

Формирование полос макролокализованной деформации вблизи концентраторов напряжения в алюминий-магниевом сплаве

Шибков А. А. , Федоров В. А. , Золотов А. Е. , Кочегаров С. С. , Шибков Е. А. , Желтова В. М. 
Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина,
Россия, 443100, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33
shibkovaleks@mail.ru

Аннотация. Спонтанная автолокализация деформации в деформируемых металлах и сплавах представляет негативное явление, которое ухудшает их эксплуатационные физико-химические, прочностные, антикоррозионные свойства и может вызвать внезапное разрушение. Особенно эта проблема важна для высокотехнологичных алюминиевых сплавов, в которых наблюдаются полосы локализованной деформации Чернова – Людерса и полосы Портевена – Ле Шателье. В работе методом высокоскоростной видеосъемки и компьютерной обработки цифровых изображений исследуется динамика и морфология деформационных полос, инициированных концентраторами напряжения различной природы в алюминий-магниевом сплаве, деформируемом в условиях одноосного растяжения. Установлено, что даже коррозионные пятна, мелкие царапины и отпечатки индентора способны инициировать зарождение и распространение в объеме материала полос макролокализованной деформации, взаимодействие которых вызывает развитие магистральной трещины.

Ключевые слова: эффект Портевена – Ле Шателье, концентратор напряжения, полоса деформации

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-01119) на оборудовании Центра коллективного пользования ТГУ им. Г. Р. Державина.

Для цитирования: Шибков А. А., Федоров В. А., Золотов А. Е., Кочегаров С. С., Шибков Е. А., Желтова В. М. 2024. Формирование полос макролокализованной деформации вблизи концентраторов напряжения в алюминий-магниевом сплаве. *Прикладная математика & Физика*, 56(2): 163–170. DOI 10.52575/2687-0959-2024-56-2-163-170

Original Research

Formation of Macrolocalized Deformation Bands Near Stress Concentrators in an Aluminum-Magnesium Alloy

Alexander A. Shibkov , Victor A. Fedorov , Alexander E. Zolotov ,
Sergey S. Kochegarov , Eugene A. Shibkov , Valeria M. Zheltova 
Derzhavin Tambov State University,
33 Internatsional'naya St., Tambov, 443100, Russia
shibkovaleks@mail.ru

Abstract. Spontaneous self-localization of deformation in deformable metals and alloys is a negative phenomenon that worsens their operational physicochemical, strength, and anti-corrosion properties and can cause sudden destruction. This problem is especially important for high-tech aluminum alloys, in which localized Chernov–Luders deformation bands and Portevin – Le Chatelier bands are observed. In this work, using high-speed video recording and computer processing of digital images, we study the dynamics and morphology of deformation bands initiated by stress concentrators of various natures in an aluminum-magnesium alloy deformed under uniaxial tension conditions. It has been established that even corrosion pits, small scratches and indenter imprints are capable of initiating the nucleation and propagation of macrolocalized deformation bands into the material volume, the interaction of which causes the development of a main crack.

Keywords: Methane Portevin – Le Chatelier Effect, Stress Concentrator, Deformation Band

Acknowledgements: The work is supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-79-01119) with the use of equipment of the Center of Collective Use of Tambov State University.

For citation: Shibkov A. A., Fedorov V. A., Zolotov A. E., Kochegarov S. S., Shibkov E. A., Zheltova V. M. 2024. Formation of Macrolocalized Deformation Bands Near Stress Concentrators in an Aluminum-Magnesium Alloy. *Applied Mathematics & Physics*, 56(2): 163–170. (in Russian) DOI 10.52575/2687-0959-2024-56-2-163-170

1. Введение. Пластическая деформация кристаллических материалов протекает неоднородно и неравномерно на различных масштабных уровнях от атомного до макроуровня. Классификация полос макролокализованной деформации включает полосы Чернова – Людерса, полосы Портевена – Ле Шателье (ПЛШ), вызывающие прерывистую (скачкообразную) деформацию металлов и макрополосы в структуре шейки перед разрывом образца [1, 2]. Многие промышленные алюминиевые сплавы, используемые в автопроме, авиакосмической отрасли и химическом машиностроении, проявляют эффект ПЛШ в определенном температурно-скоростном диапазоне. Конструкции и изделия из таких сплавов рассчитывают на основе теории упругости, вместе с тем в условиях эксплуатации они подвергаются различного рода внешним импульсным воздействиям (ударам, столкновениям с частицами вулканического облака и т. д.), способным инициировать зарождение полос макролокализованной деформации. Их выявление и мониторинг представляет трудную проблему, учитывая, что это объемные повреждения, пронизывающие все сечение обшивки аппарата толщиной несколько миллиметров, оставляя след на поверхности в виде шейки глубиной порядка десятка микрон. Полосы макролокализованной деформации ухудшают антикоррозионные свойства алюминиевых сплавов и могут вызвать внезапное развитие магистральной трещины, которая всегда распространяется по деформационной полосе. В настоящей работе экспериментально исследуется роль концентраторов напряжения в зарождении и росте деформационных полос Портевена – Ле Шателье.

