

05.1;06.4

## **Влияние импульсного лазерного ИК-излучения на полосообразование и прерывистую деформацию алюминий-магниевого сплава АМг6**

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

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, Тамбов  
E-mail: Shibkov@tsu.tmb.ru

Поступило в Редакцию 27 мая 2015 г.

Методом высокоскоростной видеосъемки исследовали динамику и морфологию деформационных полос и прерывистую деформацию в условиях локального воздействия импульсного волоконного ИК-лазера на поверхность деформируемого алюминий-магниевого сплава АМг6. Экспериментально выявлены условия, при которых лазерное воздействие вызывает образование полос макролокализованной деформации и деформационные скачки амплитудой несколько процентов на диаграмме растяжения. Обсуждается возможный механизм этого явления.

Известно, что прерывистая деформация металлов и сплавов сопровождается образованием и распространением полос макролокализованной деформации, которые ухудшают качество поверхности промышленных изделий и могут вызвать внезапное разрушение [1–4]. Механизмы образования деформационных полос и их влияние на механические свойства сплавов до сих пор являются дискуссионными вопросами [5,6]. В представленной работе исследуется влияние локального воздействия ИК-лазера на полосообразование и прерывистую деформацию алюминий-магниевого сплава АМг6, применяемого при производстве летательных аппаратов и автомобилей.

Поликристаллические образцы сплава АМг6 (Al–6.03 wt% Mg–0.5 wt% Mn) в форме двухсторонних лопаток с размерами рабочей части  $6 \times 3 \times 0.5$  mm вырезали из листового проката после холодной прокатки (степень обжатия 0.3). Образцы предварительно отжигали в течение часа при температуре 450°C и закаливали на воздухе. Растяжение

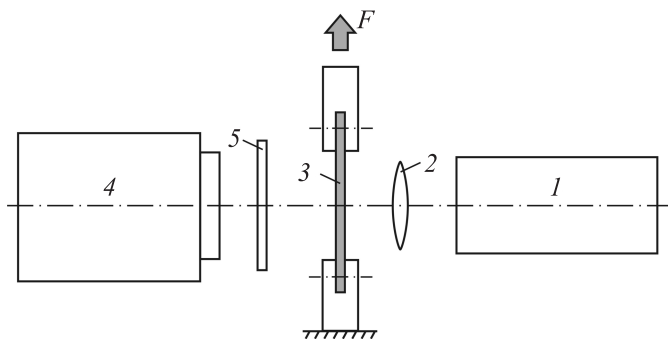


Рис. 1. Схема эксперимента.

образцов проводили с постоянной скоростью возрастания напряжения  $\dot{\sigma}_0 = 0.2 \text{ МПа/с}$  при комнатной температуре в мягкой деформационной машине, описанной в [7]. В этих условиях сплав АМгб демонстрирует ступенчатую диаграмму растяжения [3,7]. Деформацию образца измеряли с помощью триангуляционного датчика положения фирмы Riffes с точностью  $1.5 \mu\text{м}$  в полосе частот  $0\text{--}2 \text{ кГц}$ , а силовой отклик механической системы машина—образец измеряли с помощью датчика усилия Zemic НЗ-С3-100kg-3В с чувствительностью  $1.5 \mu\text{В/Н}$ . Скорость регистрации данных этих датчиков устанавливали равной  $2 \text{ кГц}$ . Измерения датчиков синхронизировали с высокоскоростной цифровой видеокамерой VS-FAST/G6 (НПК „Видеоскан“). Скорость видеосъемки поверхности составляла  $500 \text{ fps}$ . Обработка видеопленки состояла в вычитании с помощью компьютерной программы последовательных во времени кадров видеопленки [3].

