

Динамика деформации и откольная прочность алюминия при однократном воздействии фемтосекундного лазерного импульса

С.И.Ашитков, П.С.Комаров, А.В.Овчинников, Е.В.Струлёва, М.Б.Агранат

Разработана и реализована интерферометрическая методика с использованием частотно-модулированного импульса для диагностики динамики высокоскоростных деформаций с пространственным и временным разрешениями при однократном лазерном воздействии. Исследована динамика движения свободной поверхности алюминиевой пленки субмикронной толщины под действием ультракороткого импульса сжатия с амплитудой до 14 ГПа, возбуждаемого при фемтосекундном лазерном нагреве поверхностного слоя мишени. Определена откольная прочность алюминия при рекордно высокой скорости деформирования $3 \times 10^9 \text{ с}^{-1}$.

Ключевые слова: фемтосекундный лазерный импульс, алюминий, прочность.

1. Введение

В последнее время проявляется повышенный интерес к изучению упругопластических и прочностных свойств материалов при предельно малых длительностях нагрузки, реализуемых с помощью ультракоротких лазерных импульсов [1–7]. Это обусловлено как фундаментальными вопросами физики конденсированного состояния, так и прикладными аспектами развития лазерных технологий обработки материалов. В частности известно, что прочность материалов существенно возрастает с увеличением скорости его растяжения [8]. Предельное значение прочности, или так называемая идеальная прочность, соответствует спинодали конденсированного состояния вещества. Расчетное значение идеальной прочности алюминия при растяжении составляет 11.7 ГПа [9]. Приблизиться к идеальной прочности можно путем увеличения скорости деформирования вещества $\dot{\epsilon}$, что достигается либо уменьшением длительности ударной нагрузки, либо увеличением ее амплитуды. В настоящее время наибольшие скорости деформирования $\dot{\epsilon} \sim 10^8 - 10^9 \text{ с}^{-1}$ были достигнуты в лазерных экспериментах с импульсами пико- и фемтосекундной длительности [1, 3, 7]. При этом измеренная прочность алюминия на растяжение σ_{spall} в данных экспериментах составила более 50% от идеальной прочности.

В лазерных ударно-волновых экспериментах величина σ_{spall} обычно определяется либо путем измерения глубины откольной выемки [7], либо регистрацией профиля скорости свободной поверхности $u_{\text{fs}}(t)$ испытуемого образца. В последнем случае применяются различные высокоскоростные интерферометрические методики. Точность лазерного доплеровского измерителя скорости ORVIS с электронно-оптической регистрацией сигнала, использо-

ванного в [1], была недостаточной для изучения процессов со скоростью деформирования свыше 10^8 с^{-1} . Недостатком используемой в работе [3] методики фемтосекундной интерференционной микроскопии в pump-probe схеме измерений с варьируемой временной задержкой между нагревающим и зондирующим импульсами является необходимость многократного воздействия на исследуемый образец. В случае ударно-волновых экспериментов это накладывает достаточно жесткие требования на стабильность параметров лазерных импульсов, а также, что более важно, на однородность оптических свойств и на структуры и толщины исследуемых образцов.

В последнее время получили развитие новые высокоскоростные методы диагностики, обеспечивающие регистрацию динамики процесса при однократном лазерном воздействии с временным разрешением $\sim 10^{-12} \text{ с}$ путем использования частотно-модулированных (чирпированных) импульсов в качестве зондирующих. Ранее эти методики были использованы для изучения распространения ударных волн в ПММА [10] и упругопластических свойств металлов [5, 6]. Данный способ основан на том, что различные спектральные компоненты чирпированного импульса приходят на мишень в различные моменты времени.

В настоящей работе реализована интерферометрическая методика с использованием диагностического чирпированного импульса для исследования динамики высокоскоростных деформаций материалов при однократном лазерном воздействии. Ее применение позволило нам получить новые данные по откольной прочности алюминия при рекордно высокой на сегодняшний день скорости деформирования. Следует также отметить более высокую надежность проводимых однократных измерений, а также возможность их применения для изучения статистики откольных явлений в образцах, не обладающих высокой степенью однородности.

