

СТАТЬИ

Д.В. Михлик

Исследование динамики деформационных полос и прогнозирование вязкого разрушения сплавов системы Al-Mg

Study of the dynamics of deformation bands and prediction of ductile fracture of alloys Al-Mg

Аннотация, abstract:

В последнее время значительно возрос интерес к изучению природы вязкого разрушения материалов, связанной с динамикой деформационных полос, сплавов системы Al-Mg, широко используемых при производстве авиационной техники. Полосы деформации негативно влияют на качество поверхности промышленных изделий и вызывают преждевременное разрушение. В связи с этим, в работе будут исследованы механизмы зарождения деформационных полос, а также роль динамики полос деформации в процессе образования магистральной трещины и дальнейшего разрушения сплава АМгб.

Recently, the interest to study the nature of ductile fracture of materials related to the dynamics of deformation bands of alloys of Al-Mg, are widely used in the manufacture of aircraft. Deformation bands have a negative impact on the surface quality of industrial products and cause premature failure. In this regard, the work will investigate the mechanisms of nucleation of deformation bands, as well as the role of the dynamics of deformation bands in the formation of the main crack and the further destruction of the alloy АМгб.

Автор, author:

Михлик Дмитрий Валерьевич – Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теоретической и экспериментальной физики, dim_tmb@mail.ru

Mikhlik D.V. – Tambov State University, Tambov, Russian Federation, Ph.D., senior lecturer in theoretical and experimental physics, dim_tmb@mail.ru

Ключевые слова, keywords: вязкое разрушение, нелинейная динамика, полосы деформации, магистральная трещина, дислокации, алюминий-магниевый сплав

ductile fracture, nonlinear dynamics, deformation bands, the main crack, the dislocation, the aluminum-magnesium alloy

УДК: 538.951

Введение

Алюминий-магниевые сплавы обладающие сочетанием высокой прочности, свариваемости, коррозионной стойкости и низкой плотности, нашли применение в производстве авиационной техники, судостроении, автомобильном и химическом машиностроении.

Однако эти сплавы демонстрируют неустойчивую деформацию, связанную с локализацией пластического течения в статических и распространяющихся полосах деформации [1-4], которые, с одной стороны, ухудшают качество поверхности промышленных изделий, а с другой - снижают пластичность сплавов Al-Mg [5, 6]. В зависимости от решаемых задач, в промышленности используют сплавы Al-Mg с преципитатной микроструктурой и рекристаллизованной зеренной структурой, первые – более прочные, вторые – более пластичные.

Прерывистую деформацию различают на эффект Портевена-Ле Шателье (ПЛШ), который выражается в появлении скачков разгрузки на кривых деформирования с постоянной скоростью $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$ в «жесткой» испытательной машине и эффект Савара-Массона - появление ступеней деформации на кривых нагружения с постоянной скоростью роста напряжения $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ в «мягкой» деформационной машине [9]. При «жестком» режиме растяжения разрушение происходит по одной из статических полос деформации ПЛШ, которые накапливаются в ходе деформирования в центральной части образца. В условиях проявления эффекта Савара-Массона статических полос не наблюдается, с течением времени полосы делокализуются, так как представляют собой расширяющиеся шейки и механизм разрушения в этом случае должен существенно отличаться от механизма разрушения сплава, проявляющего эффект ПЛШ.

Цель работы – на основе данных высокоскоростной видеосъемки поверхности деформируемого в мягком режиме сплава AlMg6 изучить роль динамики полос деформации в процессе вязкого разрушения кристалла.

1. Роль динамики полос деформации в процессе вязкого разрушения рекристаллизованного сплава AlMg6.

Рекристаллизованный сплав AlMg6, полу-

ченный отжигом выше точки ограниченной растворимости (около 275 °С) [7, 8] деформировали на одноосное растяжение в мягкой деформационной машине подробно рассмотренной в [9]. Полосы деформации на каждом скачке регистрировали при помощи скоростной видеокамеры VS FAST/G6, скорость записи 500 кадр/с. Для выявления подвижных объектов: полос и трещин, использовали методику программного последовательного вычитания кадров видеofilма.

Анализ данных скоростной видеосъемки показывает, что развитие последнего скачка деформации начинается с зарождения от ребра кристалла первичной полосы деформации, обычно в средней части образца. Скорость вершины полосы составляет 1–1.5 м/с, а максимальная скорость бокового роста – около 10 см/с. Через 10-20 мс после момента зарождения скорость расширения полосы начинает падать и через 100 мс она составляет не более 1 мм/с. Затем каждая граница расширяющейся полосы в разные моменты времени генерирует вторичные полосы, которые расширяются подобным образом, порождая новые полосы и т.д. В результате эволюция неустойчивой деформации описывается бифуркационным «деревом» (Рис. 1).

