

УДК 539.374

DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1092-1099

ДИНАМИКА МАКРОЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЕ АЛЮМИНИЙ-МАГНИЕВОГО СПЛАВА С ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ

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

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина
392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33
E-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Методом видеосъемки со скоростью до 20000 кадр/с исследовали *in situ* влияние геометрического концентратора напряжения на пространственно-временную локализацию деформации и разрушение алюминий-магниевого сплава АМг6, демонстрирующего эффект Портевена–Ле Шателье при комнатной температуре. Установлено, что концентратор напряжения в форме небольшого надреза глубиной около 1 % ширины плоского образца является аттрактором полос макролокализованной пластической деформации, начиная с полосы Людерса и заканчивая стартом магистральной трещины. Выявлена ключевая роль пересекающихся макрополос деформации в развитии магистральной трещины. Обсуждаются возможные микромеханизмы вязкого разрушения, связанные с динамикой пересечения деформационных полос.

Ключевые слова: полоса Людерса; эффект Портевена–Ле Шателье; магистральная трещина; алюминий-магний-сплав

1. ВВЕДЕНИЕ

Неустойчивость пластической деформации на макроскопическом структурном уровне проявляется в виде зуба текучести и связанного с ним явления Людерса, прерывистой деформации и образования шейки перед разрывом образца [1]. Прерывистую деформацию в свою очередь различают на эффект Портевена–Ле Шателье (ПЛШ) – появление повторяющихся скачков напряжения на кривых растяжения с заданной скоростью $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$ [2], эффект Савара–Массона – появление повторяющихся ступеней на кривых нагружения с постоянной скоростью $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$ [1; 3] и прерывистую («лестничную») ползучесть [4–5]. Прерывистая деформация сопровождается спонтанным зарождением и распространением полос макролокализованной деформации. Природу этого явления обычно связывают с динамическим деформационным старением дислокаций, обусловленным динамическим взаимодействием подвижных дислокаций с диффундирующими атомами примеси, что характерно для металлических твердых растворов замещения или внедрения [6]. Несмотря на интенсивное исследование эффекта ПЛШ и полособразования за последние три десятилетия, многие вопросы остаются открытыми. Среди них – влияние геометрических концентраторов напряжения, характерных для реальных конструкций, на прерывистую деформацию и образование деформационных полос и роль полос в механизмах вязкого разрушения металлов и сплавов, демонстрирующих прерывистую деформацию.

В настоящей работе с помощью высокоскоростных *in situ* методов регистрации деформационных полос и трещин исследуется влияние геометрического концентратора напряжения на макролокализацию пластиче-

ской деформации и разрушение алюминий-магниевого сплава АМг6, демонстрирующего прерывистую деформацию при комнатной температуре.

2. МЕТОДИКА

Образцы промышленного сплава АМг6 (Al – 6,15 % Mg – 0,65 % Mn – 0,25 % Si – 0,2 % Fe – 0,1 % Cu, wt. %) вырезали машинным способом из холоднокатаного листа толщиной 0,5 мм. Образцы имели форму двухсторонних лопаток с размерами рабочей части 0,5×3×6 мм. После полировки образцы отжигали при температуре 450° С в течение 1 часа и закаливали на воздухе. Результаты исследования рекристаллизованной зеренной структуры сплава представлены в работе [7]. Средний размер зерна составил около 10 мкм. Перед отжигом на боковой поверхности рабочей части образца наносили геометрический концентратор напряжения в виде надреза глубиной 30–40 мкм, составляющей около 1 % ширины образца. Растяжение образцов с постоянной скоростью роста приложенного напряжения $\dot{\sigma}_0 = 0,2$ МПа проводили в «мягкой» деформационной машине, специально разработанной для изучения ступенчатой деформации и прерывистой ползучести [8].

Динамику деформационных макрополос и трещин исследовали *in situ* с помощью видеосъемки скоростной цифровой видеокамерой FASTCAM Mini UX100 (Photron) поверхности деформируемого металла в косом освещении. Скорость видеосъемки варьировали от 500 до 20000 кадр/с в зависимости от задач исследования: динамика и морфология полосы Людерса, динамика полос Савара–Массона и кинетика развития магистральной трещины. Обработка данных видеосъемки состояла в вычитании последовательных цифровых

изображений с помощью компьютерной программы [9]. Для получения объемной картины локализации пластической деформации в плоском образце использовали методику видеосъемки с помощью двух зеркал [10], позволяющей получить одновременные изображения противоположных фронтальных поверхностей деформируемого образца.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены данные видеосъемки со скоростью 500 кадр/с процесса локализации пластической деформации на первом деформационном скачке,

спонтанно возникшем при напряжении $\sigma_c \approx 160$ МПа, – ступени амплитудой около 2 % на кривой нагружения со скоростью $\dot{\sigma}_0 = 0,2$ МПа/с образца сплава АМг6. В рекристаллизованном сплаве Al-Mg вне зависимости от режима нагружения (в жесткой машине при $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$ или мягкой машине при $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$) первый деформационный скачок, как известно [11–12], связан с зарождением и распространением полосы Людерса (ПЛ). В данном случае полоса ПЛ зарождается от геометрического концентратора напряжения на ребре кристалла и в форме узкого клина деформированного материала

