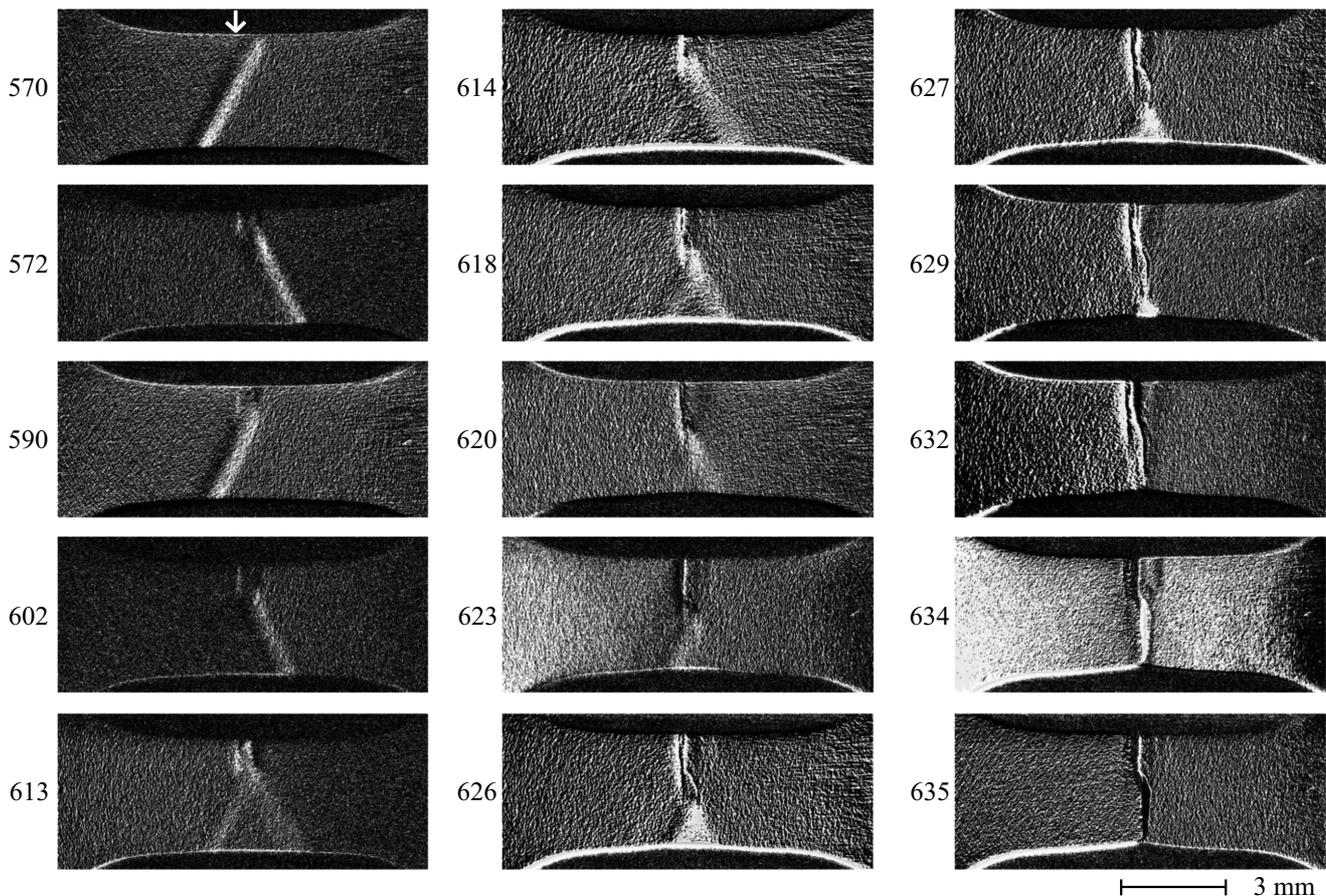
Как видно, магистральная трещина распространяется в сечении, близким к  $x_i = 0$ , генерируя своей вершиной полосы 2-го типа, что говорит о вязком характере разрушения. Как и в случае разрушения плоского образца сплава АМгб от концентратора напряжения в