2. Эксперимент

Оптическая схема эксперимента приведена на рис.1. Источником излучения являлась титан-сапфировая лазерная система. Импульсы длительностью 30 фс на цен-

С.И.Ашитков, П.С.Комаров, А.В.Овчинников, Е.В.Струлёва, М.Б.Агранат. Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412 Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2; e-mail: ashitkov11@yandex.ru, komarov-p@yandex.ru, ovch2006@rambler.ru, struleva.evgenia@yandex.ru, agranat2004@mail.ru

Поступила в редакцию 24 декабря 2012 г.

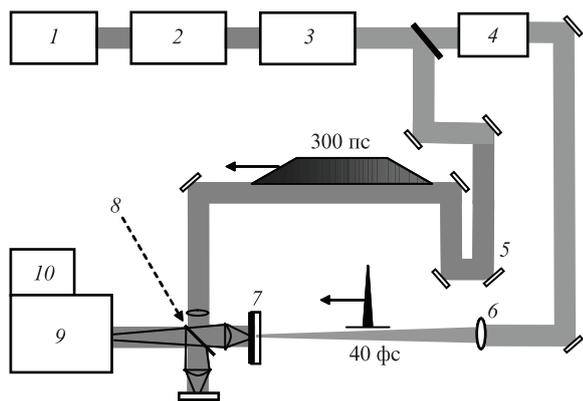


Рис.1. Оптическая схема измерений:

1 – задающий генератор; 2 – стретчер; 3 – регенеративный усилитель; 4 – компрессор; 5 – оптическая линия задержки; 6 – линза; 7 – образец; 8 – интерферометр Майкельсона; 9 – спектрометр; 10 – ПЗС-камера.

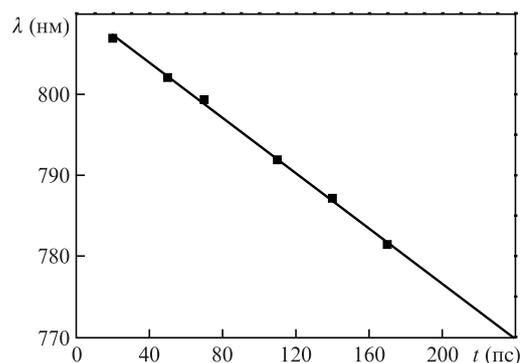
тральной длине волны 790 нм со спектральной шириной 40 нм, излучаемые задающим генератором, направлялись в стретчер с дифракционной решеткой 1200 штр./мм, где растягивались во времени. После стретчера chirпированный импульс усиливался регенеративным усилителем до 2 мДж. Далее лазерный пучок делился на два. Более мощный импульс накачки направлялся в компрессор, где сжимался по длительности до 40 фс. Другой, частотно-модулированный диагностический импульс длительностью 300 пс, проходя оптическую линию задержки, поступал на вход интерферометра Майкельсона.

В качестве исследуемого образца нами использовалась пленка алюминия толщиной 760 нм, нанесенная путем магнетронного распыления на стеклянную подложку толщиной 150 мкм. Согласно результатам моделирования [11], при воздействии фемтосекундных импульсов излучения с интенсивностью $\sim 10^{13}$ Вт/см² формирование ударной волны в алюминии происходит уже на длине пробега 500–600 нм.

Импульс накачки фокусировался линзой с фокусным расстоянием 30 см через подложку на поверхность металлической пленки в пятно диаметром 70 мкм по уровню e^{-1} с гауссовым распределением интенсивности. Энергия импульсов плавно варьировалась поляризационным ослабителем и контролировалась калиброванным фотоприемником. Поглощение излучения накачки в поверхностном слое металла сопровождалось генерацией импульсов ударного сжатия, распространяющихся по направлению к тыльной свободной поверхности образца, вызывая ее деформацию. После каждого лазерного воздействия исследуемый образец перемещался на новое место с помощью трехкоординатного микроманипулятора.