2. Материал и методика. Материалом исследования служил промышленный алюминий-магниевого сплава АМг6 (Al-6.15%Mg-0.65%Mn-0.25%Si-0.2%Fe-0.1%Cu, wt.%). Образцы в форме двухсторонних лопаток с размером рабочей части $6 \times 3 \times 0.5$ мм вырезали из холоднокатаного листа, отжигали в течение 1 часа при температуре 450°C и закаливали на воздухе. Средний размер зерна после термообработки составлял около 10 мкм. Образцы растягивали со скоростью $\dot{\epsilon}_0 = 3 \times 10^{-3} \text{c}^{-1}$ в испытательной машине Instron 3344 при комнатной температуре и со скоростью приложенного напряжения $\dot{\sigma}_0 = 0.2 \text{МПа/с}$ в «мягкой» деформационной машине, описанной в [3]. В качестве концентраторов напряжения использовали частичный пропилен, цилиндрические отверстия, трещину, царапину, отпечаток индентора и коррозионное пятно. Для оптического мониторинга деформационных полос использовали скоростную видеосъемку со скоростями от 500 до 20000 кадр/с с помощью цифровой видеокамеры FasTCAM Mini (Photron) в косом освещении поверхности деформируемого образца. Данные видеосъемки обрабатывали с помощью компьютерной программы вычитания последовательных цифровых изображений деформационных полос по методике, описанной в [4].

3. Результаты и обсуждение. Многочисленные экспериментальные исследования деформационных полос ПЛШ в плоских образцах показывают, что в отсутствие концентраторов напряжения эти полосы представляют собой шейки двух типов: полосы 1-типа, пересекающие узкую грань в направлении, составляющем угол φ ($55 - 60$) к оси растяжения, т. е. близким к направлению максимальных касательных напряжений (для изотропного пластически деформируемого материала $\varphi = \arctg \sqrt{2} = 54.44^\circ$ [5]), и под прямым углом – широкую (фронтальную) грань, и полосы 2-типа, которые пересекают под углом φ к оси растяжения фронтальную грань, а под прямым углом – узкую грань [6].

В первой серии экспериментов исследовали *in situ* динамику и морфологию деформационных полос, генерируемых концентратором в виде центрального пропила глубиной 1 мм и шириной 0.7 мм, произведенного, как и другие концентраторы перед отжигом образца. На рис. 1 представлены типичные картины формирования полос ПЛШ при приложенном напряжении $\sigma_0 = 170 \text{МПа}$, превышающем условный предел текучести сплава АМг6 $\sigma_{0.2} = 160 \text{МПа}$.

Первая полоса деформации обычно зарождается от источника на поверхности пропила и растет почти под прямым углом к оси растяжения, т. е. представляет полосу 1-типа. Средняя скорость ее вершины составляет около 2 м/с. После прорастания полосы через все поперечное сечение начинается стадия расширения полосы, а угол ее наклона к оси растяжения падает почти до 70° , т. е. она трансформируется в полосу 2-типа. Активная стадия расширения полосы сопровождается скачком разгрузки системы машина-образец амплитудой около $\Delta\sigma \approx 5 \text{МПа}$. Последующие полосы зарождаются на границе первичной полосы, а полосы третьего поколения – на границах вторичных полос и т. д. Разрушение происходит по одной из полос в области узкого сечения образца, связанного с пропилом.

Динамика макрополос на стадии предразрушения и образования шейки подробно исследована в работах томской школы физиков-прочнистов для сплавов, не демонстрирующих скачкообразную деформацию [7, 8, 9]. Роль макрополос пластической деформации в ходе дальнейшего роста магистральной трещины ранее не исследовалась.

В условиях растяжения образца вершина магистральной трещины является концентратором напряжений. Для полуэллиптической трещины длиной l и радиусом кривизны вершины r коэффициент концентрации напряжений, как известно, равен $k = 1 + 2\sqrt{l/r}$ [10]. Как и в случае пропила, трещина может быть источником деформационных полос, которые формируют макроскопическую пластическую зону вблизи вершины трещины помимо двухлепестковой (мезоскопической) пластической зоны в форме «бабочки» [11]. Это подтверждается видеосъемкой со скоростью 20000 кадр/с процесса развития

магистральной трещины и сопутствующих полос деформации (Рис. 2), из которой следует, что вершина трещины движется скачками, периодически испуская деформационные полосы.