**Рис. 5.** Гистограмма деформационных полос, зарегистрированных на фронтальной поверхности  $6 \times 3 \text{ mm}$  образца сплава АМгб при импульсном лазерном уколе в центр боковой поверхности  $6 \times 0.5 \text{ mm}$  в ходе развития последнего скачка деформации и схема эквидистантных сечений. Стрелкой отмечена позиция нанесения лазерного укола,  $x = 0$ . Подсчитывалось количество полос, пересекающих сечение  $x = x_i$  на расстоянии  $y_0 = 0.5 \text{ mm}$  от боковой поверхности, подвергнутой лазерному воздействию. На вставке показан момент завершения развития магистральной трещины (кадр 632 на рис. 6).

виде бокового надреза [26], магистральная трещина движется скачками, испуская после временной остановки две сопряженные макрополосы, образующие V-образную структуру с углом между полосами около  $60^\circ$  (см. кадры 613, 618, 626 на рис. 6). Магистральная трещина прорастает через зону пересечения макрополос перед ее вершиной предположительно за счет слияния микротрещин, образованным по механизмам взаимодействий дислокационных скоплений, принадлежащим сопряженным макрополосам или взаимодействий скоплений с границами зерен [27].

Характерная особенность траектории магистральной трещины в случае лазерного укола в боковую поверхность  $6 \times 0.5 \text{ mm}$  состоит в том, что на расстоянии около 1 mm от места укола магистральная трещина меняет траекторию распространения на угол около  $60^\circ$ , а затем возвращается в направлении, нормальное к оси



**Рис. 6.** Заключительный фрагмент видеозаписи фронтальной поверхности деформируемого плоского образца, демонстрирующий роль деформационных полос в развитие магистральной трещины. Стрелкой отмечена позиция нанесения лазерного укола в боковую поверхность. Скорость видеосъемки 500 frames/s.

растяжения (см. кадры 626–635 на рис. 6). Ясно, что сначала вершина трещины распространяется по зоне лазерного повреждения в объеме образца, которая выполняет роль геометрического концентратора напряжения и концентратора термоупругих напряжений, а затем временно распространяется вдоль полосы 2-го типа (кадры 618–626).

#### 4. Заключение

Действие импульса лазерного излучения, сфокусированного в пятно радиусом  $70\ \mu\text{m}$  на боковую поверхность плоского образца алюминий-магниевого сплава АМгб, деформируемого растяжением в условиях прерывистой ползучести, вызывает развитие сначала первичной полосы деформации, а затем, после окончания лазерного импульса, — сложной пространственно-временной структуры деформационных полос, взаимодействия которых приводит к разрушению образца. Из гистограммы полос, характеризующей их пространственно-статистическое распределение вдоль оси растяжения образца, следует, что наиболее вероятный дислокационный

источник деформационных полос находится на ребре образца вблизи позиции лазерного „укола“.

Из результатов работы следует, что лазерный „укол“ длительностью  $t_p = 20\ \text{ms}$  и плотностью потока излучения  $\sim 3 \cdot 10^5\ \text{W/cm}^2$  боковой поверхности образца, вызывает в условиях ползучести при  $\sigma_0 > \sigma_{0.2}$  развитие гигантского скачка пластической деформации амплитудой  $\sim 10\%$  и разрушение образца. Длительность последнего скачка деформации, около  $1.2\ \text{s}$ , значительно превышает длительность провоцирующего импульса лазерного излучения и характерного времени остывания термической зоны. Поэтому, как и в работе [16], лазерный „укол“ является лишь триггером релаксации внутренних напряжений и развития катастрофической пластической неустойчивости, завершающейся полным разрушением образца. Полученные в настоящей работе и в [16] результаты могут быть важны для оценки рисков развития катастрофических механических неустойчивостей при локальном воздействии импульсного лазерного излучения (или другого локального воздействия) вблизи концентраторов напряжения в реальных конструкциях, выполненных их металлических сплавах, которые склонны к прерывистой деформации и полосообразованию.