После обработки деформационными полосами всей рабочей части образца, возникает одиночная полоса, которая расширяется на весь образец. Далее наступает этап образования шейки: поступательное распространение полосы сменяется на осциллирующее движение, когда полоса «раскачивается» в угловом секторе от 55-60° до 110-120° относительно оси растяжения при неподвижном «центре тяжести» полосы (Рис. 2). Ширина полосы в ходе осцилляции остается приблизительно постоянной около 1 ÷ 1.5 мм (что составляет 30 - 50 % ширины образца), соизмеримой с толщиной образца (d=1.2 мм). Характерный период колебаний полосы составляет ~ 10 мс; обычно наблюдается 4 - 6 осцилляций до нача-

ла развития магистральной трещины (кадры 16-114 видеофильма).

Анализ бифуркационного «дерева», соответствующего последнему скачку деформации, позволяет определить позицию зарождения магистральной трещины. Из рис. 1 видно, что позиция магистральной трещины

совпадает с местом деформируемой части образца, наиболее интенсивно обработанном полосами деформации – максимум гистограммы количества деформационных полос $N(x)$. Таким образом, та часть поверхности сплава, через которую прошло большее количество деформационных полос, наиболее подвержена разрушению.

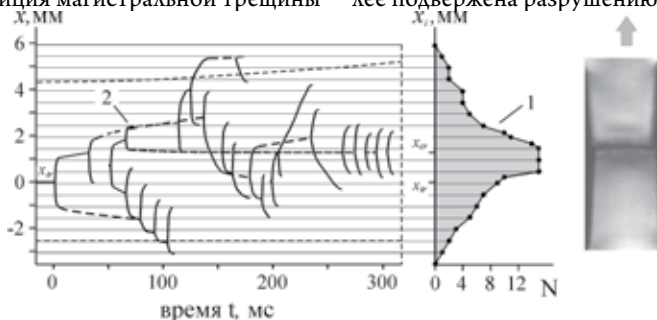


Рисунок 1. Пространственное статистическое распределение полос на последнем скачке деформации сплава АМгб с рекристаллизованной зеренной структурой. 1 – гистограмма количества полос $N(x)$, 2 – корреляционная диаграмма $x(t)$. $T_{an} = 450$ °С. $\dot{\sigma}_0 = 0.2$ МПа/с.

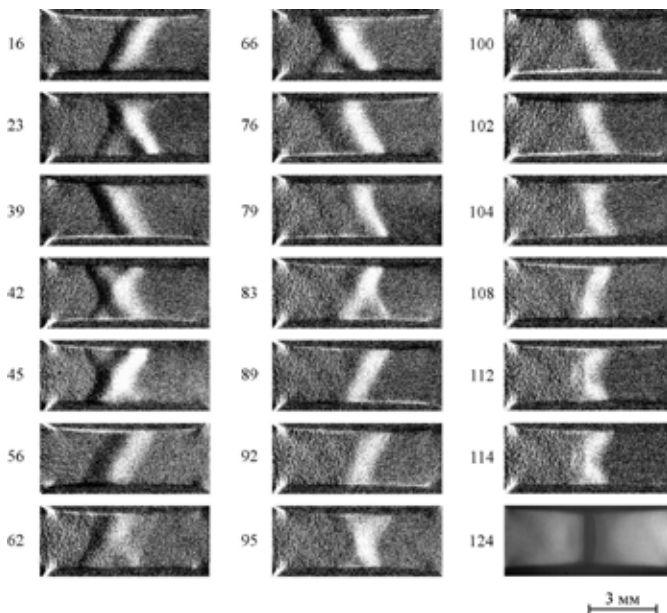


Рисунок 2. Осцилляции угла полосы деформации и образование шейки перед разрывом сплава АМгб. Скорость видеосъемки 500 кадр/с

2. Динамика полос деформации и прогнозирование разрушения сплава АМгб с преципитатной микроструктурой.

Сплав АМгб с преципитатной микроструктурой [7, 8], полученной искусственным старением при температуре 240-270 °С (ниже точки ограниченной растворимости второй фазы), деформировали на одноосное растяжение с постоянной скоростью роста приложенного напряжения 0.2 МПа/с в мягкой деформационной машине.

Анализ видеоматериала показывает, что развитие последнего скачка деформации начинается с зарождения от ребра кристалла и распространения первичной полосы локализованного сдвига, скорость вершины полосы ~ 1 м/с. Несмотря на сложную динамику деформационных полос в ходе развития последнего скачка деформации, магистральная трещина распространяется в той же плоскости, в которой распространялась первичная полоса локализованного сдвига (Рис. 3). Анализ динамики деформационных полос, представленной в виде бифуркационного «дерева» (Рис. 4), показывает, что позиция зарождения магистральной трещины не совпадает с той частью поверхностью кристалла, через которую прошло наибольшее количество полос; позиция магистральной трещины с точностью до 10 мкм совпадает с позицией зарождения первичной полосы. Следовательно, место разрушения сплава АМгб с преципитатной микроструктурой можно спрогнозировать с момента зарождения первичной полосы деформации, т.е. с начала момента потери устойчивости.

