

УДК 539.3

## ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕРЫВИСТОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВА АМГ6

© Е.В. Выжанов, А.А. Денисов, А.Е. Золотов, А.А. Шибков

*Ключевые слова:* прерывистая деформация; холодная прокатка; полосы деформации; алюминий-магниевый сплав АМГ6.

Проведены исследования характеристик прерывистой деформации алюминий-магниевого сплава АМГ6 в зависимости от степени предварительного обжатия плоских образцов. Установлено, что холодное обжатие на 20 % отожженного листа и последующий отпуск дает эффект упрочнения на 15–20 % и полностью подавляет прерывистую деформацию до стадии предразрушения.

Неустойчивая пластическая деформация на макро-скопическом структурном уровне проявляется в виде ступеней на кривых нагружения с постоянной скоростью  $\dot{\sigma}_0 = \text{const}$  (эффект Савара-Массона [1]) и в виде повторяющихся сбросов напряжения при деформировании с постоянной скоростью  $\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$  (эффект Портевена–Ле Шателье [2]). В обоих случаях скачки на диаграмме растяжения (сжатия) сопровождаются зарождением и распространением полос макролокализованной деформации [2, 3–5]. Деформационные полосы создают технологический брак листового проката сплавов на алюминиевой основе, используемых в самолетостроении и в автопроме. Они вызывают преждевременную коррозию и разрушение.

Для развития дислокационной лавины, вызывающей скачок деформации, необходимы не только достаточно сильные барьеры движению дислокации, на которых они должны скапливаться, но и достаточно большая длина «свободного пробега» дислокаций. Предварительная холодная пластическая деформация увеличивает скалярную плотность статистически накопленных дислокаций и, соответственно, уменьшает длину дислокационного пробега, что может предотвратить развитие крупных дислокационных лавин и подавить прерывистое пластическое течение. Ниже представлены основные результаты исследования характеристик прерывистой деформации, в зависимости от степени холодного обжатия отожженного листового проката.

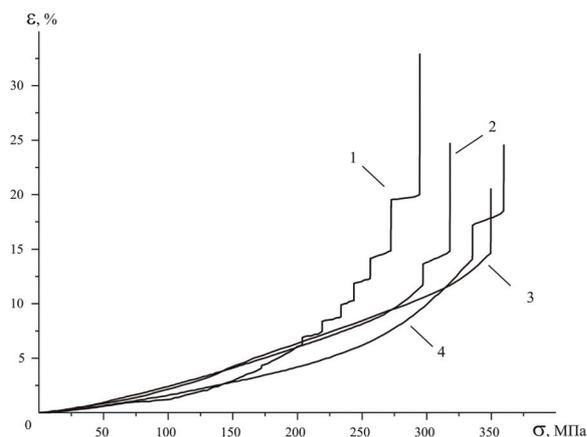
Материалом исследования служила холоднокатаная отожженная полоса сплава АМГ6 шириной 20 мм. Холодное обжатие проводили в электромеханических вальцах «Cavallin M 120» на 10 % и на 20 %. После обжатия часть образцов растягивали с постоянной скоростью роста напряжения в мягкой испытательной машине, а другую часть образцов стабилизировали при температуре 140 °С в течение 3 часов, охлаждали с печью и затем нагружали в точно таких же условиях.

На рис. 1 представлены типичные кривые нагружения этих образцов с одинаковой скоростью  $\dot{\sigma}_0 =$

$= 0,2$  МПа/с для разных степеней обжатия. Эти кривые сравнивались с кривой нагружения рекристаллизованного при 450 °С образца толщиной 1 мм, которая содержит обычно около 10 скачков деформации (кривая 1). Видно, что обжатие листа толщиной 1 мм на 10 %, до 0,9 мм, сопровождается увеличением коэффициента упрочнения вдоль большей части кривой деформации, прочностю  $\sigma_B$ , уменьшением пластичности и уменьшением количества скачков до одного (кривая 2). Кроме того, первая критическая деформация увеличивается более чем в два раза, а напряжение появления первого деформационного скачка увеличивается со 170 МПа до почти 300 МПа. Обжатие на 20 % приводит к полному подавлению скачков деформации, дальнейшему увеличению прочности и уменьшению пластичности (кривая 3). Однако такой способ подавления прерывистой деформации не может быть рекомендован к практическому применению, т. к. после прокатки структуру сплава необходимо стабилизировать.