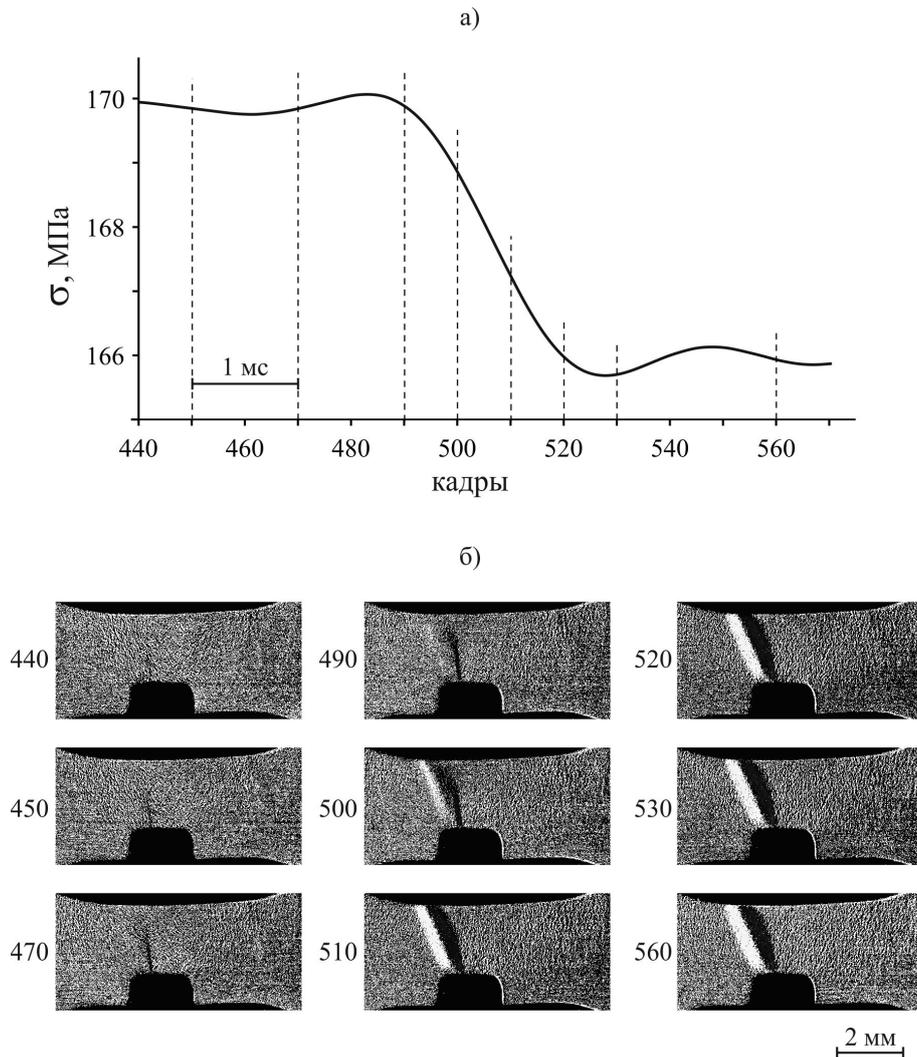


Рис. 1. Скачок разгрузки (а), вызванный процессом зарождения и развития полосы деформации, представленным фрагментом видеопленки (б). Скорость съемки 20000 кадр/с. $\sigma_0 = 170$ МПа.

Числа – номера кадров. Интервал между кадрами 50 мкс

Fig. 1. Stress drop (a), caused by the process of nucleation and development of a deformation band, represented by a fragment of the video film (b). Shooting speed 20000 fps. $\sigma_0 = 170$ МПа.

Numbers are frame numbers. The interval between frames is 50 мкс

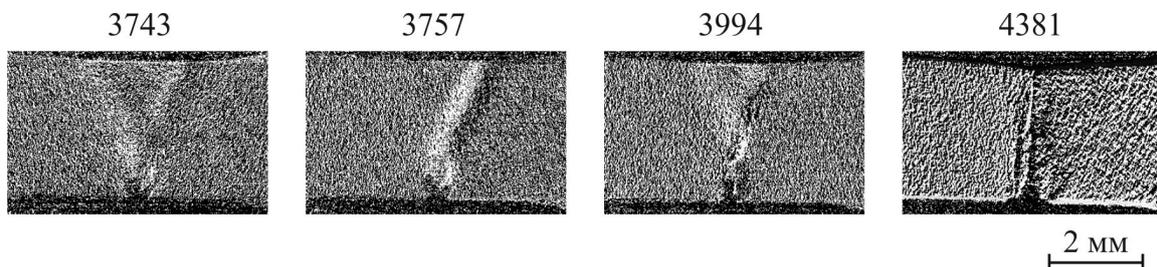


Рис. 2. Фрагмент видеопленки роста магистральной трещины, демонстрирующий генерацию деформационных макрополос в момент остановок вершины трещины. Скорость видеосъемки 20000 кадр/с. Числа – номера кадров

Fig. 2. Fragment of a video film of the growth of a main crack, demonstrating the generation of deformation macrobands at the moment the crack tip stops. Video shooting speed 20000 fps. Numbers are frame numbers