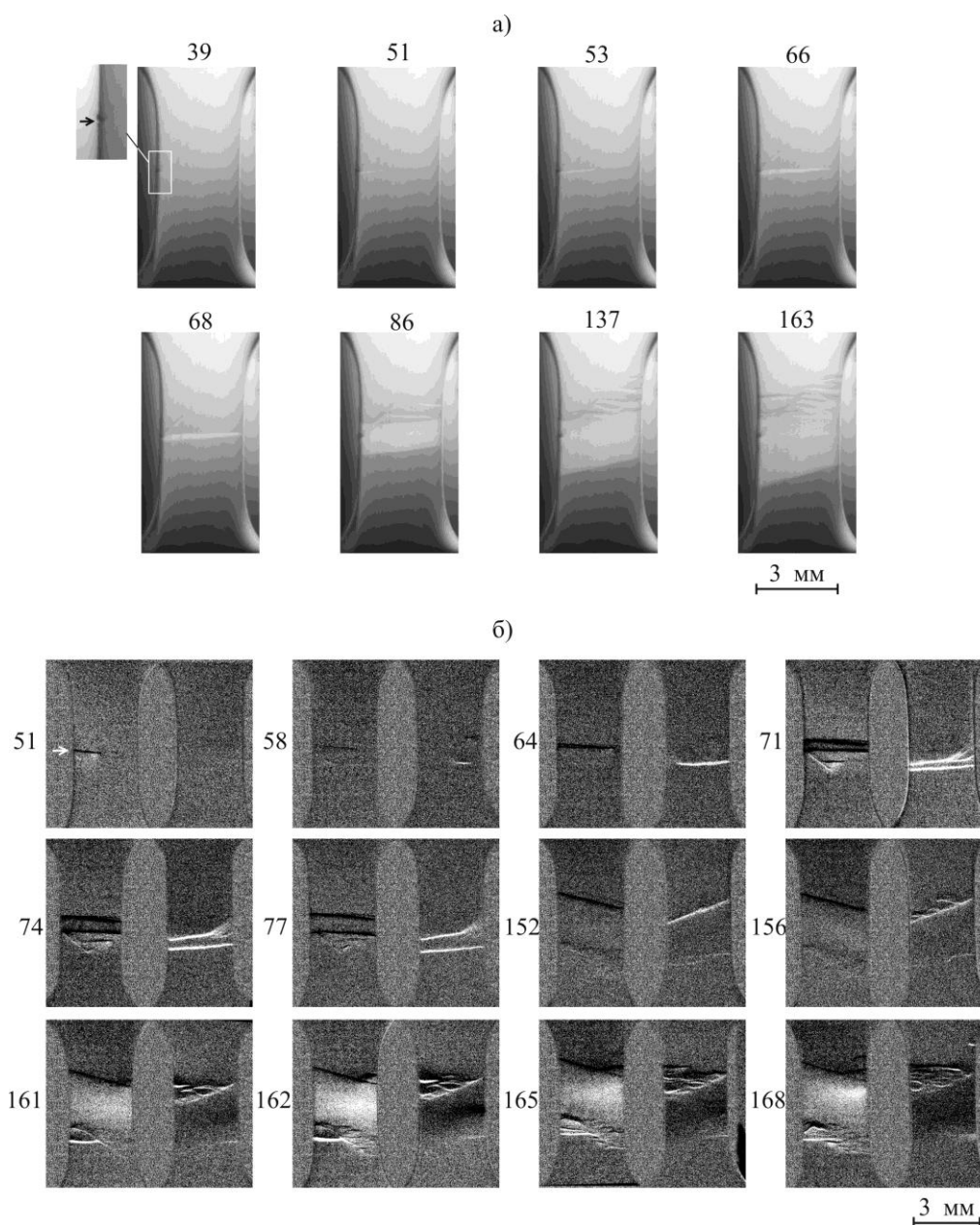


Рис. 1. Фрагмент видеофильма, демонстрирующий зарождение и развитие полосы Людерса от геометрического концентратора напряжения в сплаве АМг6 с рекристаллизованной зернистой структурой. а – без обработки изображений видеофильма; б – с компьютерной обработкой изображений противоположных поверхностей образца, полученных видеосъемкой с помощью двух зеркал. Числа – номера кадров. Скорость видеосъемки 500 кадр/с. Стрелками отмечен концентратор в форме надреза глубины около 30 мкм. $\sigma_c = 160$ МПа

