

# Особенности поведения вещества в области отрицательных давлений, создаваемых действием лазерного импульса пикосекундной длительности

С.А.Абросимов, А.П.Бажулин, В.В.Воронов, А.А.Гераськин, И.К.Красюк, П.П.Пашинин, А.Ю.Семенов, И.А.Стучебрюхов, К.В.Хищенко, В.Е.Фортов

*Получены новые экспериментальные данные о характере откола и механической прочности мишеней из алюминия, алюминий-магниевого сплава (АМг6М), полиметилметакрилата (ПММА, оргстекло), тантала, меди, вольфрама, палладия, кремния и свинца при воздействии на них лазерным излучением длительностью 70 пс. Экспериментально изучены особенности явления откола, при котором происходит отделение части вещества мишени от ее тыльной поверхности в результате действия отрицательных давлений (растягивающих напряжений) в веществе. Для определения момента времени откола разработан и реализован электроконтактный метод измерения скорости откольного слоя. Полученные результаты показали, что значения откольных прочностей исследованных материалов при умеренных амплитудах ударно-волнового воздействия находятся в соответствии с известными литературными данными, а при больших давлениях наблюдается рост откольной прочности, что указывает на упрочнение материала. Результаты исследований свидетельствуют о том, что динамическая прочность вещества зависит как от длительности, так и от амплитуды ударно-волнового воздействия на мишень.*

**Ключевые слова:** лазерное излучение, пикосекундная длительность, абляционное давление, ударная волна, отрицательное давление, явление откола, скорость деформирования, предельная прочность, численное моделирование.

## 1. Введение

Интерес к исследованию вещества в области отрицательных давлений связан с тем, что оно позволяет получить новые данные об уравнениях состояния, фазовых переходах, полиморфных превращениях и механизмах разрушения материалов при растягивающих напряжениях в ранее неизученных областях фазовой диаграммы [1]. В настоящее время наиболее интересным является ударно-волновое воздействие на исследуемую мишень пикосекундной и фемтосекундной длительности, что позволяет продвинуться в область весьма коротких длительностей растягивающих напряжений.

В настоящей работе представлены результаты исследования характера откола и динамической механической прочности мишеней из алюминия (Al), алюминий-магниевого сплава (АМг6М), полиметилметакрилата (ПММА, оргстекло), тантала (Ta), меди (Cu), вольфрама (W), палладия (Pd), кремния (Si) и свинца (Pb) при воздействии на них импульсами лазерного излучения длительностью 70 пс, когда достигается скорость деформирования материала вплоть до  $4 \times 10^8$  с<sup>-1</sup>.

Для получения сведений о динамической механической прочности исследуемых материалов использовано явление откола, возникающее на тыльной (свободной) стороне мишени в результате отражения импульса давления,

генерируемого действием импульса лазерного излучения на ее лицевой поверхности [2]. В результате отражения свободная поверхность мишени приходит в движение, что вызывает распространение волны разрежения навстречу волне сжатия. На некотором расстоянии от тыльной поверхности отрицательное давление (растягивающее напряжение) в мишени может превысить предел прочности материала на разрыв, что и приводит к образованию откольного слоя, который отделяется и отлетает от исходного образца. Для определения откольной прочности и скорости деформирования материала использован подход, основанный на измерении глубины откольной выемки после импульсного лазерного воздействия на мишень и измерения скорости откольного слоя с последующим математическим моделированием ударно-волнового процесса в исследуемой мишени.

## 2. Условия экспериментов

Эксперименты были выполнены на лазерной установке «Камертон-Т» Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН. Параметры установки: активный элемент – фосфатное неодимовое стекло, рабочая длина волны 0.527 мкм (вторая гармоника), длительность импульса 70 пс. Энергия в лазерном импульсе варьировалась от 0.1 до 1.5 Дж. Выходной лазерный пучок диаметром 75 мм фокусировался двухкомпонентным объективом на мишени в пятна диаметром от 0.2 до 0.8 мм в соответствии с толщинами мишеней, необходимыми для обеспечения одномерности гидродинамических течений в исследуемых образцах. Распределение интенсивности лазерного излучения в области фокусировки было близким к равномерному. При этом максимальная плотность потока лазерного излучения достигала  $6.2 \times 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>, а абляционное давление – 13.5 Мбар. Мишени представляли собой пластины из ис-

С.А.Абросимов, А.П.Бажулин, В.В.Воронов, А.А.Гераськин, И.К.Красюк, П.П.Пашинин, А.Ю.Семенов, И.А.Стучебрюхов. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: krasuyuk@kapella.gpi.ru, lesha@kapella.gpi.ru  
К.В.Хищенко, В.Е.Фортов. Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412 Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2

Поступила в редакцию 24 декабря 2012 г., после доработки – 8 февраля 2013 г.

