

ПРИНЦИП ЛЕ ШАТЕЛЬЕ И ОТКОЛЬНАЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ

А.Ф. Беликова, С.Н. Буравова*, Н.И. Мухина, Е.В. Петров

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук, Черноголовка, Россия
*svburavova@yandex.ru

Принцип Ле Шателье подразумевает, что равновесная система, на которую оказывается внешнее воздействие, изменяющее равновесие, смещает равновесие таким образом, чтобы уменьшить влияние этого воздействия. В квазистатических условиях изучается так называемый эффект Поретевена–Ле Шателье. Интерес к проблеме вызван особенностью некоторых металлов проявлять прерывистый характер деформации, обусловленный повторными образованиями полос макролокализованной деформации [1]. Многие авиационные алюминиевые сплавы склоны к локализации деформации, как в условиях металлообработки, так и в процессе эксплуатации. Полосы локализованной деформации (ПЛД) создают технологический брак и являются предвестниками разрушения. Эффект Поретевена–Ле Шателье возникает при стандартных испытаниях свойств металлов при деформировании с постоянной скоростью в жесткой испытательной машине: на кривой деформирования появляются скачки разгрузки. Авторы [2] используют физические процессы для борьбы с образованием полос локализации. Известно, что при пластической деформации и разрушении твердых тел имеет место генерация акустических частот и электромагнитная эмиссия (ЭМС). Дискретные сигналы (ЭМС), например, в диапазоне 10^3 – 10^6 Гц отражают структурную релаксацию (проявление принципа Ле Шателье), связанную с заряженными дислокациями, границами различных фаз и заряженными берегами трещин. С помощью пропускания тока, лазерного облучения, внешнего магнитного и электрического тока удастся подавить возникновение ПЛД. Как отмечено в [1], несмотря на то, что исследования эффекта Поретевена–Ле Шателье проводится много лет, остались нерешенными и фундаментальные, и прикладные вопросы. Механизмы зарождения и развития полос локализованной деформации *не известны*. Роль ПЛД и явлений самоорганизации неустойчивости пластической деформации в развитии катастрофического разрушения не изучена. Следует заметить, что возникновение повторных скачков разгрузки на кривой деформирования (эффект Поретевена–Ле Шателье) является сложным силовым откликом на деформирование с постоянной

скоростью. В условиях же эксплуатации, как правило, задается силовой закон нагружения, а неустойчивость деформации в этом случае мало изучена [1].

В данной работе исследуется динамическая локализация деформации и процессы, сопровождающие образование полос локализованной деформации, когда задается непосредственно силовой закон в виде ударного импульса сжатия.

Зарождение и развитие полос локализованной деформации при импульсном нагружении.

Многочисленные исследования микроструктуры ПЛД не позволили установить причины зарождения и развития полос, это связано с тем, что структурные исследования проводятся на сохраненных образцах после динамического нагружения, и эволюция микроструктуры конструируется из анализа постдеформированных образцов без учета особенностей процесса деформирования. При таком подходе структура может описывать только изменения, которые произошли с материалом в результате взрывного воздействия, но причина изменения микроструктуры остается неизвестной. Недавно, Майерс в статье [3] подтвердил, такая ситуация будет сохраняться до тех пор, пока не будет создано оборудование, позволяющее изучать изменение структуры в процессе деформирования. Традиционно считается, что полосы адиабатического сдвига (синоним ПЛД) являются результатом теплового разупрочнения металла, которое возникает в результате перехода работы пластической деформации в тепло. Откольная природа локализации пластической деформации обоснована многочисленными взрывными экспериментами по переходу откольных трещин (плоские, угловые, канальные, иглоподобные, радиальные, цилиндрические) в ПЛД [4–7]. Откол – это динамическое разрушение материала, возникающее в местах встречи волн разгрузки. Полосы, по существу, являются незавершенными откольными трещинами, поскольку возникают в зонах интерференции волн разгрузки, где напряжение растяжения не превышает динамической прочности материала, и сплошность материала сохраняется. Причина локализации пластической деформации – *высокоскоростное растяжение*, а не тепловое разупрочнение.

Процесс самозалечивания откольной повреждаемости, как проявление принципа Ле Шателье

Взрывное нагружение образцов в форме толстостенного полого или сплошного цилиндра диаметром 20 мм с внутренним отверстием 6мм осуществлялось ударом тонкой алюминиевой пластины толщиной 2 мм и диаметром 60 мм, разогнанной накладным зарядом аммонита 6ЖВ или гексогеном насыпной плотности. Давление

ударной волны, при этом составляло 7–15 ГПа. Интерференция боковых волн разгрузки формировала откольную поврежденность цилиндрической формы. Изучение поведения частиц легирующей фазы вблизи полос откольной повреждаемости (трещины и полосы) проводилось на дисперсионно-упрочненном алюминиевом сплаве. Частицы, содержащие магний, марганец и медь, располагались в образце в виде колоний, сформированных в процессе технологической прокатки. Расстояние между колониями интерметаллидов менялось от 15 до 40 μm . Индивидуальный размер частиц упрочняющей фазы составлял 0.5–2 μm , однако, многие частицы комковались, образуя конгломераты из множества мелких частиц, размером 5–10 μm .