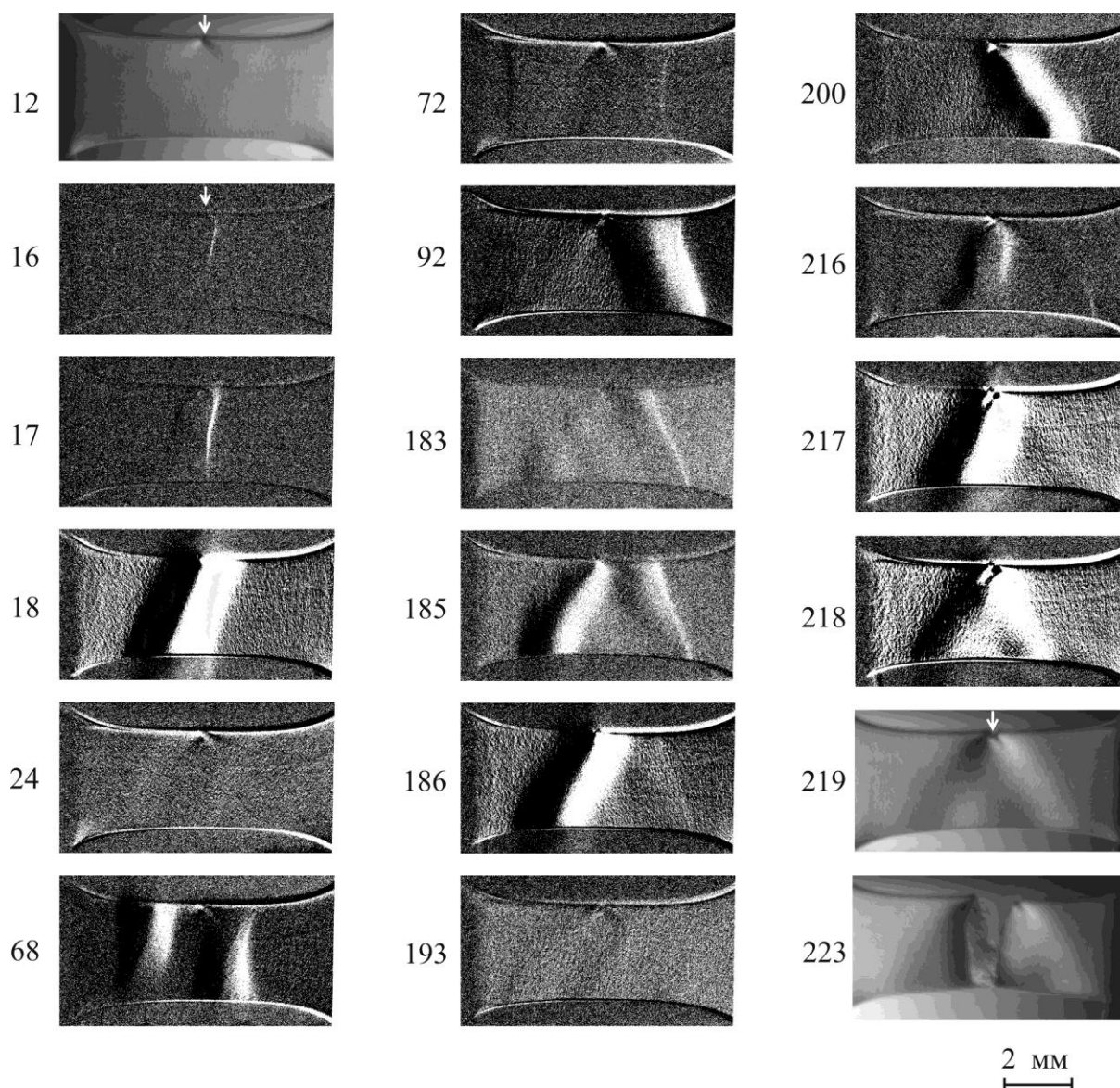


Рис. 2. Развитие деформационных полос на последнем скачке деформации с разрывом образца. Стрелкой отмечен концентратор напряжения. Скорость видеосъемки 500 кадр/с. $\sigma_B = 320$ МПа

(зародыша ПЛ) растет поперек образца со скоростью вершины 10 см/с и боковой скоростью около 2 мм/с (рис. 1а, кадры 39–68). После прорастания зародыша ПЛ через все поперечное сечение начинается расширение ПЛ почти на всю рабочую часть образца (кадры 86–163) со средней скоростью около 1 см/с в интервале времени 0,6 с, совпадающем с длительностью фронта первой деформационной ступени на кривой нагружения.

Из результатов компьютерной обработки данных видеосъемки с двумя зеркалами (рис. 1б) видно, что зародыш ПЛ возникает сначала на одной фронтальной поверхности образца вблизи концентратора (рис. 1б, кадр 51), затем на обеих противоположных поверхностях (кадр 58), причем их изображения смещены вдоль растяжения приблизительно на 0,5 мм. Это означает, что зародыш ПЛ распространяется поперек образца (толщиной 0,5 мм) в плоскости, составляющей угол около 45° к оси растяжения, т. е. представляет собой

полосу локализованного сдвига. После прорастания зародыша через поперечное сечение формируется завершенная (сквозная) полоса деформации, которая продолжает расширяться за счет движения ее границ в противоположные стороны.

Пластическая деформация локализуется в основном на движущихся границах ПЛ, а область внутри ПЛ в результате деформационного упрочнения уже не деформируется (кадры 71–152). На начальном этапе границы полосы плоские на оптическом уровне, а затем (после 156 кадра) начинают ветвиться и со временем приобретают фрактальную структуру, причем ветвление структуры фронта ПЛ на одной фронтальной поверхности плоского образца не совпадает с таковой на противоположной поверхности, т. е. ветви фронта ПЛ имеют объемный (а не плоский) характер.

В результате распространения ПЛ на всю рабочую часть образца ее поверхность становится матовой со структурой типа «апельсиновой корки». Последующие

макроскачки деформации происходят за счет формирования деформационных полос другой природы – полос Савара–Массона – расширяющихся шеек [9]. В отсутствие геометрического концентратора напряжения деформационные полосы размножаются по каскадному механизму: новые полосы зарождаются на границах предшествующих полос, за исключением первичной полосы, которая зарождается спонтанно в случайной позиции на рабочей части образца [5; 9]. При наличии геометрического концентратора новые полосы зарождаются не только на границах предшествующих полос, но и вблизи концентратора, как и первичная полоса.

