

УДК 539.3

РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ ПРЕРЫВИСТОЙ ДЕФОРМАЦИИ

© В.А. Аверков, А.А. Денисов, А.Е. Золотов,
М.А. Желтов, А.В. Шуклинов, А.А. Шибков

Ключевые слова: прерывистая деформация; полосы деформации; скейлинг; алюминий-магниевый сплав. Экспериментально исследованы характеристики прерывистой деформации сплава АМг6 для плоских образцов разной толщины, деформируемых с одинаковой скоростью возрастания напряжения. Обнаружен переход от ступенчатых к гладким кривым нагружения при уменьшении толщины образца до 40 мкм. С ростом толщины до 80 мкм появляются первые полосы деформации, которые рассматриваются как «кванты» макроскопической деформации.

ВВЕДЕНИЕ

Скачкообразная деформация металлов и сплавов проявляется в виде ступеней на кривых ползучести («лестничная» ползучесть), на кривых нагружения с постоянной скоростью роста нагрузки (эффект Савара–Массона) и в виде повторяющихся сбросов нагрузки на кривых деформирования с постоянной скоростью (эффект Портевена–Ле Шателье (ПЛШ)) [1]. Прерывистую деформацию обычно рассматривают как существенно макроскопический эффект. В то же время в последнее время появились публикации по эффекту Портевена–Ле Шателье при наноиндентировании алюминий-магниевого поликристаллического сплава [2] и эффекту Савара–Массона при сжатии щелочно-галлоидных монокристаллов [3]. В связи с этим возникает вопрос о скейлинге, т. е. о масштабном диапазоне, в котором наблюдаются прерывистая деформация и, соответственно, полосы деформации. В настоящей статье представлены результаты исследования характеристик прерывистой деформации и полосообразования при уменьшении толщины плоского образца, деформируемого растяжением с постоянной скоростью роста приложенного напряжения $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$.

МЕТОДИКА

Типичными модельными материалами для изучения природы скачкообразной деформации металлов, деформируемых скольжением, являются сплавы системы Al-Mg с содержанием магния от 2 до 6 %. Среди них особый интерес представляет алюминий-магниевый сплав АМг6 в связи с его широким применением при производстве летательных аппаратов и автомобилей. Полоса сплава АМг6 шириной 20 мм и толщиной 1 мм подвергалась холодной прокатке на 20 % в электрометаллических вальцах Cavallin M 120. Затем полосу отжигали в течение часа при 400 °С и снова прокатывали на 20 % и т. д. Таким методом приготавливали полосы толщиной 0,8, 0,55, 0,3, 0,2 и 0,1 мм. Дальнейшее уменьшение толщины полосы производили химиче-

ской электрополировкой в спиртовом растворе, содержащем 20 % HClO_4 и 10 % глицерина (плотность тока 1 А/см²) до толщины соответственно 80 мкм, 60 мкм и 40 мкм. Из этих полос приготавливали затем образцы в форме двухсторонних лопаток с размером рабочей части 6×3 мм.

Образцы отжигали в течение 1 часа при температуре 400 °С, закаливали на воздухе и растягивали до разрушения с одинаковой скоростью возрастания напряжения ($\dot{\sigma}_0 = 0,2$ МПа/с) при комнатной температуре в мягкой испытательной машине.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 и 2 представлены типичные кривые растяжения сплава АМг6 разной толщины. Кривая растяжения образцов толщиной 1 мм, т. е. с соотношением ширина/толщина $k = 3$, содержит обычно 8–9 ступеней с возрастающей амплитудой до ~ 10 % перед разрывом. Длительность фронта ступеней $t_{fr} \approx 300\text{--}500$ мс. С уменьшением толщины листа и соответственно ростом коэффициента формы k происходят следующие основные изменения. В интервале толщин $d = 300\text{--}100$ мкм и соответственно $k = 3\text{--}10$ каждая ступень «разваливается» на несколько, 5–6, мелких ступенек амплитудой ~ 1 % и длительностью фронта ~ 300 мс. Суммарная длительность такой сложной ступени (суперступени) составляет 15–20 с. Количество суперступеней на всей кривой нагружения обычно 5–6, а мелких ступеней – 25–30.