Схема эксперимента показана на рис. 1. Излучение волоконного иттербиевого импульсного ИК-лазера YLP-1-100-50-50-НС-RG с длиной волны  $\lambda = 1.06 \mu\text{м}$  (1) собиралось линзой 2 с фокусным расстоянием  $80 \text{ мм}$  на поверхность деформируемого образца 3 в пятно с гауссовым радиусом  $r_0 \approx 70 \mu\text{м}$ . Видеосъемку противоположной поверхности образца вели с помощью видеокамеры 4 через защитное стекло 5. Использовали режим „свободной“ генерации в течение  $20 \text{ мс}$  импульсов излучения длительностью  $120 \text{ нс}$  с частотой модуляции  $70 \text{ кГц}$ . Данный режим в дальнейшем будем называть режимом одиночного „импульса“

длительностью  $t_p = 20$  ms. Такой режим воздействия является оптимальным для сквозного локального проплавления алюминиевого листа толщиной 0.5 mm и поэтому близок к условиям лазерной сварки. Действительно, согласно [8], величина плотности потока  $F_{cr}$ , при которой происходит переход из области, где теплопроводность является определяющим механизмом, в область, где теплопроводностью можно пренебречь по сравнению с механизмом испарения, определяется соотношением

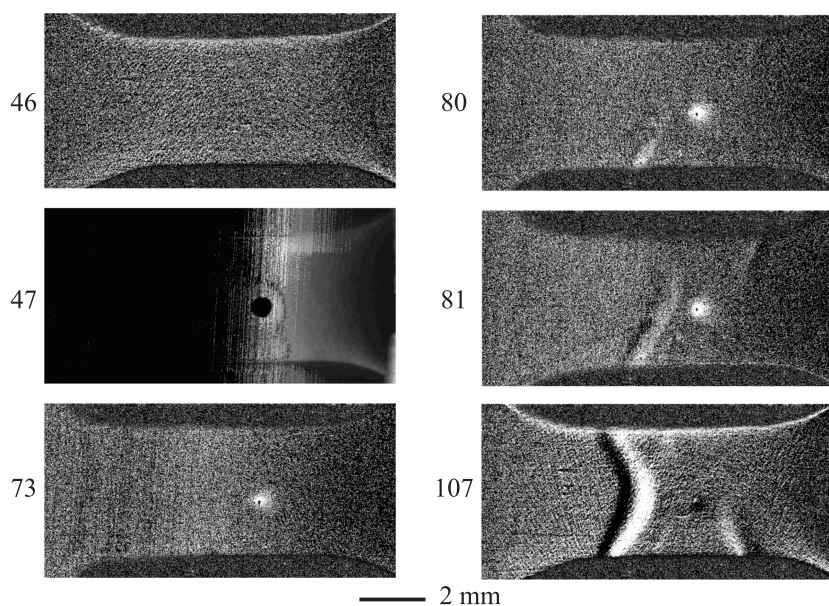
$$F_{cr} \approx 2L\rho(a/t_p)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $L$  — скрытая теплота испарения,  $\rho$  — плотность сплава,  $a$  — коэффициент температуропроводности. При  $F > F_{cr}$  контролирующим механизмом является испарение, а при  $F < F_{cr}$  — теплопроводность и плавление. Для сплава АМгб [9]:  $L = 1.07 \cdot 10^4$  kJ/kg,  $a = 0.43 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s,  $\rho = 2.64 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup> и при  $t_p = 20$  ms получим из формулы (1)  $F_{cr} = 2.6 \cdot 10^5$  W/cm<sup>2</sup>. Реальная плотность потока  $F = P/S_0 \approx 1.3 \cdot 10^5$  W/cm<sup>2</sup> при средней мощности излучения  $P = 20$  W и  $S_0 = \pi r_0^2 = 1.54 \cdot 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>, поэтому  $F < F_{cr}$  и в нашем случае доминирующим механизмом поглощения энергии лазерного импульса являются теплопроводность и плавление.

Оценим теперь характерные времена теплового воздействия лазерного излучения: время  $t_m$ , прошедшее от начала теплового импульса до момента, в который начинается плавление поверхности металла, и тепловую постоянную времени  $\tau = l^2/4a$ , т.е. время, за которое температура обратной стороны пластины толщиной  $l$  достигает величины порядка температуры на передней поверхности, где поглощается энергия. Согласно [8,10],