Концентратор напряжения играет таким образом роль аттрактора деформационных полос; полосы редко отходят от концентратора к краям рабочей части образца. В то же время в отсутствие концентратора первые полосы зарождаются с большей вероятностью именно на краях рабочей части вблизи лопаток. Структура полос на макроуровне напоминает в среднем по времени латинскую букву «V» с вершиной вблизи концентратора напряжения (см. рис. 2, кадр 219). Вне этой области локализации пластической деформации происходит в основном однородная упругая деформация.

Типичная картина макролокализации пластической деформации перед разрывом образца на последнем деформационном скачке представлена на рис. 2. Триггером развития макроскачка является зарождение вблизи концентратора напряжения узкой полосы локализованного сдвига (рис. 2, кадры 16, 17), которая после прорастания через поперечное сечение трансформируется в полосу деформации Савара–Массона – расширяющуюся шейку, наклоненную к оси растяжения под углом $60\text{--}70^\circ$ (см. также рис. 2 в работе [9]). Затем границы этой полосы генерируют полосы второго порядка (кадр 68) и т. д. В результате развитие пространственно-временной неустойчивости на фронте последнего деформационного скачка описывается бифуркационным «деревом», представленным на рис. 3 в виде корреляционной диаграммы – временной зависимости координат границ полос деформации x относительно позиции зарождения первичной полосы-зародыша, т. е. координаты концентратора напряжения.

Для исследования влияния на разрушение пространственного статистического распределения полос деформации строилась гистограмма полос $N(x_i)$. Рабочая часть образца условно разбивалась на 18 эквидистантных сечений x_i и подсчитывалось количество границ полос $N(x_i)$ на участке $x_{i+1} - x_i$, где x_i – координата сечения образца, отсчитанная от сечения, проходящего через концентратор напряжения (рис. 4). Видно, что гистограмма $N(x_i)$ имеет колоколо-подобную форму с максимумом вблизи сечения, проходящим через геометрический концентратор напряжения. Позиция магистральной трещины находится в области максимума гистограммы и совпадает в пределах пространственного разрешения метода (~ 10 мкм) с позицией первичной полосы деформации.

Эволюция пространственно-временной структуры полос на последнем скачке деформации имеет по крайней мере две основные стадии: АВ и ВС (см. рис. 3): стадия АВ расширения области макролокализации пластической деформации за счет размножения деформационных полос по каскадному механизму (каждая новая полоса зарождается на границах предыдущей

полосы) и стадия ВС образования шейки перед разрывом образца, когда зарождение и расширение новых полос ограничено V-образной областью рабочей части образца с вершиной вблизи концентратора напряжения (кадры 185–219 на рис. 2). Завершающая стадия ВС – стадия макролокализации пластической деформации в окрестности сечения, в котором пройдет магистральная трещина. Гистограмма полос $N(x_i)$ на этой стадии выделена более темным тоном на рис. 4.

Обсудим возможные механизмы разрушения сплава, учитывающие макролокализацию пластической деформации перед разрывом. В отсутствие концентратора

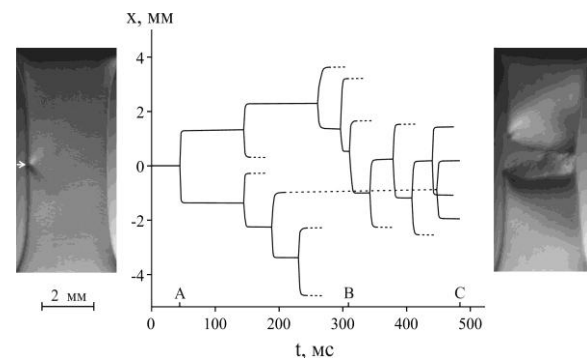


Рис. 3. Корреляционная диаграмма $x(t)$, демонстрирующая пространственно-временную эволюцию границ деформационных полос на последнем скачке деформации с разрывом образца. Соответствующий фрагмент видеосъемки представлен на рис. 2. А – момент зарождения первичной деформационной полосы от геометрического концентратора напряжения; АВ – временная стадия каскадного размножения полос; ВС – стадия локализации пластической деформации вблизи сечения, через которое пройдет трещина; С – момент старта магистральной трещины

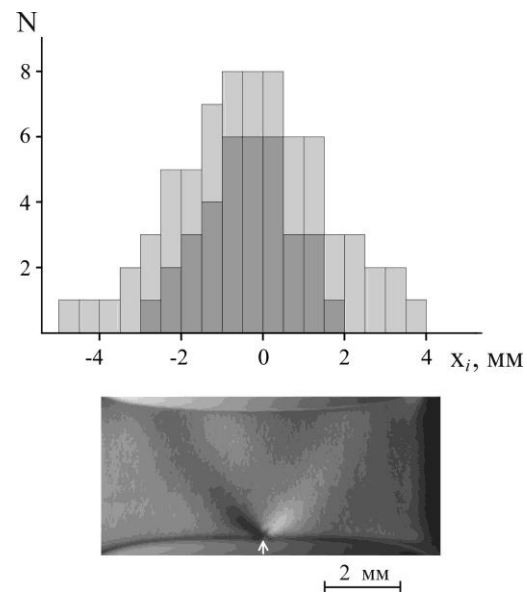


Рис. 4. Гистограмма $N(x_i)$ полос деформации на последнем деформационном скачке с разрывом образца, соответствующем временному интервалу АС на рис. 3. Темно серым тоном выделена часть гистограммы, соответствующая последней стадии локализации деформации ВС. Стрелкой отмечен геометрический концентратор напряжения