Для стабилизации структуры сплава образцы, изготовленные из обжатого на 20 % листа сплава АМГ6, подвергались отпуску при 140 °С в течение трех часов. Кривая нагружения сплава, термообработанного таким образом, содержит один скачок (рис. 1 кривая 4). Из всех представленных режимов механической и термообработки последний режим дает максимальную прочность  $\sigma_B = 360$  МПа без потери пластичности,  $\delta \approx 25$  %, большой коэффициент упрочнения до напряжения около 270 МПа и максимальное напряжение появления первого деформационного скачка  $\sigma_c \approx 340$  МПа, что превышает предел прочности отожженного сплава АМГ6  $\sigma_B \approx 300$  МПа.

Поэтому такой режим механической и термообработки может быть рекомендован для подавления прерывистой деформации Савара–Массона в сплаве АМГ6. Для разработки более конкретных рекомендаций подавления прерывистой деформации в холоднокатаном сплаве АМГ6 необходимы дальнейшие исследования влияния степени обжатия, температурно-скоростных условий нагружения, толщины образца, времени и температуры отпуска.



**Рис. 1.** Влияние обжатия на кривые нагружения сплава АМгб: 1 – отожженный лист толщиной  $d = 1$  мм; 2 – после обжатия на 10 %,  $d = 0,9$  мм; 3 – после обжатия на 20 %,  $d = 0,8$  мм; 4 – после обжатия на 20 % и отжига при 140 °С в течение 3 часов

Физический смысл полученного в работе результата состоит в том, что при температуре 140 °С происходят процессы, характерные для возврата первого рода (локальное перемещение дислокаций под действием внутренних напряжений, некоторое уменьшение плотности дислокаций вследствие их частичной аннигиляции и уменьшение избыточной концентрации вакансий из-за их миграции в различные стоки в кристалле) и для искусственного старения. Упрочнение происходит, в основном, за счет выделения частиц неравновесной  $\beta'$ -фазы, которая со временем трансформируется в равновесную  $\beta$ ( $Al_3Mg_2$ )-фазу.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально получен способ подавления прерывистой деформации алюминий-магниевого сплава АМгб: установлено, что холодное обжатие рекристаллизованного листа на 20 % и последующий отпуск при 140 °С дает

эффект упрочнения на 15–20 % и полностью подавляет прерывистую деформацию вплоть до стадии предразрушения. Этот способ может быть рекомендован для практического применения в технологии металлообработки проката промышленных сплавов системы Al-Mg.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. М.: Наука, 1984. Ч. 2. 432 с.
2. Estrin Y., Kubin L.P. Spatial coupling and propagative plastic instabilities // *Continuum models for materials with microstructure* / ed. by H.-B. Muhlhaus. N. Y.: Wiley & Sons, 1995. P. 395-450.
3. Шибков А.А., Кольцов Р.Ю., Желтов М.А., Шуклинов А.В., Лебедев М.А. Динамика спонтанной делокализации пластической деформации при неустойчивом пластическом течении сплавов Al-Mg // *Известия РАН. Серия физическая*. 2006. Т. 70. № 9. С. 1372-1376.
4. Шибков А.А., Золотов А.Е. Нелинейная динамика пространственно-временных структур макролокализованной деформации // *Письма в ЖЭТФ*. 2009. Т. 90. № 5. С. 412-417.
5. Chihab K., Estrin Y., Kubin L.P., Vergnol J. The kinetics of the Portevin-Le Chatelier effect in an Al-5at%Mg alloy // *Scripta Metall.* 1987. V. 21. P. 203-208.

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Работа выполнена в рамках реализации аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)», рег. номер проекта 2.1.1/2747.

Поступила в редакцию 30 ноября 2010 г.

Vyzhanov Ye.V., Denisov A.A., Zolotov A.Ye., Shibkov A.A. Influence of preliminary deformation on characteristics of jerky plastic flow of AMg6 alloy

The characteristics of jerky of aluminum-magnesium AMg6 alloy versus the level of predeformation by cold rolling are investigated. It is established that cold rolling on 20 % of the recrystallized sheet and recovery give the strength effect on 15–20 % and completely depress the jerky flow along to the prefracture stage.

*Key words:* jerky plastic deformation; cold rolling; deformation bands; aluminum-magnesium alloy.