Перед торможением вершина испускает пару сопряженных полос, образующих V-образную структуру с углом 60° между полосами (Рис. 2, кадры 3743 и 3994). Естественно предположить, что трещина тормозится за счет «сваливания» дислокаций полос в вершину трещины и ее затуплению. Вместе с тем в области пересечения полос в сопряженных направлениях максимальных касательных напряжений создаются условия для зарождения микротрещин по механизму Коттрелла [12], а также по механизмам

Зинера – Стро [11, 13] и Гилмана – Рожанского [11] в результате взаимодействия плоского скопления с границей зерна и вскрытия заторможенного скопления, соответственно. Эти механизмы дополняют микроскопические механизмы разрушения вязких материалов, обусловленных образованием пор вблизи включений второй фазы [14, 15], в частности, частиц Al_3Mg_2 в алюминий-магниевом сплаве АМг6 [16]. Рост и слияние этих микротрещин в области пересечения полос подготавливает скачкообразное подрастание трещины. Процесс повторяется, вызывая скачкообразный рост магистральной трещины. Обычно длина скачка соизмерима с шириной полосы (0.5–1 мм), что дает нижнюю оценку скорости трещины в скачке $\sim 10 - 20$ м/с, которая ограничена временным разрешением видеокамеры $\Delta t = 50$ мкс.

Таким образом, вязкая трещина движется скачками на разных масштабных уровнях: макроскопическом, между испусканием вершиной очередной пары сопряженных макрополос, мезоскопическом, за счет слияния микротрещин в области пересечения макрополос и микроскопическом, за счет поглощения деформационных микропор вблизи включений.

Описанная картина «эстафетного» чередования процессов разрушения и пластической релаксации качественно согласуется с результатами работы [17], в которой исследовалась *in situ* в колонне растрового электронного микроскопа совместно с методом акустической эмиссии динамика скачкообразного роста магистральной трещины в модельном материале (эпоксидной смоле) на микро и мезоскопическом структурном уровне. По мнению авторов [17], формирование магистральной трещины определяется динамическим соотношением между освобождаемой энергией в дискретном акте структурной перестройки и диссипативными свойствами ближайшего окружения или системы в целом. Из результатов настоящей работы следует, что и для материала, демонстрирующего скачкообразную деформацию и полособразование на макроуровне процессы локализации пластической деформации и разрушения оказываются взаимообусловленными, поддерживающими друг друга в многоуровневой иерархической структуре разрушающегося материала от микро до макроуровня.

На локализацию деформационных полос может существенно влиять наличие коррозионных пятен на поверхности деформируемого алюминиевого сплава. Для моделирования взаимодействия полос с коррозионным повреждением перед механическими испытаниями на поверхность образца АМг6 наносили каплю 50%-го водного раствора гидроксида натрия. Концентрированная щелочная среда разрушает защитную пленку оксида Al_2O_3 и ускоряет коррозию алюминиевой матрицы в соответствии с реакцией $Al + NaOH + H_2O \rightarrow NaAlO_2 + (3/2)H_2$ [18]. В результате на поверхности сплава образуется одиночный пит – коррозионное пятно диаметром около 1 мм и глубиной от 10 до 50 мкм в зависимости от времени травления (Рис. 3). Затем образцы растягивали с заданной скоростью роста напряжения ($\dot{\sigma}_0 = 0.2$ МПа/с) и исследовали динамику деформационных полос на фронте скачков деформации.

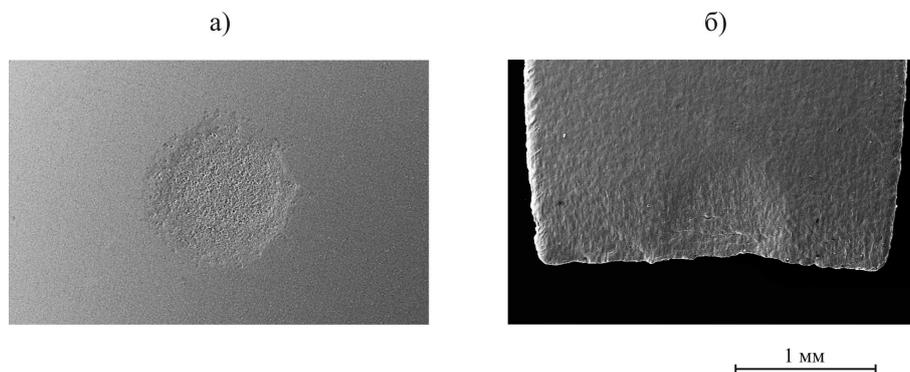


Рис. 3. Микрофотографии коррозионного пятна, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии: а – исходного, до деформирования; б – после разрушения

Fig. 3. Microphotographs of a corrosion pit obtained using scanning electron microscopy: a – initial, before deformation; b – after destruction

Основные особенности взаимодействия полос с одиночным питом на фронте последнего скачка с разрывом представлены на рис. 4. Первая деформационная полоса зарождается в области пита. На ее границах формируются вторичные сопряженные полосы, образующие крестообразную структуру (кадры 160, 310). Магистральная трещина зарождается в области пересечения этих полос и распространяется в центральной части пита.