Диагностической частью схемы служил интерферометр Майкельсона [3, 12]. Микрообъектив с числовой апертурой $NA = 0.2$ служил для переноса изображения тыльной поверхности образца с восьмикратным увеличением на входную щель дифракционного спектрометра Acton 2300i. Настройка интерферометра осуществлялась таким образом, чтобы интерференционные полосы были перпендикулярны входной щели. Запись изображений на выходе спектрометра осуществлялась 12-битной ПЗС-камерой.

В случае частотной модуляции диагностического импульса ось длин волн в регистрируемом спектре может

Рис.2. Зависимость длины волны λ от времени t в диагностическом частотно-модулированном импульсе.

быть сопоставлена со шкалой времени t , тогда как другая ось (вдоль щели спектрометра) будет соответствовать одной из пространственных координат в плоскости мишени. В описываемой схеме пространственное разрешение в плоскости мишени xu определялось числовой апертурой объектива и составляло ~ 2 мкм.

Смещение поверхности мишени при выходе на нее импульса сжатия приводит к изменению соотношения фаз $\Delta\varphi$ объектного и опорного лучей и, соответственно, к сдвигу интерференционных полос. Обработка пространственно-временных интерференционных картин $I(y, t)$ проводилась с помощью двумерного фурье-преобразования, подробно описанного в [12], позволяющего получить двумерную картину изменения фазы $\Delta\varphi(y, t)$ диагностического импульса в области воздействия в координатах пространство–время. Величина смещения Δz поверхности связана с изменением фазы посредством соотношения $\Delta z(y, t) = \lambda(t)\Delta\varphi(y, t)/(4\pi)$. При этом погрешность измерения фазы $\delta\varphi \approx \pi/100$, реализуемая в данной схеме, соответствует погрешности величины смещения поверхности 2–3 нм.

Калибровка временной развертки осуществлялась путем варьирования длины оптической линии задержки между нагревающим и зондирующим импульсами. При этом регистрировался начальный момент изменения фазы $\Delta\varphi$, связанный с выходом импульса сжатия на тыльную поверхность мишени. Как следует из проведенных измерений (рис.2), зависимость длины волны от времени в частотно-модулированном импульсе в пределах погрешности измерений является линейной. При использовании в спектрометре дифракционной решетки 600 штр./мм одновременно регистрировался временной интервал 235 пс. Временное разрешение определялось спектральным разрешением спектрометра и составляло в данном случае 2 пс.

3. Результаты и их обсуждение

На рис.3 приведена пространственно-временная развертка изменения фазы $\Delta\varphi(y, t)$ диагностического импульса, описывающая динамику деформации на тыльной свободной поверхности алюминиевой пленки при выходе импульса сжатия, образованного в результате нагрева фронтальной поверхности мишени фемтосекундным лазерным импульсом. Ось y совпадает с сечением, проходящим через центр области взаимодействия.

На рис.4 приведены профили смещения z и скорости u_{fs} свободной поверхности алюминиевого образца как функции времени. Профили $z(t)$ получены в одном лазерном выстреле путем обработки пространственно-времен-

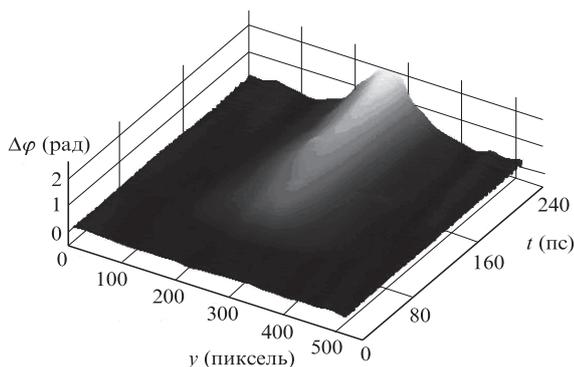


Рис.3. Пространственно-временная развертка изменения фазы $\Delta\varphi(y, t)$ диагностического импульса при выходе ударной волны на свободную поверхность алюминиевой пленки толщиной 760 нм после однократного воздействия нагревающего импульса длительностью 40 фс с плотностью энергии $F_0 = 2$ Дж/см².