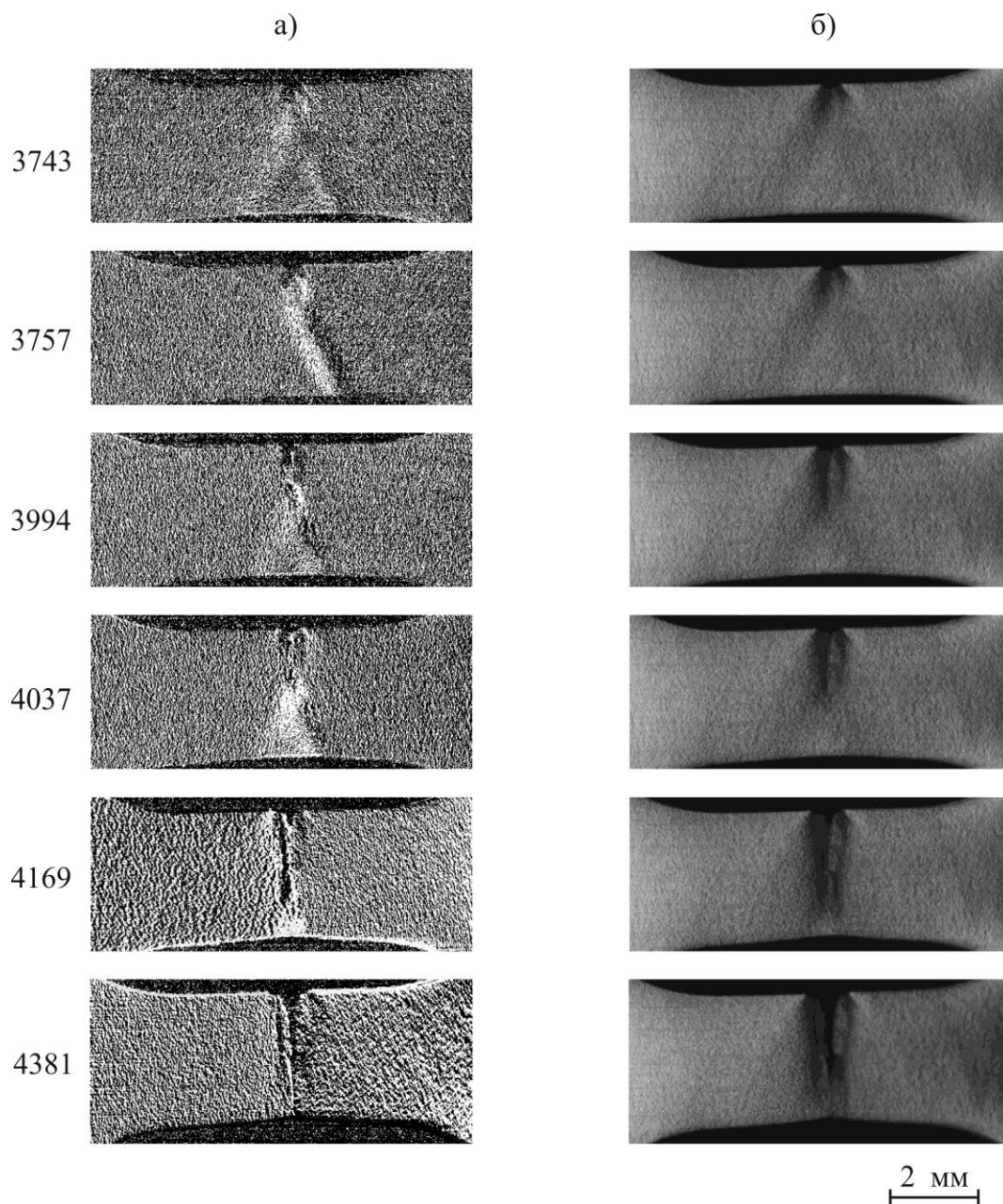


Рис. 5. Фрагмент видеофильма роста магистральной трещины от поверхностного концентратора напряжения, демонстрирующего генерацию деформационных макрополос в момент остановок вершины трещины: а – результаты компьютерной обработки изображений; б – фрагмент того же видеофильма без обработки изображений. Скорость видеосъемки 20000 кадр/с. Числа – номера кадров

напряжения этот вопрос подробно исследован в работах томской школы физиков-прочнистов [13–15] на основе анализа структуры двух макрополос локализованной пластической деформации по схеме креста в сопряженных направлениях максимальных касательных напряжений, которые формируются на стадии образования шейки перед разрывом. При этом основным микромеханизмом разрушения является зарождение несплошностей в окрестности включений вторичной фазы и последующее порообразование на них. Концентратор напряжения, как отмечалось, вызывает формирование макроскопических полос деформации, которые в среднем по времени образуют V-образную структуру локализованной деформации перед разры-

вом образца. Область вблизи этой структуры представляет область материала, наиболее интенсивно «обработанного» полосами в сопряженных направлениях максимальных касательных напряжений, составляющих соответственно углы около $+30^\circ$ и -30° относительно нормального сечения образца (см. рис. 2).

