

05

## **Влияние структуры ультрамелкозернистого алюминиевого сплава 1420 на лазерную размерную обработку**

© П.Ю. Кикин, В.Н. Перевезенцев, А.И. Пчелинцев, Е.Е. Русин

Институт машиноведения РАН (Нижегородский филиал),  
Нижний Новгород  
E-mail: rusin@mech.unn.ru

Поступило в Редакцию 25 апреля 2006 г.

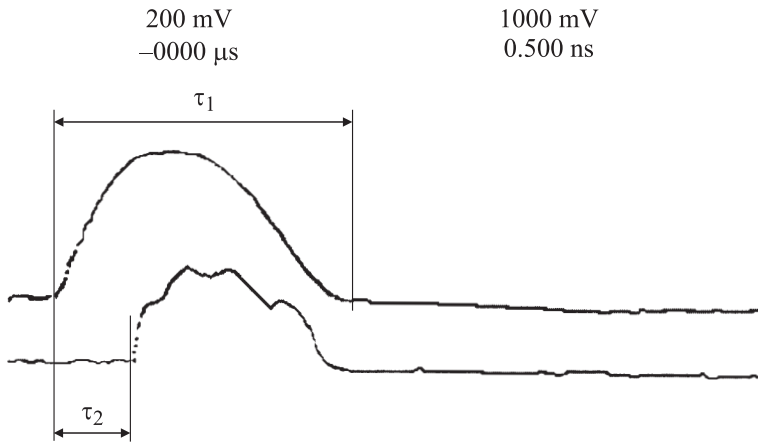
Показано, что образование отверстия в ультрамелкозернистой структуре алюминиевого сплава 1420 под действием одиночных лазерных импульсов одинаковой энергии происходит за меньшее время по сравнению с крупнокристаллической структурой этого же сплава.

PACS: 61.82.Rx

В настоящее время освоены технологии получения тонких пластин с УМЗ-структурой, для которых при изготовлении изделий возможно применение лазерных технологий, в частности размерной обработки.

В работах [1,2] было установлено, что воздействие лазерного излучения на ультрамелкозернистый (УМЗ) и крупнокристаллический (КК) сплав 1420 приводит к различным изменениям его структуры и фазового состава.

В представленной работе исследовано образование отверстий при лазерной размерной обработке в алюминиевом УМЗ-сплаве 1420 (Al–5.5%Mg–2.2%Li–0.12%Zr), полученном методом равноканального углового прессования (РКУП), и том же сплаве в КК-состоянии. Структура УМЗ-сплава характеризуется средним размером зерна  $\sim 0.5 \mu\text{m}$ , средний размер зерна в КК-сплаве составляет  $100 \mu\text{m}$ . Фазовый анализ показал, что в УМЗ-сплаве на границах зерен присутствуют выделения частиц  $S$ -фазы ( $\text{Al}_2\text{LiMg}$ ), размер которых не превышает  $0.2\text{--}0.4 \mu\text{m}$  [3,4].

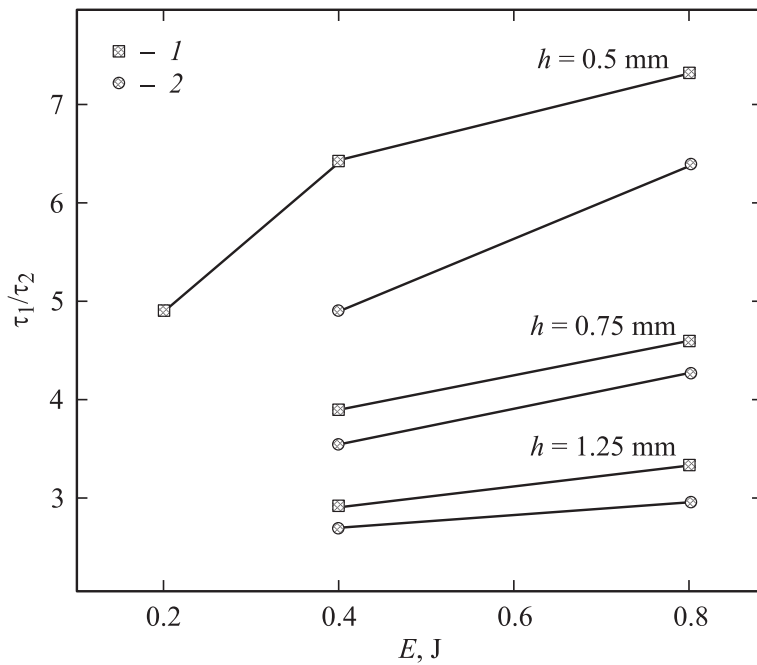


**Рис. 1.** Оциллограмма, полученная в экспериментах.

Для проведения исследований была разработана установка, основу которой составлял импульсный лазер на алюмоиттриевом гранате, работающий в режиме свободной генерации (длительность импульса излучения  $\tau_1 \sim 200 \mu\text{s}$ , энергия излучения изменялась в диапазоне от 0.2 до 0.8 Дж). Для регистрации импульса излучения лазера и импульса, прошедшего через полученное отверстие в тонколистовом образце исследуемого материала, использовались два фотодатчика, перед которыми были установлены фильтры, пропускавшие только излучение лазера ( $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ). Регистрация сигналов производилась осциллографом С8-9.

