

05;06;13

О влиянии порообразования на отражающую способность алюминиевого сплава 1421 во время действия лазерного импульса

© П.Ю. Кикин, В.Н. Перевезенцев, Е.Е. Русин

Институт проблем машиностроения РАН (ИПМ РАН), Нижний Новгород
E-mail: pevnp@uic.nnov.ru

Поступило в Редакцию 18 сентября 2013 г.

Показано, что появление микропор приводит к увеличению отражающей способности алюминиевого сплава 1421, а в осциллограмме отраженного сигнала содержится информация о начале и продолжительности процесса порообразования в приповерхностном слое материала во время действия лазерного импульса.

В работах [1–3] были исследованы закономерности структурных изменений, происходящих в алюминиевых сплавах при воздействии лазерных импульсов. В частности, в [1] было показано, что такое воздействие может приводить к появлению на поверхности сплавов микрократеров, возникающих вследствие слияния неравновесных вакансий и образования вакансионных пор. В указанных работах появление пор регистрировалось оптическим методом, путем наблюдения поверхности образцов после каждого лазерного импульса.

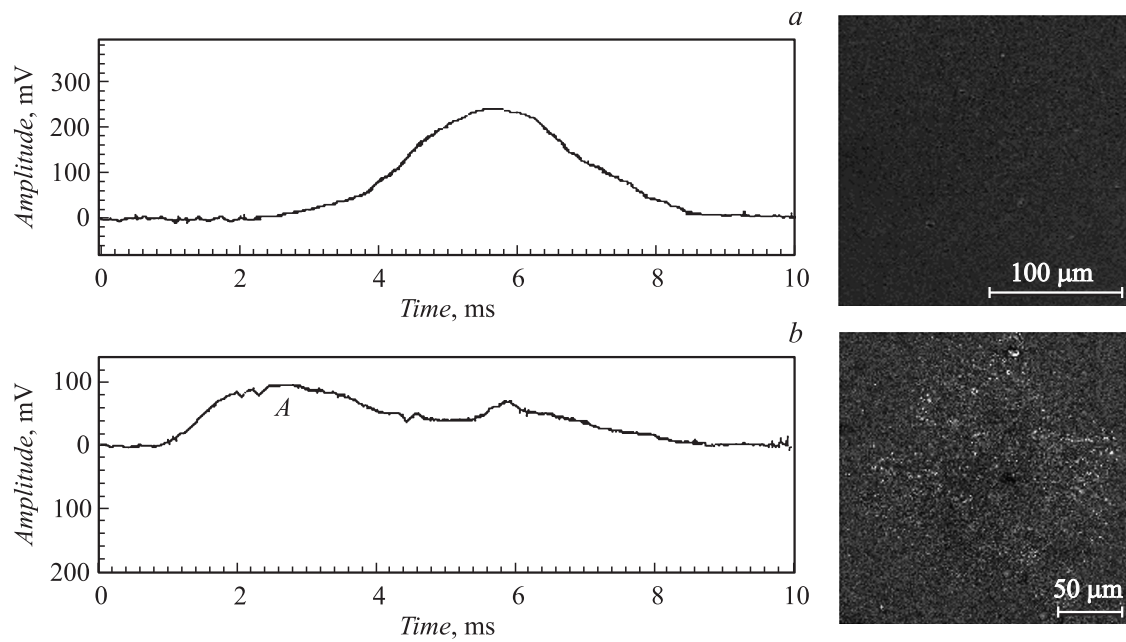
В данной работе проведено исследование кинетики отражающей способности в процессе действия одиночных лазерных импульсов с различными плотностями мощности, целью которого было показать, что появление микропор можно регистрировать непосредственно в ходе импульсного лазерного воздействия, анализируя осциллограммы отраженного сигнала.

Исследования проводились на образцах алюминиевого сплава 1421 (Al–5.5% Mg–2.2% Li–0.12% Zr–0.2% Sc) с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, полученной методом равноканально-углового прессования (РКУП) [4] со средним размером зерна $\sim 1 \mu\text{m}$. Для облучения образцов использовался импульсный YAG : Nd³⁺-лазер, ра-