Взаимодействие дислокационных скоплений в области пересечения макрополос, а также взаимодействие скоплений с границами зерен способно вызвать образование микротрещин по механизмам Коттрелла и Зинера–Стро, соответственно [16–17]. Эти механизмы дополняют отмеченные выше механизмы микроразрушения, связанные с порообразованием вблизи частиц вторичной фазы (в сплаве АМгб это частицы

$\beta(\text{Al}_3\text{Mg}_2)$ -фазы [7]). В результате, особенно на завершающей стадии ВС перед разрывом, область пересечения макрополос становится областью материала с повышенной концентрацией микротрещин. Их слияние и приводит к развитию магистральной вязкой трещины за счет сваливания дислокаций в ее вершину. При угле между сопряженными макрополосами около 60° размер области пересечения этих полос, очевидно, порядка ширины полосы $w_b \approx 1,5\text{--}2$ мм. В этой области стартует магистральная трещина: а) в образце с геометрическим концентратором напряжения – вблизи этого концентратора; б) в образце без концентратора – в центральной части X-образной структуры сопряженных полос по данным видеосъемки со скоростью 5000 кадр/с процесса образования шейки и разрушения в работе [18].

Для исследования влияния полос макролокализованной деформации на процесс разрушения использовали видеосъемку со скоростью 20000 кадр/с поверхности деформируемого образца непосредственно в ходе развития магистральной трещины. Из данных видеосъемки, представленных на рис. 5, следует, что движение вершины трещины сопровождается генерированием макрополос пластической деформации. Вершина трещины теперь выполняет роль геометрического концентратора напряжения. В приближении эллиптической формы трещины коэффициент концентрации упругих напряжений в вершине трещины, как известно, равен $k = 1 + 2\sqrt{l/r}$, где l – длина трещины, r – радиус кривизны в ее вершине [19].

В металлах, не демонстрирующих прерывистую деформацию и полособразование, пластическая релаксация вблизи вершины трещины начинается в двухлепестковой пластической зоне максимальных касательных напряжений в форме «бабочки» [20]. В мелкозернистых поликристаллических сплавах размер пластической зоны обычно ограничен несколькими зернами (мезоскопический уровень пластической деформации). В сплаве АМг6, демонстрирующем явно выраженную прерывистую деформацию, пластическая зона вблизи вершины стартующей трещины в пределах миллисекунды перерастает в две сопряженные макрополосы, образующие V-образную структуру с вершиной в устье трещины и углом около 60° между полосами (рис. 5, кадр 3743). Объем макрополосы на начальной стадии ее быстрого расширения в образцах сечением $3 \times 0,5$ мм достигает $1,5\text{--}2$ мм³.

Трещина прорастает через зону пересечения полос перед ее вершиной предположительно за счет слияния микротрещин, образованных по механизмам взаимодействия дислокационных скоплений, принадлежащих сопряженным макрополосам, или взаимодействия скоплений с границами зерен [16; 17; 20]. Затем магистральная трещина останавливается (из-за отсутствия вблизи ее вершины необходимого количества микротрещин) и испускает очередную пару сопряженных макрополос (рис. 5, кадр 3994). После термоактивированного зарождения микротрещин по отмеченным выше механизмам магистральная трещина прорастает через область пересечения этих полос и т. д.

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, и т. д. Поэтому процессы локализации пластической деформации и разрушения оказываются взаимообусловленными, поддерживающими друг друга в многоуровневой иерархической структуре разрушающегося материала от микро до макроуровня.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе прямого наблюдения деформационных полос и трещин с помощью высокоскоростной видеосъемки со скоростью до 20000 кадр/с исследовали влияние геометрического концентратора напряжения в виде небольшого надреза глубиной около 1 % ширины образца на развитие пространственно-временной локализации пластической деформации и разрушения алюминий-магниевого сплава АМг6, демонстрирующего прерывистую деформацию и полособразование при комнатной температуре. Установлено, что геометрический концентратор является аттрактором макрополос пластической деформации, начиная с полосы Людерса и заканчивая формированием шейки перед разрывом образца. Предполагается, что магистральная трещина растет за счет слияния микротрещин, зарождающихся преимущественно по механизму взаимодействия дислокационных скоплений в области пересечения сопряженных макрополос, которые образуют V-образную структуру с вершиной сначала в области геометрического концентратора напряжений, а затем в вершине растущей магистральной трещины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. М.: Наука, 1984. Ч. 2. 432 с.
2. Yilmaz A.J. The Portevin–Le Chatelier effect: a review of experimental findings // Sci. Technol. Adv. Mater. 2011. V. 12. P. 1.
3. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А. Механизмы зарождения полос макролокализованной деформации // Известия РАН. Серия Физическая. 2012. Т. 76. № 1. С. 97.
4. Klueh R.L., King J.F. Creep and creep rupture of ERNiCr-3 weld metal // J. Nuclear Mater. 1981. V. 98. № 1-2. P. 173.
5. Shibkov A.A., Gasanov M.F., Zheltov M.A., Zolotov A.E., Ivogin V.I. Intermittent plasticity associated with the spatio-temporal dynamics of deformation bands during creep tests in an AlMg polycrystal // Int. J. Plast. 2016. V. 86. P. 37.
6. Estrin Y., Kubin L.P. // Continuum models for materials with microstructure / ed. by H.-V. Muhlhaupt, N. Y.: Wiley & Sons, 1995. P. 395.
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., Лебедев М.А., Желтов М.А., Скворцов В.В., Кольцов Р.Ю., Шуклинов А.В. Complex in situ methods of metals jump plastic deformation study // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2005. Т. 71. № 7. С. 20-27.
9. Шибков А.А., Золотов А.Е. Нелинейная динамика пространственно-временных структур макролокализованной деформации // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. № 5. С. 412-417.
10. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А. Акустический предвестник неустойчивой пластической деформации алюминий-магниевого сплава АМг6 // Физика твердого тела. 2010. Т. 52. № 11. С. 2223-2231.
11. Klose F.B., Hagemann F., Hähner P., Neuhauser H. Investigation of the Portevin–Le Chatelier effect in Al–3wt. % Mg alloys by strain-rate and stress-rate controlled tensile tests // Mat. Sci. Eng. A. 2004. V. 93. P. 387.
12. Chmelik F., Klose F.B., Dierke H., Sachl J., Neuhauser H., Lukac P. Investigating the Portevin–Le Chatelier effect in strain rate and stress rate controlled tests by the acoustic emission and laser extensometry techniques // Mat. Sc. Eng. A. 2007. V. 462. P. 53.
13. Панин В.Е., Деревягина Л.С., Дерюгин Е.Е., Панин А.В., Панин С.В., Антипина Н.А. Закономерности стадии предразрушения