## Список литературы

- [1] Дж.Ф. Белл. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Наука, М. (1984). Ч. 2. 432 с.
- [2] Yilmaz. Sci. Technol. Adv. Mater. **12**, 063001 (2011).
- [3] Y. Estrin, L.P. Kubin. Continuum models for materials with microstructure / Ed. H.-B. Muhlhaus. Wiley&Sons, N.Y. (1995). P. 395.
- [4] S.H. Fu, Q.C. Zhang, Q. Hu, M. Gong, P.T. Cao, H.W. Liu. Sci. China Tech. Sci. **54**, 1389 (2011).
- [5] H. Ait-Amokhtar, C. Fressengeas. Acta Mater. **58**, 1342 (2010).
- [6] Y. Brechet, Y. Estrin. Acta Met. Mater. **43**, 955 (1995).
- [7] Y. Brechet, Y. Estrin. Key Eng. Mater. **97–98**, 235 (1994).
- [8] J. Balik, P. Lukac, L.P. Kubin. Scr. Mater. **42**, 465 (2000).
- [9] B. Tian. Mater. Sci. Eng. A **349**, 272 (2003).
- [10] W. Wen, Y. Zhao, J.G. Marris. Mater. Sci. Eng. A **392**, 136 (2005).
- [11] Y.Z. Shen, K.H. Oh, D.N. Lee. Solid State Phenomena **105**, 227 (2005).
- [12] A.A. Shibkov, A.A. Denisov, M.A. Zheltov, A.E. Zolotov, M.F. Gasanov. Mater. Sci. Eng. A **610**, 338 (2014).
- [13] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов, А.А. Денисов, М.Ф. Гасанов. Кристаллография **60**, 938 (2015).
- [14] А.А. Шибков, А.А. Денисов, А.Е. Золотов, С.С. Кочегаров. ФТТ **59**, 96 (2017).
- [15] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов, А.В. Шуклинов, А.А. Денисов, С.С. Кочегаров. Коррозия: материалы, защита **8**, 19 (2017).
- [16] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.Ф. Гасанов, М.А. Желтов, К.А. Проскуряков. ФТТ **60**, 1632 (2018).
- [17] А.А. Шибков, М.А. Лебедкин, М. А. Желтов, В.В. Скворцов, Р.Ю. Кольцов, А.В. Шуклинов. Зав. лаборатория **71**, 20 (2005).
- [18] С.И. Анисимов, Я.А. Имас, Г.С. Романов, Ю.В. Ходыко. Действие излучения большой мощности на металлы. Наука, М. (1970). 272 с.
- [19] Дж. Рэди. Действие мощного лазерного излучения. Мир, М. (1974). 469 с.
- [20] Л.И. Миркин. Физические основы обработки материалов лучами лазера. МГУ, М. (1975). 384 с.
- [21] А.Г. Ланин, И.И. Федик. Термопрочность материалов. Подольск, НИИ НПО „Луч“ (2005). 312 с.
- [22] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов, А.А. Денисов, М.Ф. Гасанов. ЖТФ **84**, 40 (2014).
- [23] A.A. Shibkov, M.F. Gasanov, M.A. Zheltov, A.E. Zolotov, V.I. Ivolgin. Int. J. Plast. **86**, 37 (2016).
- [24] А.А. Шибков, Р.Ю. Кольцов, М.А. Желтов, А.В. Шуклинов, М.А. Лебедкин. Изв. РАН. Сер. физ. **70**, 1372 (2006).
- [25] В.М. Белецкий, Г.А. Кривов. Алюминиевые сплавы. КОМИНТЕХ, Киев (2005). 365 с.
- [26] А.А. Шибков, М.А. Желтов, М.Ф. Гасанов, А.Е. Золотов. ФТТ **60**, 315 (2018).
- [27] В.И. Владимиров. Физическая природа разрушения металлов. Металлургия, М. (1984). 280 с.

Редактор Т.Н. Василевская