При толщине образца 80 мкм ($k = 37,5$) амплитуда скачков падает на два порядка, а их количество увеличивается соответственно почти в сто раз. Происходит переход прерывистой деформации с макроскопического на мезоскопический структурный уровень с ростом коэффициента формы k от ~ 10 до ~ 75. При дальнейшем уменьшении толщины листа происходит постепенное сглаживание кривой нагружения, и при $d = 40$ мкм ($k = 75$) кривая растяжения при данной скорости нагружения и температуре испытания имеет монотонный характер, т. е. не содержит ступеней. Видео-

съемка не выявляет наличие полос макролокализованной деформации, за исключением полос, которые появляются за $\approx 0,3\text{--}0,5$ с до разрыва.

Таким образом, с уменьшением толщины листа и соответственно ростом k в интервале $\approx 10\text{--}75$ происходит переход от ступенчатых к гладким кривым нагружения. Поэтому домен неустойчивой деформации должен строиться не только в зависимости от температур и скорости нагружения (деформирования), но и от отношения $k = w/d$ (где w – ширина рабочей части образца), которое, видимо, характеризует уровень запасенной упругой энергии, необходимой для развития крупной дислокационной лавины, вызывающей скачок деформации.

Для построения домена неустойчивой деформации в фазовом пространстве « $\dot{\sigma}_0 - T - k$ » необходимы дальнейшие систематические исследования обнаруженного размерного эффекта прерывистой деформации.

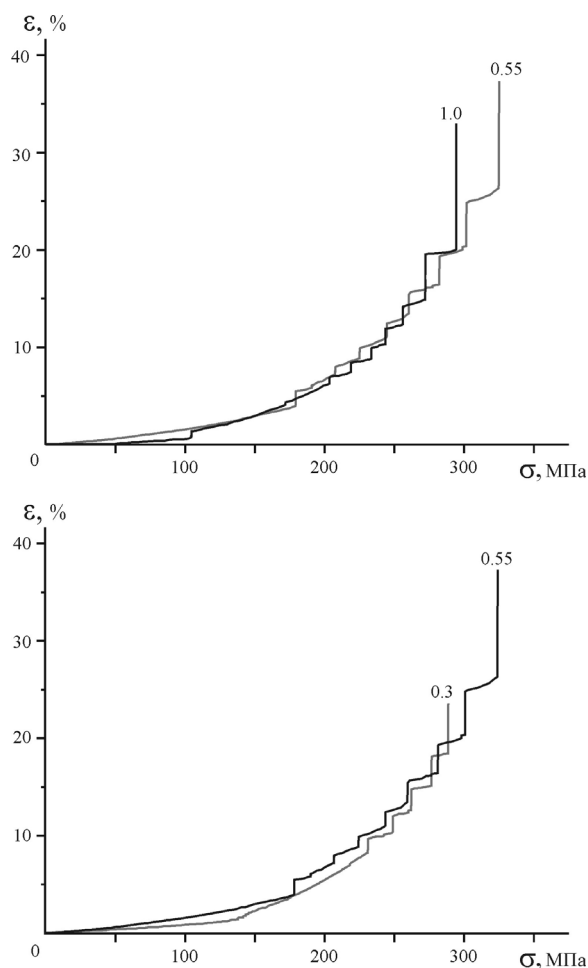


Рис. 1. Кривые нагружения « $\varepsilon - \sigma$ » плоских образцов сплава АМг6 толщиной 1,0, 0,55, 0,3 мм. Температура отжига 400 °С. Скорость нагружения $\dot{\sigma}_0 = 0,2$ МПа/с. Температура испытания 23 °С. Цифрами отмечена толщина образцов в мм