- в физической мезомеханике // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6. № 6. С. 97-106.
14. Панин В.Е., Гришяев Ю.В. Физическая мезомеханика – новая парадигма на стыке физики и механики деформируемого твердого тела // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6. № 4. С. 9-36.
 15. 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. Т. 10. № 4. С. 59-71.
 16. Cottrell A.H. Theory of brittle fracture in steel and similar metals // Trans. Met. Soc. AIME. 1958. V. 212. P. 192.
 17. Stroh A.N. The formation of cracks as a result of plastic flow // Proc. Roy. Soc. A. 1954. V. 223. P. 404.
 18. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А., Шуклинов А.В., Денисов А.А. Динамика деформационных полос и разрушение алюминий-магниевого сплава АМг6 // Физика твердого тела. 2011. Т. 53. № 10. С. 1873-1878.
 19. Партон В.З. Механика разрушения. М.: Изд-во ЛКИ, 2010. 240 с.
 20. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. М.: Металлургия, 1984. 280 с.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России (№ 3.8515.2017\БЧ).

Поступила в редакцию 29 июня 2017 г.

Шибков Александр Анатольевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Желтов Михаил Александрович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Гасанов Михаил Фахрадинович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, инженер кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Золотов Александр Евгеньевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

UDC 539.374

DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1092-1099

DYNAMICS OF MACROLOCALIZATION OF PLASTIC STRAIN AND FRACTURE IN ALUMINUM-MAGNESIUM ALLOY WITH GEOMETRIC STRESS CONCENTRATOR

© A.A. Shibkov, M.A. Zheltov, M.F. Gasanov, A.E. Zolotov

Tambov State University named after G.R. Derzhavin

33 Internatsionalnaya St., Tambov, Russian Federation, 392000

E-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Effect of the geometrical stress concentrator on the spatio-temporal localization of deformation and fracture of aluminum-magnesium AlMg6 alloy demonstrating the Portevin–Le Chatelier effect at the room temperature was investigated in situ by optic method with using videotaping with sampling rate about 20000 frames/s. It was established that the stress concentrator in shape of small notch with depth about 1 % of width of sample is an attractor of macrolocalized band of plastic strain beginning from Luders band and finishing of the main crack start. The key role of an intersecting macrobands in development of main crack is revealed. Possible mechanism of ductile fracture connected with the dynamics of the band interaction is discussed.

Keywords: the Luders band; the Portevin–Le Chatelier effect; magistral crack; aluminum-magnesium alloy

REFERENCES

1. Bell Dzh.F. *Eksperimental'nye osnovy mekhaniki deformiruemyykh tverdykh tel* [Experimental Mechanic Basis of the Deformable Solid]. Moscow, Nauka Publ., 1984, pt. 2, 432 p. (In Russian).
2. Yilmaz A.J. The Portevin–Le Chatelier effect: a review of experimental findings. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2011, vol. 12, p. 1.
3. Shibkov A.A., Zolotov A.E., Zheltov M.A. Mekhanizmy zarozhdeniya polos makrolokalizovannoy deformatsii [Nucleation mechanisms of macrolocalized deformation bands]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya Fizicheskaya – Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2012, vol. 76, no. 1, p. 97. (In Russian).
4. Klueh R.L., King J.F. Creep and creep rupture of ERNiCr-3 weld metal. *J. Nuclear Mater.*, 1981, vol. 98, no. 1-2, p. 173.
5. 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, vol. 86, p. 37.