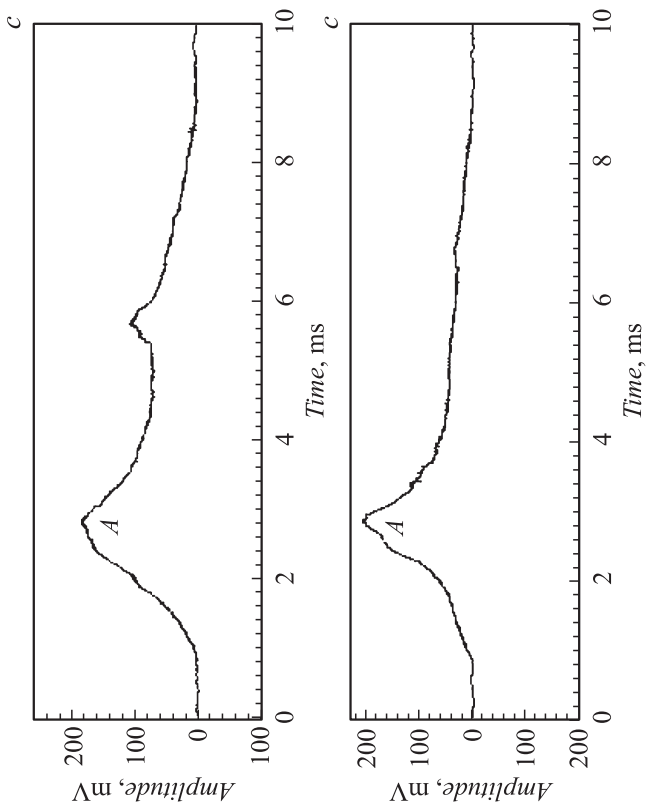
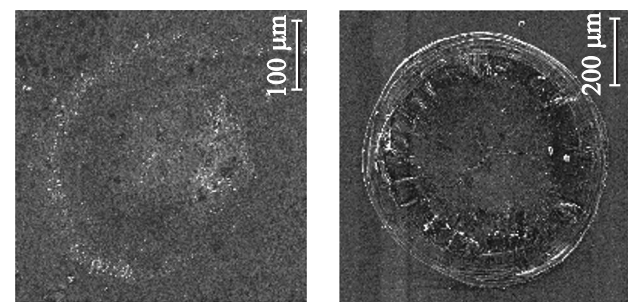
ботавший в режиме свободной генерации с энергией излучения до 25 J. Изменение отражающей способности поверхности в процессе действия лазерного импульса регистрировалось фотодатчиками по методике [1]. В ходе экспериментов проводилось изменение отражающей способности поверхности при облучении одиночными лазерными импульсами с различными плотностями мощности излучения $P_0 \approx 9.0 \cdot 10^4$, $P_1 \approx 1.4 \cdot 10^5$, $P_2 \approx 1.6 \cdot 10^5$, $P_3 \approx 1.8 \cdot 10^5$ W/cm².

Как показали металлографические исследования, облучение сплава лазерным импульсом с плотностью мощности P_0 не вызывает изменения рельефа поверхности, а облучение импульсом P_1 приводит к образованию в приповерхностном слое микрократеров, вызванных накоплением вакансионных пор [3]. При облучении импульсом с более высокой плотностью мощности $P_2 > P_1$ на поверхности образуется зона расплава, окруженная микрократерами, а при воздействии импульсом P_3 ($P_3 > P_2$) — только область оплавления. Рельеф поверхности, полученный в результате воздействия лазерных импульсов излучения P_0 , P_1 , P_2 и P_3 , и соответствующие осциллограммы отраженного сигнала для алюминиевого УМЗ-сплава 1421 представлены на рисунке. На этом рисунке хорошо видны различия между осциллограммами, полученными для различных режимов облучения. При облучении лазерным импульсом с P_0 осциллограмма отраженного сигнала повторяет форму импульса падающего излучения. При режимах P_1 , P_2 на осциллограммах после точки А присутствуют дополнительные максимумы (пики отражения), при третьем режиме облучения он отсутствует. Кроме того, при облучении поверхности с режимами P_2 , P_3 в точке А наблюдается резкий спад отражения, который отсутствует при облучении с P_1 .

Обсудим возможные причины наблюдаемых особенностей изменения кинетики отражающей способности сплава во время действия лазерного импульса. Прежде всего отметим, что поглощаемая металлом энергия электромагнитных волн V , которая переходит в джоулево тепло пропорциональна квадратному корню из удельного сопротивления [5]. Для оптического и ближнего ИК-диапазона (аномальный скин-эффект) пропорциональность поглощения удельному сопротивлению также сохраняется [5]. В работе [6], показано, что рост концентрации вакансий приводит к увеличению удельного сопротивления материала. В то же время слияние вакансий в комплексы (дивакансии, тривакансии...) и увеличение их количества приводит к тому, что их вклад в удельное



Осциллограммы сигнала отражения во время действия лазерного импульса и характерный вид поверхности УМЗ алюминиевого сплава 1421 после облучения с плотностью мощности: *a* — P_0 , *b* — P_1 , *c* — P_2 , *d* — P_3 .



Продолжение рисунка.

сопротивление (в расчете на одну вакансию) монотонно снижается. Таким образом, рост концентрации вакансий приводит к увеличению поглощения излучения и к повышению температуры поверхности в зоне лазерного воздействия. Образование вакансионных кластеров и пор вызывает обратный процесс — снижение поглощения и соответственно увеличение отражения падающего излучения.