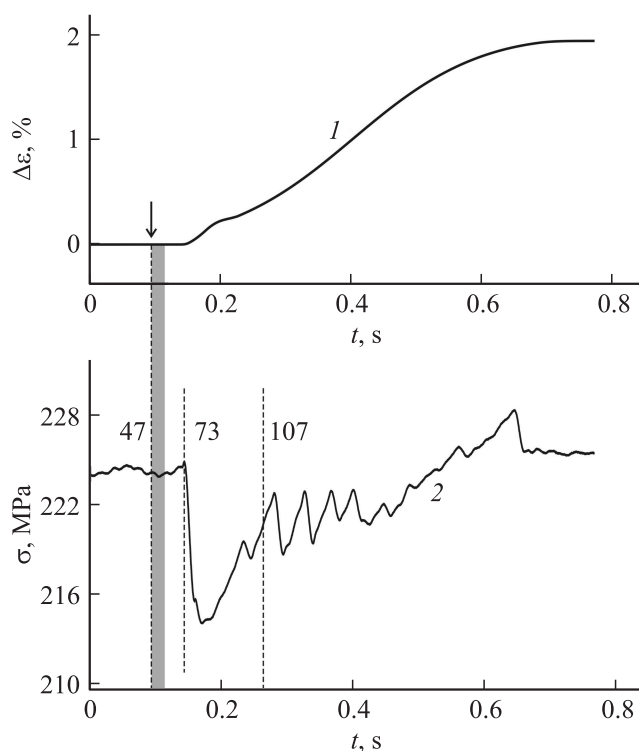
$$t_m = \frac{\pi}{4a} \left( \frac{\lambda T_m}{F} \right)^2, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — теплопроводность кристаллического алюминия,  $T_m$  — температура плавления. Принимая в нашем случае  $l = 0.5$  mm,  $\lambda = 225.25$  W/mK,  $T_m = 933.2$  K, получим  $t_m \approx 0.5$  ms и  $\tau \approx 3$  ms. Приведенные оценки величин  $t_m$  и  $\tau$  оказываются на несколько порядков меньше времени развития деформационной ступени  $\sim 0.5$  s и продолжительности плато между ступенями 30–100 s на типичной диаграмме растяжения сплава АМгб [3].



**Рис. 2.** Фрагмент видеопленки, демонстрирующий зарождение и распространение деформационных полос в результате воздействия на поверхность лазерного импульса. Числа — номера кадров. Плотность потока  $1.3 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$ .

В процессе растяжения образцов с заданной скоростью нагружения  $\dot{\sigma}_0 = 0.2 \text{ МПа/s}$  их поверхность подвергали локальному импульсному лазерному воздействию на различных стадиях ступенчатой деформации. Обнаружено, что на гладком участке диаграммы растяжения сквозное проплавление образца провоцирует зарождение и распространение полосы деформации, которая в свою очередь вызывает развитие макроскопического, амплитудой несколько процентов, скачка деформации на кривой нагружения. На рис. 2 лазерный импульс вызвал образование сквозного канала проплавления в момент времени (кадр 47), соответствующий гладкому (без скачков) участку кривой растяжения. Спустя приблизительно  $60 \text{ ms}$  после сквозного локального проплавления на расстоянии от него около  $1.8 \text{ mm}$  через сечение образца начинает распространяться полоса деформации. Как видно из рисунка,



**Рис. 3.** Временная зависимость деформации  $\Delta\varepsilon$  (1) и напряжения  $\sigma$  (2) в ходе развития скачка деформации, инициированного лазерным импульсом. Серой полосой обозначен интервал воздействия лазерного импульса длительностью  $t_p = 20$  ms. Числами 47–107 отмечены номера кадров видеофильма, представленного на рис. 2.

полоса зарождается не в окрестности зоны оплавления, а на боковой поверхности образца (кадр 80) и в ходе распространения „отражается“ от оплавленной зоны (кадры 81, 107). В ходе дальнейшего развития деформационного скачка полосы не подходят к зоне действия лазерного луча на расстояние меньше порядка диаметра зоны оплавления. Это означает, что в кольцевой области размером порядка диаметра зоны оплавления материал упрочняется.

Синхронные записи лазерного триангуляционного датчика положения (кривая 1) и датчика усилия (кривая 2), который регистрирует силовой отклик на развитие деформационного скачка, представлены на рис. 3. Стрелкой отмечен начальный момент лазерного импульсного воздействия. Типичный скачок деформации имеет сигмовидную форму, близкую к логистической кривой в модели Ферхюльста–Пирла (см. [3]), а силовой отклик состоит из последовательности скачков разгрузки амплитудой 3–10 МПа, вызванных, по данным видеосъемки, зарождением и распространением полос деформации.