6. Estrin Y., Kubin L.P. Spatial coupling and propagative plastic instabilities. *Continuum models for materials with microstructure*. H.-B. Mühlhaus (ed.). New York, Wiley & Sons, 1995, p. 395.
7. Shibkov A.A., Mazilkin A.A., Ppotasova S.G., Mikhlik D.V., Zolotov A.E., Zheltov M.A., Shuklinov A.V. Vliyanie sostoyaniya primesey na skachkoobraznuyu deformatsiyu splava AMg6 [The influence of alloys' condition on abrupt deformation of alloy AMg6]. *Deformatsiya i razrushenie materialov – Russian Metallurgy (Metally)*, 2008, no. 5, pp. 24–32. (In Russian).
8. Shibkov A.A., Lebedkin M.A., Zheltov M.A., Skvortsov V.V., Koltsov P.Yu., Shuklinov A.V. Complex in situ methods of metals jump plastic deformation study. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Industrial Laboratory. Materials Diagnostics*, 2005, vol. 71, no. 7, pp. 20–27.
9. Shibkov A.A., Zolotov A.E. Nelineynaya dinamika prostranstvenno-vremennykh struktur makrolokalizovannoy deformatsii [Nonlinear dynamics of the spatio-temporal pattern of a macroscopically localized deformation]. *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki – JETP Letters*, 2009, vol. 90, no. 5, pp. 412–417. (In Russian).
10. Shibkov A.A., Zolotov A.E., Zheltov M.A. Akusticheskiy predvestnik neustoychivoy plasticheskoy deformatsii alyuminiy-magnievogo splava AMg6 [Acoustic precursor of unstable plastic deformation in the aluminum-magnesium alloy AMg6]. *Fizika tverdogo tela – Physics of the Solid State*, 2010, vol. 52, no. 11, pp. 2223–2231. (In Russian).
11. Klose F.B., Hagemann F., Hähner P., Neuhauser H. Investigation of the Portevin–Le Châtelier effect in Al–3wt. % Mg alloys by strain-rate and stress-rate controlled tensile tests. *Mat. Sci. Eng. A*, 2004, vol. 93, p. 387.
12. Chmelik F., Klose F.B., Dierke H., Sachl J., Neuhauser H., Lukac P. Investigating the Portevin–Le Châtelier effect in strain rate and stress rate controlled tests by the acoustic emission and laser extensometry techniques. *Mat. Sc. Eng. A*, 2007, vol. 462, p. 53.
13. Panin V.E., Derevyagina L.S., Deryugin E.E., Panin A.V., Panin S.V., Antipina N.A. Zakonomernosti stadii predrazrusheniya v fizicheskoy mezomekhanike [Prefracture stage mechanisms in physical mesomechanics]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2003, vol. 6, no. 6, pp. 97–106. (In Russian).
14. Panin V.E., Grinyaev Yu.V. Fizicheskaya mezomekhanika – novaya paradigma na styke fiziki i mekhaniki deformiruemogo tverdogo tela [Physical mesomechanics: a new paradigm at the interface of solid state physics and solid mechanics]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2003, vol. 6, no. 4, pp. 9–36. (In Russian).
15. Derevyagina L.S., Panin V.E., Gordienko A.I. Samoorganizatsiya plasticheskikh sdvigo v makropolosakh lokalizovannoy deformatsii v sheyke vysokoprochnykh polikristallov i ee rol' v razrushenii materiala pri odnoosnom rastyazhenii [Self-Organization of Plastic Shears in Localized Deformation Macrobands in the Neck of High-Strength Polycrystals and Its Role in Material Fracture under Uniaxial Tension]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2007, vol. 10, no. 4, pp. 59–71. (In Russian).
16. Cottrell A.H. Theory of brittle fracture in steel and similar metals. *Trans. Met. Soc. AIME*, 1958, vol. 212, p. 192.
17. Stroh A.N. The formation of cracks as a result of plastic flow. *Proc. Roy. Soc. A*, 1954, vol. 223, p. 404.
18. Shibkov A.A., Zolotov A.E., Zheltov M.A., Shuklinov A.V., Denisov A.A. Dinamika deformatsionnykh polos i razrushenie alyuminiy-magnievogo splava AMg6 [Dynamics of straining lines and destruction of aluminum-magnesium alloy]. *Fizika tverdogo tela – Physics of the Solid State*, 2011, vol. 53, no. 10, pp. 1873–1878. (In Russian).
19. Parton V.Z. *Mekhanika razrusheniya* [Destruction mechanics]. Moscow, LKI Publ., 2010, 240 p. (In Russian).
20. Vladimirov V.I. *Fizicheskaya priroda razrusheniya metallov*. Moscow, Metallurgy Publ., 1984, 280 p. (In Russian).

ACKNOWLEDGEMENTS: The study is fulfilled within the framework of state assign of Ministry of Education and Science of Russia (no. 3.8515.2017\БЧ).

Received 29 June 2017

Shibkov Aleksander Anatolyevich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Professor of Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Zhelto Mikhail Aleksandrovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Gasnov Mikhail Fakhraddinovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Engineer of Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Zolotov Aleksander Evgenyevich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Technics, Associate Professor of Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Для цитирования: *Шибков А.А., Желтов М.А., Гасанов М.Ф., Золотов А.Е.* Динамика макролокализации пластической деформации и разрушение алюминий-магниевого сплава с геометрическим концентратором напряжения // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2017. Т. 22. Вып. 5. С. 1092-1099. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1092-1099

For citation: *Shibkov A.A., Zheltov M.A., Gasanov M.F., Zolotov A.E.* Dinamika makrolokalizatsii plasticheskoy deformatsii i razrushenie alyuminiy-magnievogo splava s geometricheskim konsentratorom napryazheniya [Dynamics of macrolocalization of plastic strain and fracture in aluminum-magnesium alloy with geometric stress concentrator]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2017, vol. 22, no. 5, pp. 1092–1099. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1092-1099 (In Russian, Abstr. in Engl.).