Для исследования статистического пространственного распределения деформационных полос на поверхности образца с коррозионным пятном строилась гистограмма полос $n(x_i) = \Delta N(x_i)/N$, где $\Delta N(x_i)$ – количество границ полос, пересекающих сечение с координатой x_i ($i = 1, 2, \dots, 50$ – номер сечения), а N – общее количество границ полос.

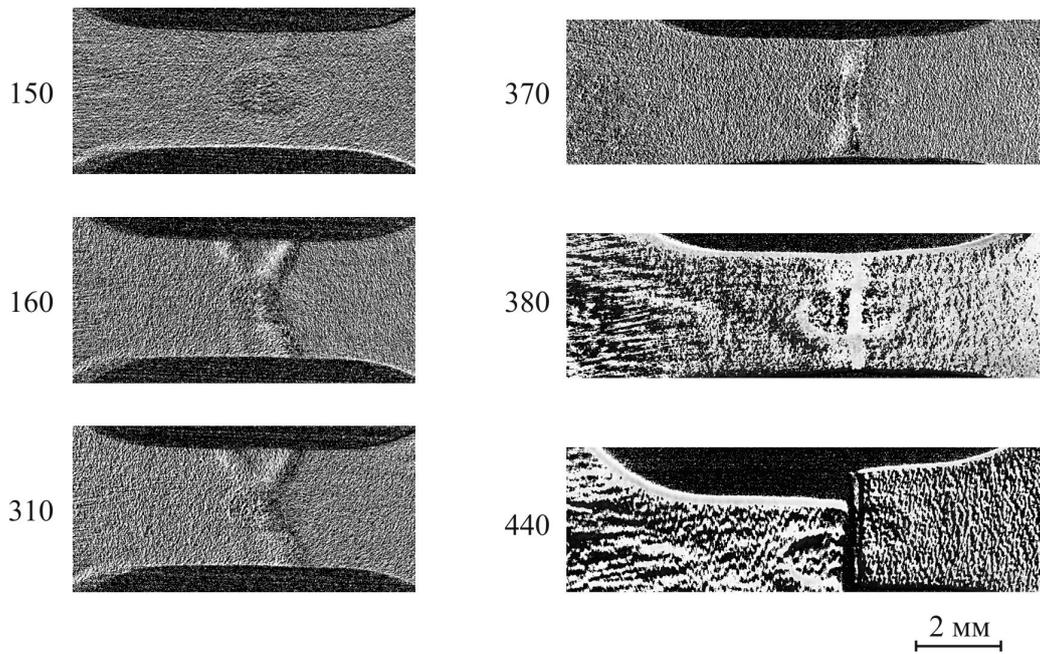


Рис. 4. Картина деформационных полос в образце с коррозионным пятном за 15 мс до разрушения. Скорость видеосъемки 20000 кадр/с
 Fig. 4. Picture of deformation bands in a sample with a corrosion pit 15 ms before failure. Video shooting speed 20000 fps

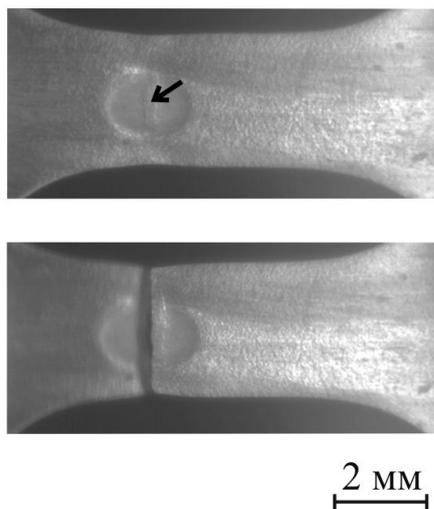
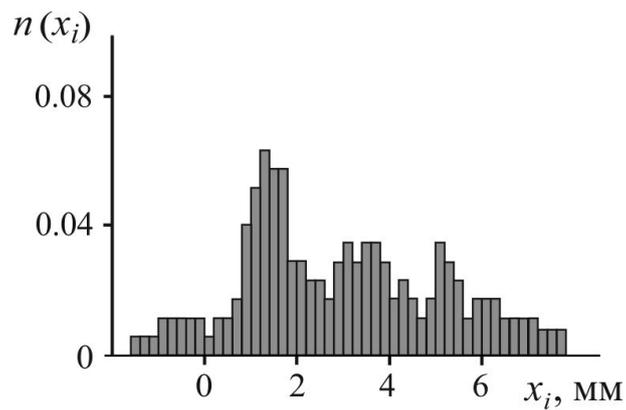


