

УДК 531.7:621.378

Применение лазерного ускорения тонких фольг для изучения механических свойств вещества при больших скоростях деформирования

В. И. Вовченко, И. К. Красюк, П. П. Пашинин, А. Ю. Семенов
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия

С помощью лазерного ускорения тонких фольг проведены эксперименты по определению механической прочности алюминиевых мишеней при больших скоростях деформирования. Для определения массы и скорости фольг после их лазерного ускорения использован метод, основанный на измерении времен пролета фольгой базовых расстояний в атмосфере воздуха.

PACS: 52.38.-r

Введение

Получение новых данных о механической прочности материалов при больших скоростях деформирования — одно из применений лазерной генерации плоских ударных волн [1]. В случае наносекундной длительности лазерного импульса удается достичь скоростей деформирования, на два—три порядка больших, чем при традиционных методах с использованием взрывных металлических систем [2]. Подобные эксперименты представляют несомненный интерес с точки зрения изучения механических свойств вещества при высокоинтенсивных механических нагрузках малой длительности, при которых оказывается возможным достижение теоретического предела прочности исследуемых материалов. Дальнейшее сокращение длительности ударно-волнового воздействия и, следовательно, увеличение скорости деформирования могут быть достигнуты укорочением лазерного импульса. Другим методом достижения этой цели является лазерное ускорение тонких фольг с последующим использованием их в качестве ударников для генерации в исследуемом материале импульсов растяжения малой длительности.

Во всех перечисленных случаях для получения сведений о сопротивляемости материала разрушению под действием ударного воздействия используется явление откола [3]. Оно возникает на тыльной (свободной) стороне мишени в результате отражения от нее импульса сжатия. В результате отражения свободная поверхность мишени приходит в движение, что вызывает распространение навстречу волне сжатия волны растяжения — волны "отрицательного" давления. На определенном расстоянии от тыльной поверхности мишени растягивающее напряжение может превысить прочность материала на разрыв, и в результате этого

происходит отделение от мишени откольного слоя.

Величину откольной прочности и скорость деформирования материала определяют по экспериментальным данным, характеризующим процесс откола, на основании теоретического рассмотрения его гидродинамики.

В данной работе выполнены эксперименты по определению откольной прочности мишеней из алюминия при их импульсном нагружении с помощью лазерно-ускоренных тонких алюминиевых фольг, используемых в качестве ударника.

Как показывают предварительные оценки, в этом случае при взаимодействии ударника и исследуемой мишени могут быть реализованы более высокие скорости деформирования, чем при непосредственном действии на мишень самим лазерным излучением.

При воздействии импульса лазерного излучения на фольгу происходит образование на ее лицевой поверхности высокотемпературной плазмы. Это сопровождается абляцией части вещества фольги с возникновением импульса давления, под действием которого оставшийся материал фольги приобретает направленное движение.

Для определения массы и скорости фольг после лазерного ускорения в данной работе использован метод торможения ее в газовой атмосфере [4]. Этот метод основан на экспериментальной фиксации электроконтактным способом времен пролета фольгой базовых расстояний.

Измерения откольной прочности проводили двумя способами. В одном из них фиксировалась величина пороговой скорости фольги-ударника, при которой возникал откол в том сечении мишени, где растягивающее напряжение достигало максимального значения. В случае, когда скорость фольг превышала пороговое значение, экспериментально определялись толщина и скорость от-

кольного слоя. Затем на основе экспериментальных данных каждого опыта с помощью гидродинамического численного кода вычисляли величину откольной прочности и скорости деформирования исследуемого материала.

Определение характеристик лазерного ускорения фольг методом их торможения в атмосфере воздуха

В упрощенной одномерной постановке задачу о торможении ударника в газовой среде можно сформулировать следующим образом: ударник толщиной h и плотностью ρ_m со скоростью u_0 налетает на полубесконечный покоящийся слой газа с начальной плотностью ρ_0 при давлении P_0 . В результате последующего соударения в ударнике и газе возникают ударные волны. Ударная волна в ударнике отражается от его свободной границы в виде волны разрежения, которая, приходя на границу раздела с газом, вызывает торможение ударника. Возникает сложная волновая картина течения и торможение ударника определяется как гидродинамикой газа, так и волновым движением материала ударника.