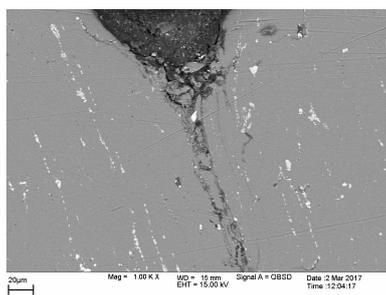


Рис. 1. Общий вид трансформации откольной трещины в полосу локализованной деформации.

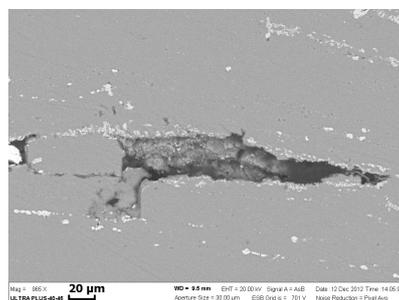


Рис. 2. Сегрегация легирующих частиц в области откольной повреждаемости.

Вблизи области перехода откольной трещины в ПЛД (рис. 1) растягивающие напряжения максимальны, при сохранении сплошности материала. В сильно деформированном материале наблюдается масса микропор, зеренную структуру рассмотреть не удастся. По мере затухания фронта ударной волны, растягивающие напряжения в зоне интерференции падают, ширина полосы уменьшается, и микроструктура сменяется на фрагментированную. В полосе наблюдается масса осколков разного размера. Рисунок 2 демонстрирует скопление частиц упрочняющей фазы вблизи полосы локализованной деформации. Сегрегация частиц на полосах откольной повреждаемости является характерной особенностью процесса локализации деформации в упрочнено-дисперсионных сплавах алюминия. Скопление частиц в ПЛД

свидетельствует о миграции частиц из матричного материала к местам откольной повреждаемости. Толщина слоя, из которого поступают ультратонкие частички к области растущего разрушения, составляет 10–20 μm для полос, пересекающих колонии упрочняющей фазы. Прохождение полос деформации вдоль колоний приводит к миграции частиц с более близкого расстояния до 10 мкм. При высокоскоростном растяжении нарушается исходная равновесная система: меняется давление, температура, фазовый состав, концентрация легирующих частиц. Изменение характеристик материала усиливает процессы сопротивления материала разрушению, материал стремится залечить растущее разрушение. При динамических нагрузках ответная реакция материала на внешнее воздействие, согласно принципа Ле Шателье, проявляется в виде эффекта самозалечивания, который направлен на компенсацию происходящих изменений в материале. Процесс самозалечивание откольной повреждаемости обнаружен впервые и в литературе не описан.

Реверберация волн, сопровождающих образование полос локализованной деформации.

Рассмотрение волновой картины образования ПЛД (упрощенная $(y-t)$ диаграмма путь–время) позволяет установить особенности, сопровождающие процесс локализации. В каждом сечении образца после прохождения фронта ударной волны, практически одновременно возникают боковые центрированные волны разгрузки, приводя в движение грани образца. Расчет показал, что амплитуда ударной волны на боковых гранях оказалась равной 25% начальной. В центральной области образца, где формируется полоса в зонах интерференции волн разгрузки и догрузки, происходит периодическая смена растяжений (до отрицательных напряжений) и сжатий (до той же положительной величины). Примыкающий к зоне интерференции матричный материал «дышит», испытывая периодически сжатие и разгрузку до нулевого давления. На диаграмме (рис. 3) показаны головные и хвостовые характеристики боковых волн разгрузки I и J, которые перемещаются по ударно-сжатому материалу. Каждая из волн достигает противоположной грани, взаимодействует со своей отраженной волной, что приводит к смене направления массовой скорости граней образца, и возвращается на исходную позицию в виде волны догрузки. Период колебания волны состоит из времени пересечения всего сечения образца и времени возвращения в исходное состояние $T = 2d/c_0$. Волновые процессы в образцах, в которых волны разгрузки взаимодействуют между собой и с поверхностями образца, сопровождаются

осциллирующей напряжения (скорости, смещения) с частотой $\nu = c_0/2d$. Суперпозиция волн I и J приводит к образованию стоячей волны [8] с длиной, равной $\lambda = 2d$. Массовый поток на оси (в зоне формирования ПЛД), в силу симметрии, равен нулю при любом времени, поэтому ось является узлом стоячей волны. Боковая грань, где всегда напряжение равно нулю, становится пучностью стоячей волны. В каждом участке сечения образца, длиной $\lambda/4=d/2$, заключенном между узлом и пучностью стоячей волны, запасенная энергия не обменивается с соседним участком, ее энергия сохраняется и не передается от точки к точке. Это свойство стоячей волны. По существу, стоячая волна не является волной, поскольку стоит на месте, осуществляя колебательное движение среды.