Рис. 5. Гистограмма полос на последнем скачке деформации. На фотографиях представлены кадры видеопленки за 10 мс до макроразрушения (верхние фото) и после разрыва образца (нижние фото). Стрелкой показана полоса деформации на дне коррозионного пита, по которой пройдет магистральная трещина
 Fig. 5. Histogram of bands at the last deformation jump. The photographs show video frames 10 ms before macrofracture (top photos) and after sample rupture (bottom photos). The arrow shows the deformation band at the bottom of the corrosion pit, along which the main crack will pass

Из гистограммы полос последнего скачка с разрывом образца следует, что полосы локализуются вблизи сечения, через которое пройдет магистральная трещина, находящееся в области коррозионного пита (рис. 5). Таким образом, локальная коррозия, как установлено, увеличивает вероятность формирования сопряженных деформационных полос, взаимодействие которых вызывает зарождение и развитие магистральной трещины.

На рис. 6 показаны примеры локализации деформационных полос вблизи одного (а) и двух небольших (б) отверстий в образцах, деформируемых одноосным растяжением. Во втором случае (б) разветвленная структура полос отражает более сложное поле упруго-пластической деформации, чем в случае с одним отверстием. Как видно, неоднородная пластическая деформация локализуется в основном в области отверстий, сокращая эффективную длину рабочей части образца. Для моделирования влияния мелких царапин и эрозии поверхности ударами абразивных частиц на зарождение деформационных полос ПЛШ на боковую поверхность плоского образца наносили: а) царапину глубиной около 30 мкм, составляющей ~ 1% ширины образца; б) отпечаток индентора Виккерса глубиной 30 мкм (диаметр отпечатка $d = 200$ мкм). Высокоскоростные исследования показали, что данных концентраторов достаточно для зарождения и распространения деформационных полос. В первом случае царапина генерирует сначала полосу 2-го типа, затем сопряженную ей полосу, взаимодействия которых приводит к развитию магистральной трещины (рис. 7). В результате удара индентора со скоростью 1 м/с формируется крестообразная структура сопряженных полос деформации; по одной из них затем растет магистральная трещина (Рис. 8).

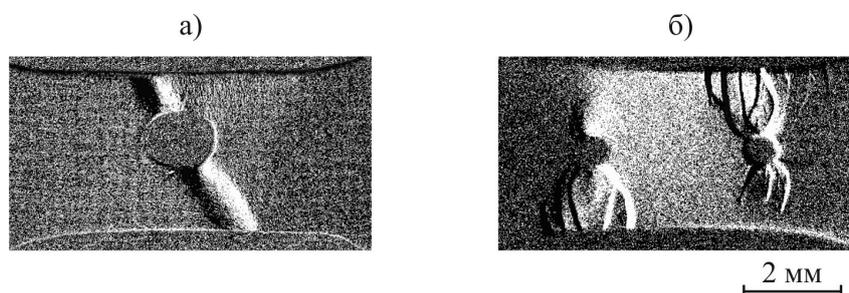


Рис. 6. Картины деформационных полос в образцах сплава АМг6 с одним отверстием диаметром 0.8 мм (а) и двумя отверстиями диаметром 0.4 мм (б)

Fig. 6. Pictures of deformation bands in a samples of the АМг6 alloy with one hole with a diameter of 0.8 mm (a) and two holes with a diameter of 0.4 mm (b)

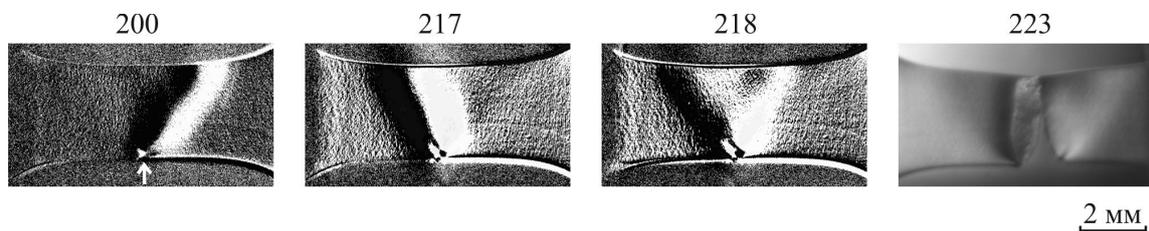


Рис. 7. Эволюция деформационных полос от бокового надреза (помечен стрелкой) на последнем скачке деформации с разрывом. Скорость съемки 500 кадр/с

Fig. 7. Evolution of deformation bands from the side cut (marked with a arrow) at the last deformation jump with discontinuity. Shooting speed 500 fps