В случае жесткого ударника, когда ударная волна является "слабой" (оставаясь "сильной" для газа), возмущения, вносимые соударением с газом, можно считать акустическими, и тогда точное решение можно искать на основе уравнений акустики:

$$u_t + P_x / \rho_m = 0, \quad P_t + \rho_m c_m^2 u_x = 0,$$

где u — скорость среды (ударника), при которой распространяется слабая ударная волна;

P — давление в этой среде (малые отклонения скорости и давления от их значений в невозмущенной среде, вызванной распространением звуковых волн);

t — время;

x — пространственная координата;

t и x — нижние индексы частных производных по соответствующим переменным;

c_m — скорость звука в ударнике.

Пренебрегая гидродинамическими явлениями в поршне, на основе рассмотрения инвариантов Римана $J_{\pm}(t) = u(t) \pm P(t) / \rho_m c_m$ [3] для данной задачи приходим к уравнению движения ударника в газовой атмосфере [5], т. е.

$$m_0 du/dt = -P(t), \tag{1}$$

где $m_0 = h\rho_m$ — масса ударника на единицу площади;

$P(t)$ — давление на контактной границе ударника с газом;

$u(t)$ — скорость ударника.

Считая слой ударно-сжатого газа, заключенного между фронтом ударной волны и поверхностью поршня, малым, т. е. предполагая профиль давления прямоугольным, приходим к стационарному приближению. В этом случае скорость ударника u и давление на нем P связаны соотношениями на фронте плоской стационарной ударной волны [3]:

$$P - P_0 = \rho_0 D u, \tag{2}$$

где D — скорость фронта ударной волны;

P_0 — давление невозмущенного газа.

Аналитический вид ударной адиабаты атмосферного воздуха (2) в диапазоне скоростей до 25,7 км/с на основе данных работы [6] можно представить в виде

$$D = 1,13 u + 0,33. \tag{3}$$

В случае сильной ударной волны ($P \gg P_0$) с учетом соотношения (3), в котором пренебрегаем вторым слагаемым ввиду его малости при $u > 3$ км/с, уравнение (1) можно преобразовать к виду

$$m_0 du/dt = -a u^2, \tag{4}$$

где введено обозначение $a = 1,13 \rho_0$.

Интегрируя уравнение движения фольг (4) при начальных условиях $u(t_0) = u_0$ и $l(t_0) = l_0$, для скорости ударника $u(t)$ и пройденного им пути $l(t)$ получаем

$$u(t) = u_0 \left[1 + \frac{a u_0}{m_0} (t - t_0) \right]^{-1}; \tag{5}$$

$$l(t) - l_0 = \frac{m_0}{a} \ln \left[1 + \frac{a u_0}{m_0} (t - t_0) \right]. \tag{6}$$

С учетом (5) уравнение (6) может быть использовано для экспериментального определения искомых величин m_0 и u_0 . Для этого достаточно измерить время прохождения ударником фиксированных расстояний l_0, l_1 и l_2 : t_0, t_1 и t_2 . Тогда имеем уравнение с двумя неизвестными u_0 и m_0 :

$$l_q - l_0 = \frac{m_0}{a} \ln \left[1 + \frac{a u_0}{m_0} (t_q - t_0) \right], \quad q = 1, 2. \tag{7}$$

Исключая из (7) одну из неизвестных (например u_0), приходим к трансцендентному уравнению относительно новой переменной $x = a (l_1 - l_0) / m_0$:

$$f(x) = 1 + \frac{t_2 - t_0}{t_1 - t_0} (e^x - 1) - e^{\alpha x} = 0, \tag{8}$$

где введено обозначение $\alpha = (l_2 - l_0) / (l_1 - l_0)$.