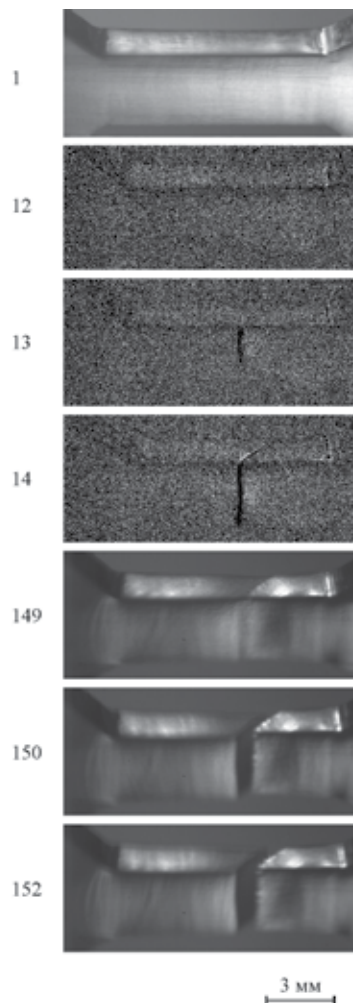


Рисунок 3. Пространственная корреляция первичной полосы - триггера развития последнего скачка деформации и магистральной трещины в сплаве АМгб с преципитатной микроструктурой. Цифрами отмечены номера кадров. Исходный вид образца представлен на кадре 1, зарождение и распространение первичной полосы – на кадрах 13 и 14 (результаты компьютерной обработки), разрушение – на кадрах 149-152.

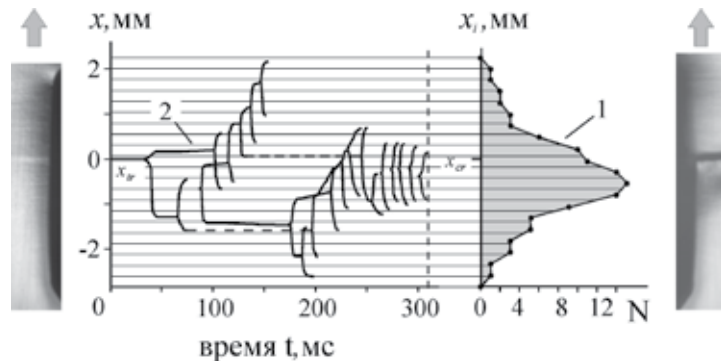


Рисунок 4. Пространственное статистическое распределение полос деформации на последнем скачке деформации сплава АМг6 с преципитатной микроструктурой: 1 – гистограмма полос $N(x)$, 2 – корреляционная диаграмма $x(t)$. На вставках показаны позиции первичной полосы и трещины. $T_{an} = 270$ °С. Скорость нагружения 0.2 МПа/с.

Литература

1. Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч.2. М.: Наука. 1984. 432 с.
2. Криштал М.М. Взаимосвязь неустойчивости и неоднородности пластической деформации. Диссертация доктора физ.-мат. наук: 01.04.07. Тольятти. Тольяттинский государственный университет. 2002. 331 с.
3. Лебедин М.А. Самоорганизация и коллективные эффекты при неустойчивой пластической деформации кристаллов. Диссертация доктора физ.-мат. наук: 01.04.07. Черногловка. ИФТТ РАН. 2002. 197 с.
4. Estrin Y, Kubin L.P. Spatial coupling and propagative plastic instabilities / Continuum models for materials with microstructure. Edited by H.-B. Mühlhaus. New-York: Wiley & Sons. 1995. P. 395-450.
5. Halim H., Wilkinson D.S., Niewczas M. The Portevin-Le Chatelier (PLC) effect and shear band formation in an AA5754 alloy // Acta Mater. 2007. V. 55. P. 4151-4160
6. Spencer K., Corbin S.F., Lloyd D.J. The influence of iron content of the plain strain fracture behavior of AA5754 Al-Mg sheet alloys // Mater. Sci. Eng. 2002. V. A 325. N 1-2. P. 394-404.
7. 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. № 5. С. 24-32.
8. Шибков А.А., Мазилкин А.А., Протасова С.Г., Михлик Д.В., Золотов А.Е., Желтов М.А., Шуклинов А.В. Влияние выделений вторичной фазы на скачкообразную деформацию алюминий-магниевого сплава АМг6 // Деформация и разрушение материалов. 2008. № 6. С. 12-17.
9. Шибков А.А., Лебедин М.А., Желтов М.А. и др. Комплекс in situ методов исследования скачкообразной пластической деформации металлов // Заводская лаборатория. 2005. Т. 71. № 7. С. 20-27.