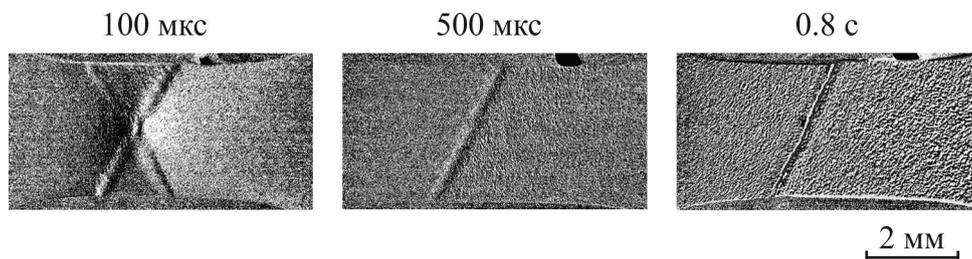


Рис. 8. Результаты компьютерной обработки данных видеосъемки от момента $t_1 = 100$ мс после удара индентора до разрушения образца по полосе деформации при $t_2 = 0.8$ с

Fig. 8. Results of computer processing of video recording data from the moment $t_1 = 100$ ms after the indenter impact to the destruction of the sample along the deformation band at $t_2 = 0.8$ s

4. Заключение. Методом высокоскоростной видеосъемки исследовали динамику формирования пространственно-временных структур полос локализованной пластической деформации на поверхности деформируемого образца алюминий-магниевого сплава АМг6 с концентраторами напряжения

различной природы: частичный пропил, трещина, отверстие, царапина, коррозионное пятно и отпечаток индентора. Установлено, что алюминиевый сплав, демонстрирующий эффект Портевена – Ле Шателье, очень чувствителен к геометрическим концентраторам напряжения различной формы и размеров вплоть до царапин, коррозионных пятен и отпечатков от удара мелких абразивных частиц, которые инициируют зарождение и распространение через все поперечное сечение образца полос макроскопической деформации, взаимодействие которых может вызвать внезапное разрушение сплава.

Список литературы

1. Kubin L.P., Fressengeas C., Ananthakrishna G. Collective behaviour of dislocations in plasticity. *Dislocat. Solids*, 2002;11:101. DOI.org/10.1016/S1572-4859(02)80008-0
2. Yilmaz A.J. The Portevin-Le Chatelier effect: a review of experimental findings. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2011;12:063001(16 pp). DOI.10.1088/1468-6996/12/6/063001
3. Shibkov A.A., Gasanov M.F., Zheltov M.A., Zolotov A.E., Ivolgin V.I. Intermittent plasticity associated with the spatio-temporal dynamics of deformation bands during creep tests in an AlMg polycrystal. *Int. J. Plast.* 2016;86:37-55. DOI.org/10.1016/j.jiplas.2016.07.014
4. Шибков А.А., Золотов А.Е. Нелинейная динамика пространственно-временных структур макролокализованной деформации. *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2009;90(5):412-417.
5. Хилл Р. Математическая теория пластичности. М., Гостехиздат;1976. 280 с.
6. Криштал М.М. Взаимосвязь неустойчивости и неоднородности пластической деформации. Диссертация доктора физ.-мат. наук: 01.04.07. Тольятти. Тольяттинский государственный университет. 2002. 331 с.
7. Панин В.Е., Деревягина Л.С., Дерюгин Е.Е. и др. Закономерности стадии предразрушения в физической мезомеханике. *Физическая мезомеханика*. 2003;6(6):97-106.
8. Панин В.Е., Гриняев Ю.В. Физическая мезомеханика – новая парадигма на стыке механики деформируемого твердого тела. *Физическая мезомеханика*. 2003;6(4):9-36.
9. Деревягина Л.С., Панин В.Е., Гордиенко А.И. Самоорганизация пластических сдвигов в макрополосах локализованной деформации в шейке высокопрочных поликристаллов и ее роль в разрушении материала при одноосном растяжении. *Физическая мезомеханика*. 2007;10(4):59-72.
10. Партон В.З. Механика разрушения. М., ЛКИ; 2010. 240 с.
11. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. М., Металлургия; 1984. 280 с.
12. Cottrell A.H. Theory of brittle fracture in steel and similar metals. *Trans. Met. Soc. AIME*.1958;38(2):192-203.
13. Stroh A.N. The formation of cracks as a result of plastic flow. *Proc.Roy.Soc. A*,1954;223:404-414. DOI.org/10. 1098/rspa.1954.0124
14. Halim H., Wilkinson D.S., Niewczas M. The Portevin-Le Chatelier (PLC) effect and shear band formation in an AA5754 alloy. *Acta Mater.*2007;55:4151-4160. DOI:10.1016/j.actamat.2007.03.007
15. Tomason P.F. Ductile fracture of metals. Pergamon Press., Oxford; 1990. 327 p.
16. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М., МИСиС; 2001. 416 с.
17. Лексовский А.М., Баскин Б.Л. Некоторые аспекты зарождения и развития трещин микро- и мезомасштаба и квазихрупкое разрушение однородных материалов. *Физика твердого тела*, 2011;53(6):1157.
18. Бык М.В. Об участии гидроксидных ионов в анодном растворении металлов в водных растворах электролитов. *Защита металлов*, 2004;40(3):321-324.