Величины u_0 и m_0 выражаются через переменную x следующим образом:

$$u_0 = \frac{l_1 - l_0}{t_1 - t_0} \frac{e^x - 1}{x},$$

$$m_0 = a (l_1 - l_0) x. \quad (9)$$

Отметим, что коэффициент a в явном виде входит только в выражение (9) для вычисления m_0 . Это означает, что для экспериментального определения величины u_0 достаточно измерить лишь t_q и l_q ($q = 1, 2$), а для определения величины m_0 , кроме того, необходимо знать значение коэффициента a . В случае атмосферного воздуха численное значение коэффициента a равно $1,37 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$.

Для оценки величин погрешностей при определении испаренной массы фольг и их скорости использовали уравнение (8), в которое вводились величины t_i , l_i , a с учетом возможных ошибок в их определении. В результате было получено, что ошибка в определении скорости фольг не превышает 5 %, а испаренной массы — 30 %.

Условия экспериментов

Для экспериментов была использована лазерная установка на неодимовом стекле "Сириус" с длиной волны излучения 1,06 мкм, обеспечивающая энергию на мишени до 30 Дж. Типичная длительность лазерного импульса по полувысоте составляла величину 37 нс. Диаметр лазерного пучка на фокусирующей линзе равнялся 5 см, фокусное расстояние линзы 40 см. Лазерное излучение фокусировалось на мишень в пятно диаметром 1 мм, при этом интенсивность этого излучения достигала величины $2 \cdot 10^{11} \text{ Вт/см}^2$. В качестве ударников использованы лазерно-ускоренные фольги из алюминия толщиной 8 и 15 мкм.

Цилиндрический канал в латуни, в котором осуществлялось лазерное ускорение фольг, имел диаметр и длину, равные 1 мм. За ним был размещен электроконтактный датчик для измерения времени пролета фольг фиксированных расстояний l_0 , l_1 и l_2 . Схема электроконтактного датчика приведена на рис. 1 (1—3 — контакты).

Первый контакт располагался на расстоянии $l_0 \geq u_0 \tau$ (τ — длительность лазерного импульса), на котором абляционное действие лазерного импульса было завершено. Для регистрации электрических сигналов использован цифровой запоминающий осциллограф LeCroy WS 432 (полоса 350 МГц).

На рис. 2 приведена типичная осциллограмма сигналов с электроконтактного датчика, возникающих при замыкании контактов на общий корпус сборки через проводящую электрический ток плазменную корону, возникающую на поверхности фольги, обращенной навстречу лазерному лучу.

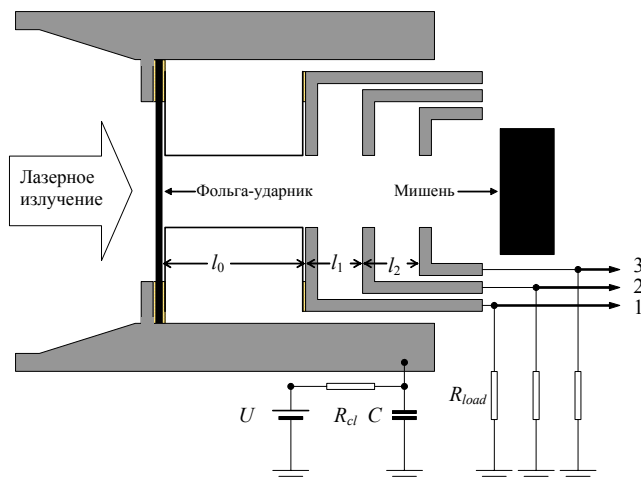


Рис. 1. Схема электроконтактного датчика:
 $U = 4,5 \text{ В}$; $C = 0,02 \text{ мкФ}$; $R_{cl} = 100 \text{ кОм}$; $R_{load} = 50 \text{ Ом}$