Следует также отметить, что распределение плотности энергии лазерного излучения неоднородно по сечению луча. При малых энергиях излучения ее максимальная плотность сосредоточена в центральной области пятна облучения за счет генерации центральных мод в активной среде. С повышением энергии, связанной с вхождением в процесс генерации периферийных мод излучения, неоднородность распределения плотности излучения по сечению сглаживается. Однако в центральной области сечения лазерного луча в любом случае плотность энергии оказывается выше, чем на периферии, и, следовательно, основной вклад в изменение отражающей способности, вызванное изменением структуры поверхности, определяется процессами, происходящими в центральной области зоны облучения.

Исходя из этих соображений, по виду осциллограмм отраженного сигнала можно судить о процессах изменения структуры, происходящих в сплаве в процессе воздействия лазерного импульса. Воздействие низкоэнергетического лазерного импульса P_0 приводит к нагреву поверхности и увеличению концентрации вакансий. При этом режиме облучения полученная концентрация неравновесных вакансий не оказывает заметного влияния на отражающую способность, и отраженный сигнал повторяет форму импульса лазерного воздействия (см. рисунок, *a*). Амплитуда отраженного сигнала измерялась в милливольтгах. Для выделения полезного сигнала от фотодатчика для каждой плотности мощности излучения выбиралась оптимальная чувствительность входного канала осциллографа, поэтому сравнение осциллограмм (см. рисунок) по амплитудам не информативно.

При воздействии лазерного импульса P_1 по мере увеличения подаваемой энергии в процессе генерации растет температура поверхности и соответственно происходит рост концентрации вакансий. В определенный момент (точка *A* на осциллограмме, рисунок, *b*) они начинают существенно влиять на процесс поглощения излучения, снижая отражающую способность сплава. Вакансионные поры образуются на поверхности во время действия второй половины импульса лазерного

воздействия, когда происходит снижение энергии падающего излучения и, как следствие, понижение температуры поверхности. Концентрация вакансий, которая была достигнута на пике излучения при максимальной температуре поверхности и была равновесной для этих условий, становится неравновесной и в некоторый момент времени вследствие быстрого остывания за счет теплопроводности достигает критического значения, при котором вакансиям становится энергетически выгодно сливаться в поры. В результате зарождения пор концентрация вакансий падает, поглощение уменьшается и на осциллограмме (см. рисунок, *b*) наблюдается дополнительный максимум — пик отражения. Похожий вид имеет и сигнал отражения, представленный на осциллограмме (см. рисунок, *c*), при облучении поверхности сплава лазерным импульсом с плотностью мощности P_2 . В этом случае на поверхности сплава в центре зоны облучения наблюдается область оплавления, окруженная микрократерами. В точке *A* на рисунке, *c* наблюдается более резкий спад сигнала отражения по сравнению с режимом P_1 , что объясняется сильным увеличением поглощающей способности за счет расплавления [7] в центральной зоне облучения. На периферии зоны облучения, где температура поверхности ниже температуры плавления, происходят те же процессы, которые рассмотрены выше, т.е. накопление критической концентрации неравновесных вакансий и слияние их в поры. И наконец, при облучении сплава лазерным импульсом с плотностью мощности P_3 в генерации участвует максимальное количество мод излучения и плавление поверхности сплава происходит по всей области облучения поверхности. В этом случае дополнительный пик отражения отсутствует (см. рисунок, *d*).

Таким образом, проведенное исследование показывает, что образование вакансионных пор приводит к увеличению отражающей способности сплава, а по виду осциллограмм отраженного сигнала можно судить о времени начала и продолжительности процесса порообразования в поверхностных слоях сплава во время действия лазерного импульса.

Список литературы

- [1] Кикин П.Ю., Перевезенцев В.Н., Русин Е.Е., Разов Е.Н. // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 2. С. 46–49.
- [2] Кикин П.Ю., Перевезенцев В.Н., Русин Е.Е., Разов Е.Н. // Физика и химия обработки материалов. 2012. № 1. С. 10–15.

- [3] *Кикин П.Ю., Пчелинцев А.И., Русин Е.Е.* // *Металловедение и термическая обработка материалов.* 2010. № 12. С. 24–26.
- [4] *Валиев Р.З., Александров И.В.* *Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией.* М.: Логос, 2000. 272 с.
- [5] *Постников В.С.* *Физика и химия твердого состояния.* М.: Металлургия, 1978. 543 с.
- [6] *Дамаск А., Динс Дж.* *Точечные дефекты в металлах.* М.: Мир, 1966. 291 с.
- [7] *Григорьянц А.Г.* *Основы лазерной обработки материалов.* М.: Машиностроение, 1989. 301 с.