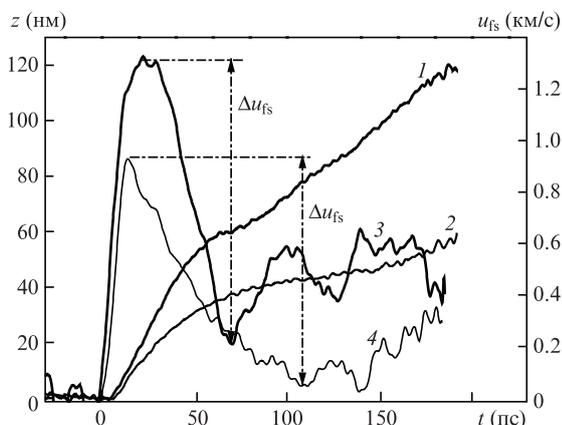


Рис.4. Зависимости смещения z (1, 2) и скорости u_{fs} (3, 4) свободной тыльной поверхности алюминиевого образца толщиной 760 нм от времени после воздействия лазерного импульса длительностью 40 фс с плотностью энергии $F_0 = 2$ Дж/см² (1, 3) и $F = 1.4$ Дж/см² (2, 4).

ного распределения фазы $\Delta\varphi(y, t)$ (рис.3) для двух различных значений пространственной координаты y , которые соответствуют различным интенсивностям лазерного импульса. Кривая 1 на рис.4 соответствует центральной части области взаимодействия, где плотность энергии F_0 падающего лазерного излучения была максимальной и составляла 2 Дж/см², а кривая 2 – периферийной части фокального пятна с $F = 1.4$ Дж/см². Профили скорости $u_{fs}(t)$ на рис.4 получены путем дифференцирования сглаженных зависимостей $z(t)$.

На рис.5 также приведены результаты измерений динамики деформации тыльной свободной поверхности аналогичного алюминиевого образца из работы [3], полученные методом фемтосекундной интерференционной микроскопии. В этих экспериментах зависимость $z(t)$ измерялась по точкам при многократном лазерном воздействии на мишень и варьируемой временной задержке между нагревающим и зондирующим импульсами.

Сравнение результатов измерений с помощью двух данных методик при близких значениях параметров лазерных импульсов (кривые 2, 4 на рис.4 и соответствующие зависимости $z(t)$ и $u_{fs}(t)$ на рис.5) демонстрируют их хорошее совпадение.

Величина давления p за фронтом ударной волны определяется выражением

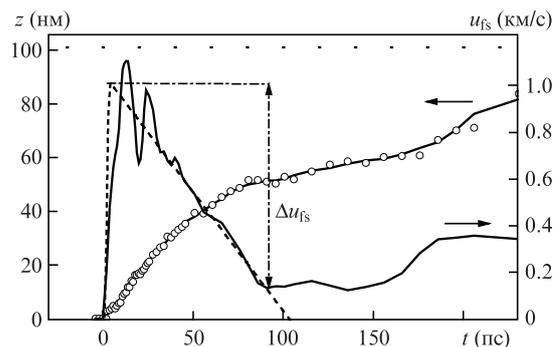


Рис.5. Зависимость смещения z свободной поверхности образца толщиной 760 нм от времени после воздействия лазерного импульса длительностью 150 фс с плотностью энергии $F_0 = 1.3$ Дж/см² (точки – эксперимент). Профиль скорости $u_{fs}(t)$ получен дифференцированием сглаженной экспериментальной зависимости $z(t)$, штриховая линия – начальная часть профиля $u_{fs}(t)$, полученная из аппроксимации экспериментальных данных квадратичной кривой.