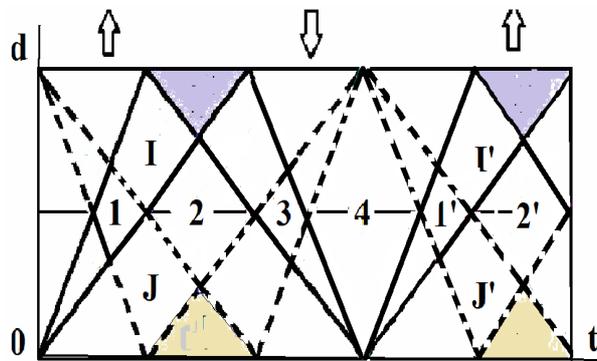


Рис. 3. Диаграмма $y-t$ (путь- время): I и J – симметричные волны разгрузки; 1, 1' – зоны интерференции встречных волн разгрузки I и J, где напряжение меняет знак от $+\sigma_0$ до $-\sigma_0$; 2 и 2' – области отрицательного напряжения $-\sigma_0$; 3 – зона интерференции отраженных волн (волны догрузки), где напряжение меняет знак от $-\sigma_0$ до $+\sigma_0$; 4 – область положительного напряжения $+\sigma_0$.

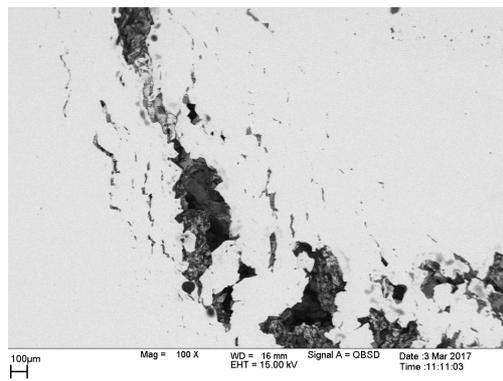


Рис. 4. Микроструктура продольной полосы локализованной деформации с сопровождающими вторичными ПЛД.

В силу особенностей поведения стоячих волн, реверберация в образце продолжается и после того, как ударная волна затухнет. Оценить коэффициент затухания α можно,

используя геометрическую интерпретацию законов сохранения, согласно которой количество энергии, переходящей в тепло, равно площади поверхности, заключенной между адиабатой Гюгонио и прямой Михельсона. Оценка коэффициента α показала, что длительность импульсного деформирования образца в стоячих волнах на несколько порядков превышает время действия начального импульса. Рис. 4 демонстрирует ПЛД, которую сопровождают дополнительные вторичные тонкие полосами. В условиях реверберации возникают дополнительные стоячие волны с длинами, отличными от основного собственного колебания ($\lambda = 2d$), но связанные с толщиной образца условием, $d/2 = n\lambda/4$, где n - целое нечетное число [8].

Заключение

Процесс динамической локализации пластической деформации сопровождается эффектом самозалечивания, который характеризуется миграцией дисперсных частиц легирующей фазы к местам откольной повреждаемости. Реверберация волн увеличивает время импульсного деформирования образца на несколько порядков по сравнению с длительностью исходного импульса, что является мощным инструментом, поддерживающим процесс самозалечивания. Особенности принципа Ле Шателье в условиях импульсного нагружения, проявляющиеся в массопереносе «строительного» материала в зону формирующегося разрушения, и в возникновении колебаний среды в ультразвуковом диапазоне частот, сопутствующим образованию полос локализованной деформации, в литературе не описаны.

Литература

1. А.А. Шибков. *Вестник Тамбовского университета*, 2016, т.21, № 3, стр. 742–745.
2. А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов. *Вестник Тамбовского университета*, 2016, т. 21, № 3, стр. 1432–1435.
3. М.А. Meyers, Y.B. Xu, Q.Xue, M.T. Perez-Prado, T.R. McNelley. *Acta Materialia*, 2003, vol. 51, pp. 1207–1325
4. А.Ф. Беликова, С.Н. Буравова, Е.В. Петров. *ЖТФ*, 2013, т.83, № 8, стр. 68–75.
5. А.Ф. Беликова, С.Н. Буравова, Ю.А. Гордополов. *ЖТФ*, 2013, т.83, № 2, стр. 153–155.
6. С.Н. Буравова. Этюды на тему локализации динамической деформации. Saarbrücken, Germany: Palmarium Academic Publishing. 2014, ISBN 978-3-639-85284-4, 138 стр.
7. С.Н. Буравова, Е.В. Петров, А. С. Щукин. *ФГВ*, 2016, т.52, № 5, стр. 1–10.
8. Г.С. Горелик. Колебания и волны. Москва, «Гос. изд. ф.-м. литературы», 1959 г.