По разнице времени между передними фронтами импульсов, регистрируемых фотодатчиками, определялось время образования отверстия в образце ( $\tau_2$ ). На рис. 1 представлены типичные оциллограммы, полученные в экспериментах.

Как показали проведенные исследования, характер образования отверстий в УМЗ- и КК-образцах сплава 1420 различен. На рис. 2 приведены зависимости отношения  $\tau_1/\tau_2$  от энергии лазерного излучения ( $E$ ) для УМЗ- и КК-структуры при трех фиксированных толщинах образцов ( $h = 0.5, 0.75$  и  $1.25 \text{ mm}$ ). Видно, что образование отверстия в образцах с УМЗ-структурой происходит за меньшее время по сравнению с



**Рис. 2.** Зависимость отношения  $\tau_1/\tau_2$  от энергии лазерного излучения (J) для УМЗ- и КК-структуры при трех фиксированных толщинах образцов:  $h = 0.5$ ;  $0.75$  и  $1.25$  mm (1 — УМЗ-структура, 2 — КК-структура).

временем образования отверстия в КК-образцах. В случае малых энергий излучения ( $E = 0.2$  J) образование отверстия в КК-образце не происходит, а в образце с УМЗ-структурой наблюдается. Характерно, что диаметры входных отверстий у УМЗ-образцов заметно (до  $\sim 20\%$ ) больше, чем у образцов с КК-структурой.

Таким образом, процессы образования отверстий в образцах сплава 1420 с УМЗ-структурой под действием лазерного импульсного излучения протекают быстрее, чем у того же сплава с КК-структурой. Обсудим возможные причины этого явления. Нетрудно показать, что, несмотря на высокую запасенную удельную энергию в УМЗ-образцах в виде энергии границ зерен и энергии дефектов в границах (дислокаций,

дисклинаций), этот фактор не может существенно влиять на процесс плавления. Теоретическая оценка показывает, что при типичных значениях удельной поверхностной энергии границ зерен

$$\gamma_b \sim Ga/24 \quad (1)$$

( $G$  — модуль сдвига,  $a$  — постоянная решетки) и плотности дислокаций в границах  $\rho_b \sim 10^6 \text{ см}^{-1}$  рассчитанная на один атом запасенная энергия для УМЗ-сплава с размером зерна  $\sim 0.5 \mu\text{м}$  составляет всего сотые доли  $kT_m$  ( $k$  — постоянная Больцмана,  $T_m$  — температура плавления). На наш взгляд, причина наблюдаемого эффекта заключается в различии фазового состава КК- и УМЗ-образцов. В результате РКУП происходят не только измельчение зеренной структуры и формирование неравновесных большеугловых границ, содержащих высокую плотность дефектов, но и существенное изменение фазового состава материала. Значительная часть растворенных элементов, таких как Mg, Li, выходит из объема зерен на границы. Обогащение границ растворенными элементами (межкристаллитная внутренняя адсорбция) может приводить к радикальному изменению локального химического состава границ зерен. При этом границы зерен можно рассматривать как тонкие прослойки другой фазы, имеющей отличные от объема зерен температуру плавления и теплопроводность. Отметим, что уменьшение локальной температуры плавления границ зерен  $T_i^0$  по сравнению с температурой солидуса  $T_s^0$  наблюдалось в ряде алюминиевых УМЗ-сплавов, полученных методом механического легирования. Однако величина отклонения  $T_s^0 - T_i^0$ , как правило, невелика. Так, например, в сплаве IN905XL системы Al–Mg–Zr (близким по составу к сплаву 1420) разность температур ( $T_s^0 - T_i^0$ ) составляет всего  $14^\circ\text{C}$  [5]. Поэтому возможное в УМЗ-сплаве 1420 уменьшение локальной температуры плавления границ зерен не может быть основным фактором, влияющим на уменьшение  $\tau_2$  в УМЗ-сплаве по сравнению с КК-образцом.

Более вероятным представляется влияние изменения фазового состава границ на теплопроводность УМЗ-материала. Если предположить, что локальная теплопроводность межзеренных прослоек в результате обогащения их растворенными элементами существенно понижается, то в УМЗ-структуре это приведет к существенному снижению средней теплопроводности сплава. Очевидно, что это должно приводить к затруднению оттока тепла из области воздействия лазерного излучения

и уменьшению энергии (а следовательно, и  $\tau_2$ ), необходимой для расплавления материала при образовании отверстия в УМЗ-сплаве по сравнению с его КК-состоянием.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 05-08-17955.

## Список литературы

- [1] *Кикин П.Ю., Пчелинцев А.И., Русин Е.Е.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 21. С. 7–10.
- [2] *Кикин П.Ю., Пчелинцев А.И., Русин Е.Е., Щербань М.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 1. С. 3–6.
- [3] *Валиев Р.З., Александров И.В.* Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.
- [4] *Гусев А.И., Ремпель А.А.* Нанокристаллические материалы. М.: Академкнига, 2000. 224 с.
- [5] *Higashi K.* // Superplasticity: 60 Years after Pearson. 1995. Bourne Press, UK. P. 93–102.