$$p = \rho_0 U_s u_p, \tag{1}$$

Здесь ρ_0 – начальная плотность вещества; U_s – скорость распространения ударной волны; $u_p = u_{fs}^{max}/2$ – массовая скорость за ее фронтом, равная половине пикового значения скорости свободной поверхности. Результаты недавних исследований [3, 4] показали, что одноосное сжатие в алюминии в рассматриваемых условиях является упругим. При этом коэффициенты в линейном выражении для адиабаты упругого сжатия

$$U_s = c_0 + b u_p \tag{2}$$

принимают следующие значения: $c_0 = 6.4$ км/с, $b = 1.8$.

Как видно из профилей $u_{fs}(t)$ на рис.4, форма ультракороткого импульса ударного сжатия на выходе образца является треугольной с характерной длительностью $\tau_s \approx 50$ пс по уровню 0.5 от максимального значения и с временем нарастания параметров порядка нескольких пикосекунд. При этом максимальная амплитуда импульса сжатия согласно соотношениям (1), (2) достигает 13.7 ГПа.

Отражение импульса сжатия от свободной поверхности образца приводит к возникновению в нем растягивающих напряжений, нарастающих по мере распространения отраженной волны от поверхности в глубь образца. В случае, если величина растягивающих напряжений превышает прочность материала σ_{spall} , в последнем образуется разрушение (откол) [8, 13]. Релаксация напряжений при разрушении приводит к образованию вторичной волны сжатия, которая, достигнув свободной поверхности, вызывает второе возрастание ее скорости (откольный импульс). Величина растягивающего напряжения непосредственно перед разрушением определяется методом характеристик по спаду скорости Δu_{fs} от ее максимального значения до значения перед откольным импульсом (рис.4). Часто используемое в литературе [1] акустическое приближение для определения откольной прочности $\sigma_{spall} = \rho_0 c \Delta u_{fs} / 2$ не учитывает вклада нелинейности сжимаемости вещества и дает завышенную оценку σ_{spall} . Нелинейность может быть учтена путем экстраполяции ударной адиабаты (2) в область отрицательных давлений. Это приводит к следующему выражению для определения откольной прочности [14]:

$$\sigma_{\text{spall}} = \frac{1}{2}\rho_0 \left(c_0 - b \frac{\Delta u_{\text{fs}}}{2} \right) \Delta u_{\text{fs}}. \quad (3)$$

Скорость деформирования $\dot{\epsilon}$ характеризуется скоростью расширения вещества в разгрузочной части падающего импульса сжатия и определяется выражением [1, 8]:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{V}}{V_0} = \frac{\dot{u}_{\text{fs}}}{2c_0}, \quad (4)$$

а оценка толщина откольного слоя может быть получена из соотношения

$$L_{\text{spall}} = \frac{c_0(t_{\text{min}} - t_{\text{max}})}{2}, \quad (5)$$

где t_{max} и t_{min} – моменты времени достижения величиной u_{fs} своего пикового и минимального значения перед приходом откольного импульса.

Из измеренных профилей скорости $u_{\text{fs}}(t)$ (рис.4) с учетом (1), (4) следует, что с ростом амплитуды ударного сжатия с 9.1 до 13.7 ГПа откольная прочность σ_{spall} исследуемого алюминиевого образца увеличивалась с 6.7 до 8.4 ГПа. Скорости растяжения $\dot{\epsilon}$ при данных значениях p соответственно составили 1.5×10^9 и $3 \times 10^9 \text{ с}^{-1}$, а толщина L_{spall} откола согласно (5) уменьшилась с 300 до 150 нм.