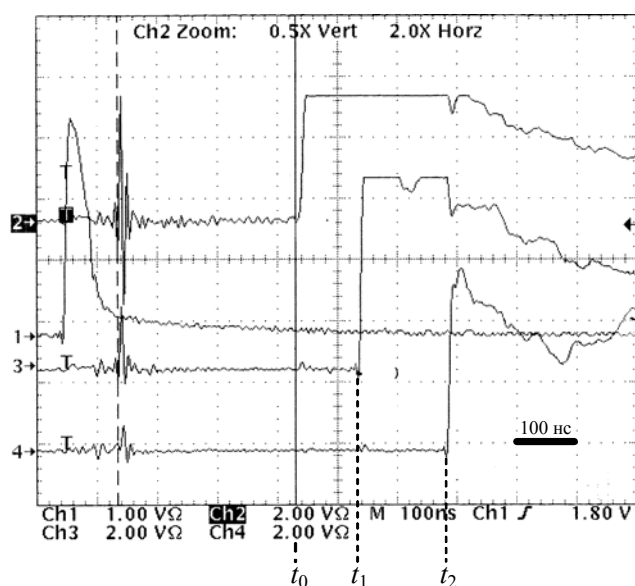


Рис. 2. Типичная осциллограмма формы лазерного импульса (трек 1) и сигналов с электроконтактного датчика (треки 2—4) в экспериментах по торможению фольг в цилиндрическом или коническом канале

В работе в качестве мишени использовали алюминиевую фольгу толщиной 210 мкм, на которую воздействовал ударник толщиной 8 либо 15 мкм. Мишень устанавливали за выходным отверстием электроконтактного датчика, что позволяло в каждом опыте фиксировать величину скорости фольги-ударника, при которой на тыльной поверхности мишени происходил откол.

Полученные результаты

Измерения проводили двумя способами. В первом случае фиксировалась пороговая величина скорости ударника, при которой на тыльной стороне мишени возникал откол. В этом случае откол происходил в том сечении мишени, где отрицательное давление (растягивающее напряжение) достигало максимального значения. Амплитуда

отрицательного давления зависит от скорости и толщины ударника и толщины мишени. Предварительно методом численного моделирования получены графики распределения по мишени отрицательного давления и скорости деформирования в зависимости от скорости ударника (рис. 3). На основе этих данных были рассчитаны графики зависимости максимальной амплитуды отрица-

тельного давления в мишени толщиной 210 мкм от скорости фольги-ударника для двух его толщин (рис. 4). Там же приведены графики скорости деформирования материала мишени \dot{V}/V_0 (V — удельный объем мишени) в плоскости, где достигается максимальное растягивающее напряжение $\sigma^* = -P$.