Как следует из анализа данных, представленных на рис. 2 и 3, импульс лазерного излучения, воздействующий на гладкий участок диаграммы растяжения, вызывает зарождение и распространение деформационной полосы, которая является в свою очередь триггером развития деформационного скачка — ступени амплитудой  $\Delta\epsilon_m \approx 2\%$  на диаграмме растяжения (кривая 1 на рис. 3). Полоса всегда зарождается от источника на боковой поверхности поликристаллического плоского образца и первоначально распространяется в плоскости максимальных касательных напряжений. Поверхностный дислокационный источник срабатывает, видимо, в результате действия термоупругих напряжений, обусловленных достижением боковой поверхности тепловой „волны“ от очага лазерного воздействия. Действительно, за время  $t_0$  между началом лазерного воздействия на поверхность металла и срабатыванием источника деформационной полосы по данным видеосъемки составляет  $t_0 \approx 66$  ns. За это время фронт тепловой „волны“ проходит дистанцию  $l_T \approx \sqrt{at_0} \approx 1.68$  mm, сравнимую с расстоянием между тепловым „пятном“ и источником полосы около 1.8 mm (см. кадр 80 на рис. 2). Далее полоса движется под углом около  $60^\circ$  к оси растяжения по направлению к очагу воздействия и „отражается“ от области сжатия размером около 150–200  $\mu\text{m}$ . Развитие первичной полосы деформации сопровождается развитием первого скачка разгрузки амплитудой  $\Delta\sigma \sim 10$  МПа в структуре силового отклика на развитие скачка деформации на кривой растяжения (рис. 3, кривая 2). Отметим, что при плотности потока  $F \leq 10^5$  W/cm<sup>2</sup> сквозного проплавления не происходит; на внешней поверхности образуется кратер со следами оплавления, который, однако, тоже провоцирует образование полос в деформируемом образце. И наконец, при  $F \leq 10^4$  W/cm<sup>2</sup> лазерный импульс не оказывает заметного влияния на полосообразование и прерывистую деформацию сплава АМг6.

Таким образом, локальное воздействие лазерного импульса ИК-излучения длительностью 20 ms и плотностью потока  $> 10^5 \text{ W/cm}^2$ , вызывающее сквозное проплавление плоского образца, провоцирует зарождение полосы деформации и последующее развитие макроскопического, амплитудой несколько процентов скачка деформации продолжительностью около 500 ms. Следовательно, нагрев локальной области образца импульсным лазерным излучением является лишь триггером деформационного скачка, который затем развивается за счет релаксации внутренних напряжений, накопленных в материале на гладком участке кривой растяжения. Необходимы дальнейшие исследования обнаруженного в данной работе влияния локального лазерного ИК-излучения на пластическую неустойчивость алюминиевых сплавов, демонстрирующих прерывистую деформацию, для учета этого явления в технологиях лазерной сварки, прецизионной резки металла, пробивания отверстий, маркировки поверхности и т. д.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-12-00035).

## Список литературы

- [1] Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. М.: Наука, 1984. 432 с.
- [2] Yilmaz A. // Sci. Technol. Adv. Mater. 2011. V. 12. P. 063 001.
- [3] Шибков А.А., Золотов А.Е. // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. № 5. С. 412.
- [4] Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А. и др. // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 4. С. 40.
- [5] Estrin Y, Kubin L.P. // Continuum models for materials with microstructure / Ed. by Н.-В.Мuhlhaus. N. Y.: Wiley & Sons, 1995. P. 395.
- [6] Shibkov A.A., Denisov A.A., Zheltov M.A. et al. // Mater. Sci. Eng. A. 2014. V. 610. P. 338.
- [7] Шибков А.А., Лебедев М.А., Желтов М.А. и др. // Заводская лаборатория. 2005. Т. 71. № 7. С. 20.
- [8] Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир, 1974. 469 с.
- [9] Беляев А.И., Бочвар О.С., Буйнов Н.Н. и др. Металловедение алюминия и его сплавов: Справ. изд. М.: Металлургия, 1983. 279 с.
- [10] Менушенков А.П., Неволин В.Н., Петровский В.Н. Физические основы лазерной технологии. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. 212 с.