В настоящей работе данные по откольной прочности алюминия получены при рекордно высоких на сегодняшний день скоростях деформирования – до $3 \times 10^9 \text{ с}^{-1}$. По сравнению с предшествующими опытами [3] более высокие значения $\dot{\epsilon}$ обусловлены ростом амплитуды импульсов ударного сжатия вследствие увеличения плотности энергии нагревающих импульсов. Ранее в [3] при измерениях с помощью фемтосекундной интерференционной микроскопии ограничение на величину $F_0 \leq 1.3 \text{ Дж/см}^2$ было связано с необходимостью проведения измерений заведомо ниже порога оптического пробоя стеклянных подложек мишеней с целью достижения лучшей воспроизводимости параметров импульсов сжатия от выстрела к выстрелу.

4. Заключение

Таким образом, нами разработана и реализована интерферометрическая методика изучения высокоскорост-

ных деформаций, вызываемых воздействием мощных фемтосекундных лазерных импульсов. Данная методика обеспечивает регистрацию динамики процесса при однократном лазерном воздействии во временном интервале 0–240 пс с временным разрешением 2 пс, пространственным разрешением 2 мкм и точностью измерения величины смещения поверхности мишени 2–3 нм. Исследована динамика движения тыльной свободной поверхности алюминиевой пленки субмикронной толщины под действием импульса ударного сжатия с длительностью 10^{-10} с и амплитудой до 13.7 ГПа. Определена откольная прочность алюминия при рекордно высокой скорости растяжения $3 \times 10^9 \text{ с}^{-1}$. Результаты исследований динамики деформации алюминия, полученные в настоящей работе, хорошо согласуются с данными, полученными в [3] методом фемтосекундной интерференционной микроскопии.

Работа выполнена при частичной поддержке программ Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения» и «Вещество при высоких плотностях энергии», а также РФФИ (грант № 11-08-12107-офи-м-2011).

1. Eliezer S., Moshe E., Eliezer D. *Laser Part. Beam*, **20**, 87 (2002).
2. Gahagan K.T., Moore D.S., Funk D.J., Rabie R.L., Buelow S.J., Nicholson J.W. *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 3205 (2000).
3. Ашитков С.И., Агранат М.Б., Каннель Г.И., Комаров П.С., Фортвов В.Е. *Письма в ЖЭТФ*, **92**, 568 (2010).
4. Жаховский В.В., Иногамов Н.А. *Письма в ЖЭТФ*, **92**, 574 (2010).
5. Whitley V.H., McGrane S.D., Eakins D.E., Bolme C.A., Moore D.S., Bingert J.F. *J. Appl. Phys.*, **109**, 013505 (2011).
6. Crowhurst J.C., Armstrong M.R., Knight K.B., Zaig J.M., Behymer E.M. *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 144302 (2011).
7. Абросимов С.А., Бажулин А.П., Воронов В.В., Красюк И.К., Пашинин П.П., Семенов А.Ю., Стучебрюхов И.А., Хищенко К.В. *Докл. РАН*, **442**, 752 (2012).
8. Каннель Г.И., Фортвов В.Е., Разоренов С.В. *УФН*, **177**, 809 (2007).
9. Синько Г.В., Смирнов Н.А. *Письма в ЖЭТФ*, **75**, 217 (2002).
10. Бабин А.А., Киселев А.М., Кулагин Д.И., Правденко К.И., Степанов А.Н. *Письма в ЖЭТФ*, **80**, 344 (2004).
11. Anisimov S.I., Inogamov N.A., Petrov Y.V., Khokhlov V.A., Zhakhovskii V.V., Nishihara K., Agranat M.B., Ashitkov S.I., Komarov P.S. *Appl. Phys. A*, **92**, 797 (2008).
12. Temnov V.V., Sokolovski-Tinten K., Zhou P., Von der Linde D. *J. Opt. Soc. Am. B*, **23**, 1954 (2006).
13. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (М.: Наука, 1966).
14. Каннель Г.И. *Журн. прикл. мех. и техн. физ.*, **42**, 194 (2001).