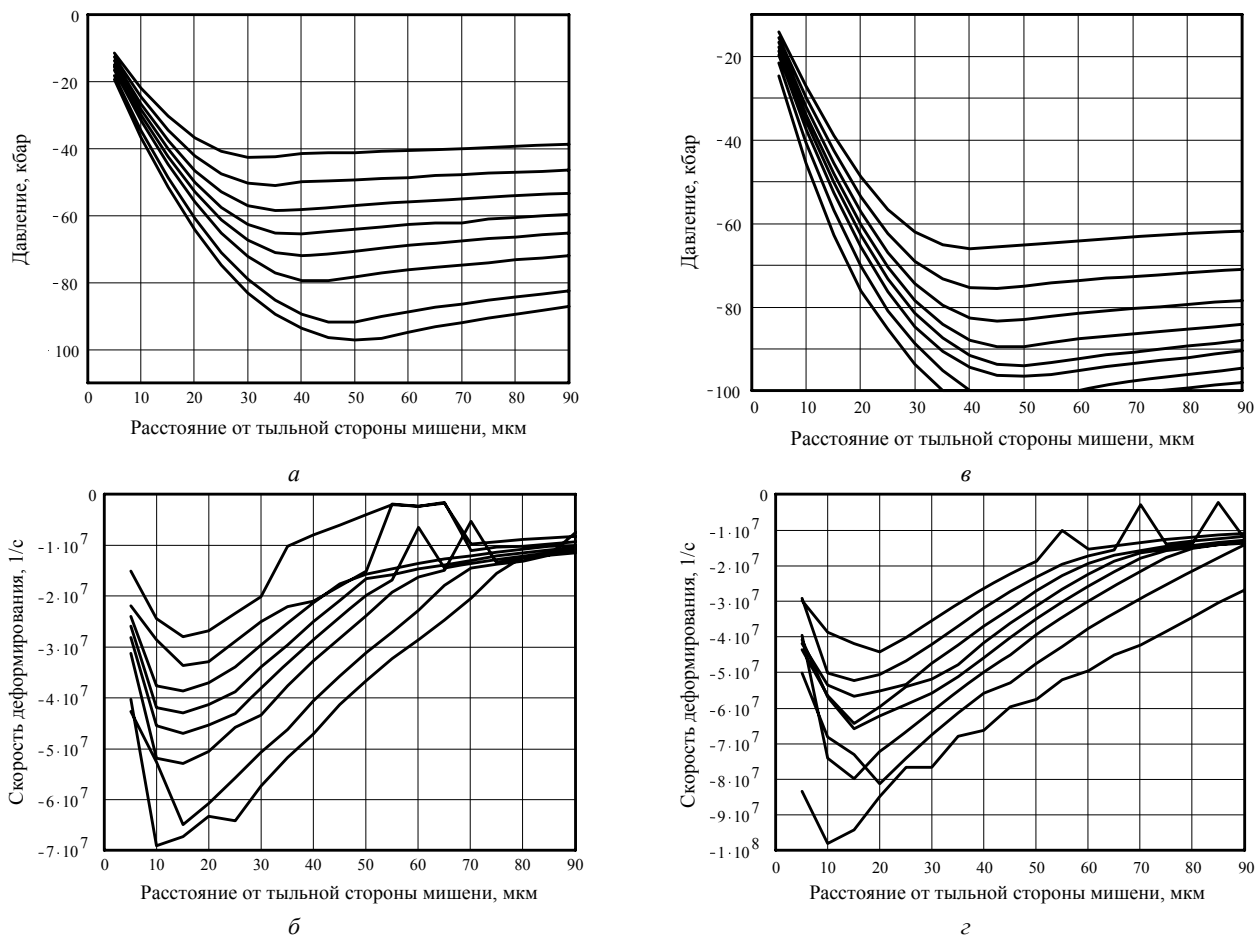


Рис. 3. Расчетные графики распределения по мишени из алюминия толщиной 210 мкм отрицательного давления (а, в) и скорости деформирования (б, г) в зависимости от скорости ударника:

$x = 0$ соответствует положению задней поверхности мишени; а, б — толщина ударника 8 мкм (для графиков сверху вниз скорость ударника равна 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,65; 6; 7,2 км/с); в, г — толщина ударника 15 мкм (для графиков сверху вниз скорость ударника равна 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,65; 6; 9 км/с)

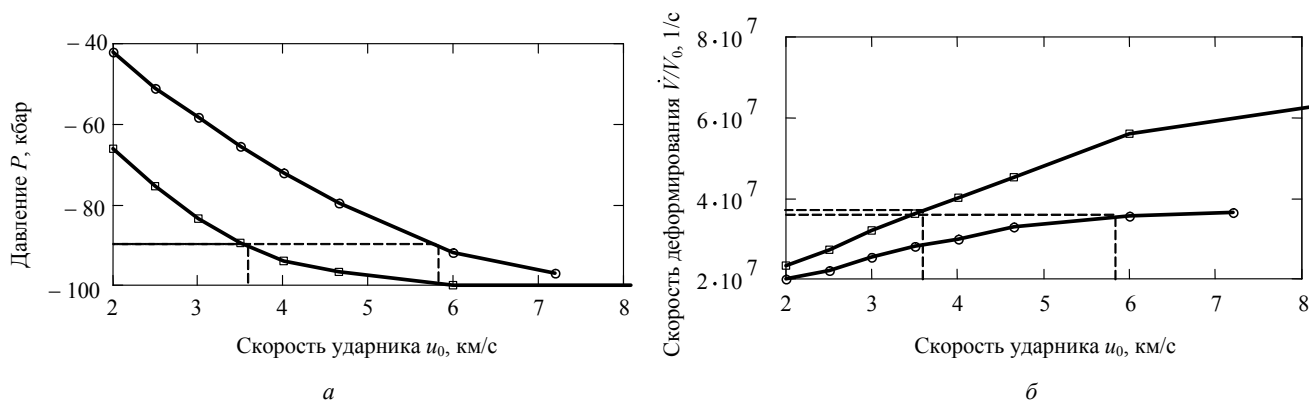


Рис. 4. Расчетные зависимости максимальных амплитуд отрицательного давления (а) и скорости деформирования (б) в алюминиевой мишени толщиной 210 мкм от скорости алюминиевого ударника толщиной:

○ — 8 мкм; □ — 15 мкм

Моделирование ударно-волнового взаимодействия ударника и мишени осуществлялось с помощью численного кода, созданного на основе уравнений гидродинамики в лагранжевых переменных, дополненных широкодиапазонным полуэмпирическим уравнением состояния алюминия [7].

В результате серии экспериментов было установлено, что пороговое значение скорости ударника толщиной 15 мкм, при котором возникал откол, оказалось равным 3,6 км/с, а для ударника толщиной 8 мкм — 5,8 км/с. Согласно графикам, приведенным на рис. 4 (штриховые линии), оба случая приводят к близким результатам: при скорости деформирования $\dot{V}/V_0 = 3,6 \cdot 10^7$ 1/с откольная прочность алюминия σ^* оказывается равной 90,4 кбар.

При втором способе измерения, когда скорость фольг превышала пороговое значение, на основе экспериментальных данных фиксировались положение плоскости откола и время прихода откольного слоя на дополнительный электроконтактный датчик, расположенный на расстоянии 0,65 мм от тыльной стороны мишени. Затем величины откольной прочности и скорости деформирования определялись по методике, изложенной в работах [1, 7].

Этот метод базировался на совместном использовании экспериментальных данных и численного моделирования. В каждом опыте экспериментально определялся момент времени подлета откольного слоя к электроконтактному датчику t_{arr} . Затем в неповрежденной части мишени с помощью микроскопа измеряли среднюю величину положения плоскости откола S и среднюю толщину откольного слоя h_{sp} . Для нахождения момента времени откола t_{sp} использовано нелинейное уравнение

$$t_{sp} + L/v_{sp} = t_{arr},$$

где L — расстояние от тыльной стороны мишени, на котором располагался электроконтактный датчик.

Входящая в это выражение величина скорости откольного слоя v_{sp} вычислялась с использованием численно рассчитанного профиля давления $P(t)$ в плоскости откола S

$$v_{sp} = \left(\int_0^{t_{sp}} P(t) dt \right) / m_{sp},$$

где $m_{sp} = \rho_0 h_{sp}$ — масса на единицу поверхности откольного слоя.

Здесь момент времени t_0 соответствует началу импульса давления, действующему в плоскости откола.

После нахождения величины t_{sp} определялась величина откольной прочности исследуемого материала σ^* с использованием численного расчета профиля давления $P(t)$ в плоскости откола S : $\sigma^* = P(t_{sp})$. Предполагалось, что отделение откольного слоя от мишени происходит мгновенно после того, как величина отрицательного давления в плоскости откола достигнет динамической прочности материала. В действительности процесс отделения откольного слоя от мишени занимает конечный промежуток времени.

Используемый метод позволяет определить среднюю величину момента откола, которая находится внутри этого промежутка.

В результате установлено, что в диапазоне изменения скорости деформирования \dot{V}/V_0 от $3,6 \cdot 10^7$ до $8 \cdot 10^7$ 1/с откольная прочность σ^* остается практически неизменной при величине 90 кбар (рис. 5). Это свидетельствует о том, что в экспериментах достигнута предельная прочность исследуемого материала. Полученная величина близка к теоретической величине предельной прочности алюминия, оцененной по минимуму соответствующей кривой объемного сжатия ($\sigma_{th}^* = 100$ кбар) [2].