References

1. Kubin L.P., Fressengeas C., Ananthakrishna G. Collective behaviour of dislocations in plasticity. *Dislocat. Solids*,2002;11:101. DOI.org/10.1016/S1572-4859(02)80008-0
2. Yilmaz A.J. The Portevin-Le Chatelier effect: a review of experimental findings. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2011;12:063001(16 pp).DOI.10.1088/1468-6996/12/6/063001
3. Shibkov A.A., Gasanov M.F., Zheltov M.A., Zolotov A.E., Ivolgin V.I. Intermittent plasticity associated with the spatio-temporal dynamics of deformation bands during creep tests in an AlMg polycrystal. *Int. J. Plast.*2016;86:37-55. DOI.org/10.1016/j.jiplas.2016.07.014
4. Shibkov A.A., Zolotov A.E. Nonlinear Dynamics of the Spatio-Temporal Pattern of a Macroscopically Localized Deformation. *JETP Letters*.2009;90(5):370-375 (in Russian). DOI.org/10.1134/S0021364009170123
5. Hill R. The Mathematical Theory of Plasticity. Clarendon Press, Oxford (1950).
6. Krishtal M.M. Relationship between instability and heterogeneity of plastic deformation. Dissertation of the doctor in physics and mathematics. Sciences: 04/01/07. Tolyatti. Tolyatti State University.2002. 331 p.
7. Panin V.E., Derevyagina L.S., Deryugin E.E. et al. Regularities of the pre-fracture stage in physical mesomechanics. *Phys. Mesomech.*2003;6(6):97-106 (in Russian).

8. Panin VE., Grinyaev YuV. Physical mesomechanics is a new paradigm at the intersection of the mechanics of a deformable solid. *Phys. mesomech.*2003;6(4):9-36 (in Russian).
9. Derevyagina LS., Panin VE., Gordienko AI. Self-organization of plastic shears in macrobands of localized deformation in the neck of high-strength polycrystals and its role in the destruction of the material under uniaxial tension. *Phys. mesomech.*2007;10(4):59-72. (in Russian).
10. Parton VZ. Mechanics of destruction. M.:LKI;2010.240 p. (in Russian).
11. Vladimirov VI. Physical nature of metal destruction. M.:Metallurgy;1984.280 p. (in Russian).
12. Cottrell AH. Theory of brittle fracture in steel and similar metals. *Trans. Met.Soc.AIME.*1958;38(2):192-203.
13. Stroh AN. The formation of cracks as a result of plastic flow. *Proc. Roy. Soc. A.*1954;223:404-414.DOI.org/10.1098/rspa.1954.0124
14. Halim H., Wilkinson DS., Niewczas M. The Portevin-Le Chatelier (PLC) effect and shear band formation in an AA5754 alloy. *Acta Mater.*2007;55:4151-4160.DOI:10.1016/j.actamat.2007.03.007
15. Tomason PF. Ductile fracture of metals. Pergamon Press. Oxford.1990.327 p.
16. Kolachev BA., Elagin VI., Livanov VA. Metallurgy and heat treatment of non-ferrous metals and alloys. M.:MISiS;2001.416 p. (in Russian).
17. Leksovsky AM., Baskin BL. Some aspects of the initiation and development of micro- and mesoscale cracks and quasi-brittle fracture of homogeneous materials.*PSS.*2011;53(6):1157 (in Russian).
18. Byk MV. On the participation of hydroxide ions in the anodic dissolution of metals in aqueous solutions of electrolytes. *Metal protection*2004;40(3):321-324. (in Russian).

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 11.03.2024

Received March 11, 2024

Поступила после рецензирования 22.04.2024

Revised April 22, 2024

Принята к публикации 29.04.2024

Accepted April 29, 2024

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Шибков Александр Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики, Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина, г. Тамбов, Россия

Федоров Виктор Александрович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики, Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина, г. Тамбов, Россия

Золотов Александр Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики, Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина, г. Тамбов, Россия

Кочегаров Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики, Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина, г. Тамбов, Россия

Шибков Евгений Александрович – аспирант кафедры теоретической и экспериментальной физики, Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина, г. Тамбов, Россия

Желтова Валерия Михайловна – аспирант кафедры теоретической и экспериментальной физики, Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина, г. Тамбов, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander A. Shibkov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Theoretical and Experimental Physics, Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia

Victor A. Fedorov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Theoretical and Experimental Physics, Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia

Alexander E. Zolotov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical and Experimental Physics, Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia

Sergey S. Kochegarov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Physics, Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia

Eugene A. Shibkov – Postgraduate Student of the Department of Theoretical and Experimental Physics, Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia

Valeria M. Zheltova – Postgraduate student of the Department of Theoretical and Experimental Physics, Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia

[К содержанию](#)