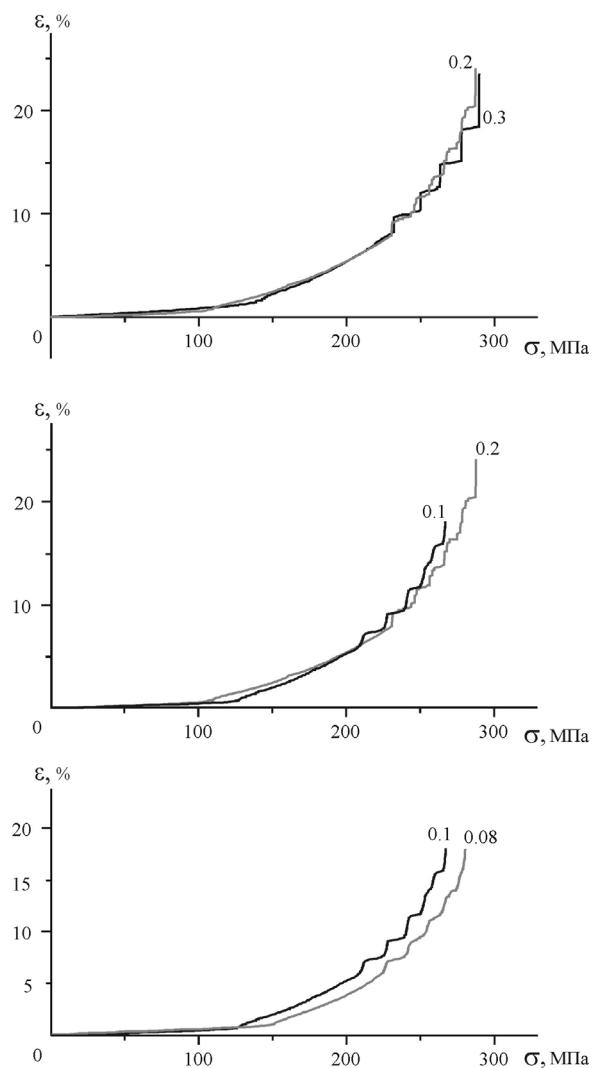


Рис. 2. Кривые нагружения « $\varepsilon - \sigma$ » плоских образцов сплава АМг6 толщиной 0,3, 0,2, 0,1, 0,08 мм. Температура отжига 400 °С. Скорость нагружения $\dot{\sigma}_0 = 0,2$ МПа/с. Температура испытания 23 °С. Цифрами отмечена толщина образцов в мм

ВЫВОДЫ

1. Обнаружен размерный эффект прерывистой деформации, состоящий в переходе от прерывистой к монотонной деформации сплава АМг6 при уменьшении толщины листа от 300 мкм до 40 мкм. Переход имеет несколько стадий. В интервале толщин от 300 до 200 мкм крупные скачки амплитудой 3–5 % и длительностью фронта около 0,5 с «разваливаются» на 5–6 мелких длительностью каждый 0,3–0,5 с. При толщине листа 80 мкм количество скачков увеличивается на два порядка, а их амплитуда соответственно падает почти в 100 раз, и при толщине 40 мкм деформационные скачки и полосы деформации не наблюдаются.
2. Эффекты Портевена–Ле Шателье, Савара–Массона и связанные с ними процессы локализации деформации в полосах считаются макроскопическими

эффектами. В настоящей работе впервые количественно экспериментально определена нижняя граница прерывистой деформации для сплава АМг6. При уменьшении толщины листа до 40–60 мкм макроскопическая прерывистая деформация полностью подавляется. С ростом толщины до 80 мкм появляются первые полосы макролокализованной деформации, которые вызывают появление макроскачков на кривых нагружения. Эти полосы можно рассматривать как «кванты» макролокализованной деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. М.: Наука, 1984. Ч. 2. 432 с.
2. Головин Ю.И., Иволгин В.И., Лебедин М.А., Сергунин Д.А. Область существования эффекта Портевена–Ле Шателье в условиях непрерывного индентирования сплава Al-2,7%Mg при комнатной температуре // Физика твердого тела. 2004. Т. 46. № 9. С. 1618–1620.
3. Dunin-Barkowski L., Morgunov R., Tanimoto Y. Discontinuity of plastic flow controlled by magnetic field in NaCl:Eu crystals // Solid State Phenomena. 2006. № 115. P. 183–192.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Поступила в редакцию 30 ноября 2010 г.

Averkov V.A., Denisov A.A., Zolotov A.Ye., Zheltov M.A., Shuklinov A.V., Shibkov A.A. Scale effect of jerky flow

The characteristics of jerky flow of the plate samples of different thickness of AMg6 alloy deformed with identical velocity of loading are experimentally investigated. The transition from stepped to smooth loading curves with the decrease of thickness to 40 μm is found. The first deformation bands emergence at the sample thickness 80 μm which can be considered as “quants” of macroscopic deformation.

Key words: jerky plastic deformation; deformation bands; scaling; aluminum-magnesium alloy.