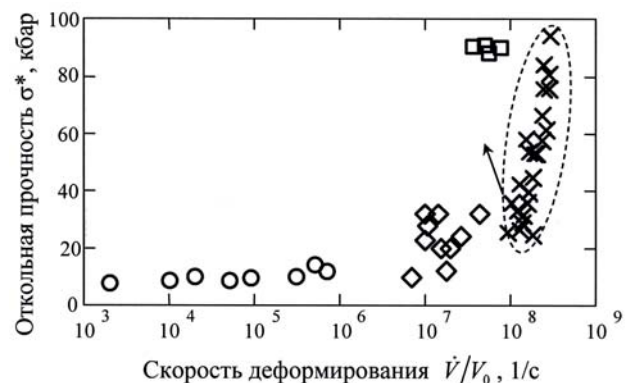


Рис. 5. Зависимость откольной прочности алюминия от скорости деформирования:

○ — [2] (взрывные эксперименты); ◊ — [8] 2, 5 нс (лазерное возд.); × — [9] 20, 100 нс (лазерное возд.); ◻ — 1,5, 2,7 нс (данная работа)

Для полноты картины на рис. 5 также приведены данные об откольной прочности алюминия, полученные в работах [8, 9]. Дополнительный анализ [10] показывает, что приведенные в работе [9] величины скоростей деформирования, по видимому, завышены, а величины откольной прочности — занижены.

Заключение

С помощью лазерного ускорения тонких фольг проведены эксперименты по определению механической прочности алюминиевых мишеней при

больших скоростях деформирования. В результате определена предельная величина откольной прочности мишеней из алюминия, равная 90 кбар. Этот результат согласуется с данными, полученными ранее другими авторами.

Для определения массы и скорости фольг-ударников после их лазерного ускорения в каждом опыте использован метод, основанный на измерении времен пролета фольг базовых расстояний в атмосфере воздуха.

Показано, что использование фольг в качестве ударника является эффективным методом достижения теоретического предела динамической прочности исследуемых материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 06-02-16573) и гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-476.2008.2).

Л и т е р а т у р а

1. Батани Д., Вовченко В. И., Канель Г. И. и др.// ДАН. 2003. Т. 389. № 3. С. 328.
2. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортвов В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. — М.: Янус-К, 1996.
3. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — М.: Наука, 1986.
4. Агеев В. Г., Вовченко В. И., Красюк И. К. и др.// Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. № 1. С. 3.
5. Вовченко В. И., Красюк И. К., Пащинин П. П., Семенов А. Ю.// Квантовая электроника. 2007. Т. 37. № 10. С. 897.
6. Кузнецов Н. М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. — М.: Машиностроение, 1965.
7. Красюк И. К., Пащинин П. П., Семенов А. Ю., Фортвов В. Е.// Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 7. С. 593.
8. Moshe E., Elieser S., Dekel E., Ludmirsky A., Henis Z., Werdiger M., Goldberg I. B., Elieser D.//J. of Appl. Phys. 1998. V. 83. № 8. P. 4004.
9. Moshe E., Elieser S., Henis Z., Werdiger M., Dekel E., Horovitz Y., Maman S., Goldberg I. B., Elieser D.//Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. № 12. P. 1555.
10. Krasnyuk I. K., Pashinin P. P., Semenov A. Yu.//Laser Physics. 2006. V. 16. № 9. P. 1345.

Статья поступила в редакцию 19 июня 2008 г.

Laser acceleration of thin foils for receiving experimental data about ultimate strength of matter

V. I. Vovchenko, I. K. Krasnyuk, P. P. Pashinin, A. Yu. Semenov
A. M. Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia

Laser-driven thin foils were used for investigation spallation phenomena in case of high value of strain rates. In experiments the aluminium foils with thickness 8 and 15 mkm were used as impactors. The foil mass and velocity after laser ablation and acceleration were determined by the method of their deceleration in a gas atmosphere. A 210-mkm-aluminium foil was used as a target. As a result of a series of experiments, we found that in case of strain rate varying from $3.6 \cdot 10^7$ to $8 \cdot 10^7$ 1/s the ultimate spall strength of aluminium target was equal to 90.4 kbar. This value is in accordance with theoretical estimation.

PACS: 52.38.-r