следуемых материалов толщиной от 50 до 380 мкм. Материалы мишеней были высокой чистоты, за исключением палладия, в котором содержалось некоторое количество углерода и кислорода.

Для определения момента времени откола  $t_{sp}$ , что важно в экспериментах с большими амплитудами ударно-волнового воздействия, применялся электроконтактный метод измерения скорости перемещения откольного слоя [3]. В общем случае для определения момента времени откола  $t_{sp}$  необходимо использовать нелинейное уравнение

$$t_{sp} + L/w_{sp} = t_1.$$

Здесь  $L$  – расстояние от тыльной стороны мишени до электроконтактного датчика (в наших экспериментах  $L = 0.78$  мм);  $t_1$  – время подлета откольной пластины к электроконтактному датчику. Скорость откольного слоя  $w_{sp}$  вычисляется по формуле

$$w_{sp} = \frac{1}{m_{sp}} \int_0^{t_{sp}} P(t) dt,$$

где  $P(t)$  – профиль давления в плоскости откола;  $m_{sp} = \rho_0 h_{sp}$  – масса на единицу площади откольной пластины толщиной  $h_{sp}$ . Численные расчеты показывают, что за время свободного движения пластины ударно-волновые процессы в ней затухают, и скорость пластины может характеризоваться ее средним значением  $w_{sp}$ . В условиях проведенных экспериментов время замыкания электроконтактного датчика  $t_1$  было значительно больше, чем  $t_{sp}$ , поэтому за скорость откольного слоя принималась величина  $w_{sp} \approx L/t_1$ . Зафиксировав момент откола  $t_{sp}$  и зная график зависимости давления от времени, можно определить величину откольной прочности  $\sigma^* = |P(t_{sp})|$ .

### 3. Численное моделирование

Расчеты по результатам экспериментов проводились с помощью одномерного численного кода, созданного по схеме типа Куранта–Изаксона–Риса на основе уравнений гидродинамики [4]. В расчетах были использованы широкодиапазонные полуэмпирические уравнения состояния исследуемых веществ [5, 6]. При этом предполагалось, что форма импульса абляционного давления на лицевой поверхности мишени повторяла форму импульса лазерного излучения. Связь между амплитудой импульса абляционного давления  $P_a$  (в Мбар) и интенсивностью лазерного излучения  $I_{las}$  (в ТВт/см<sup>2</sup>) задавалась полуэмпирической формулой [7]:

$$P_a = 12(0.01 I_{las} / \lambda)^{2/3} [A/(2Z)]^{3/16},$$

применимой при  $I_{las} \geq 1$  ТВт/см<sup>2</sup>. Здесь  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения (в мкм);  $A$  – атомная масса;  $Z$  – атомный номер вещества мишени.

В ряде экспериментов (первый вариант) фиксировалась пороговая интенсивность лазерного импульса, при которой возникал откол. В другой части экспериментов (второй вариант), когда порог откола был превышен, главное внимание уделялось скорости откольного слоя, измеренной с помощью электроконтактного датчика. Далее для каждого опыта (в рамках гидродинамической моде-

ли) проводились расчеты временных зависимостей давления  $P$  и плотности вещества  $\rho$  в положении плоскости откола, которое было определено экспериментально. Скорость деформирования вещества в плоскости откола определялась как производная по времени вычисленной функции  $\rho(t)$ :  $\dot{\epsilon} = -\rho_0^{-1}(d\rho/dt)$ , где  $\rho_0$  – начальная плотность образца. На представленных ниже графиках использована эквивалентная запись скорости деформирования:  $\dot{\epsilon} = V_0^{-1}(dV/dt)$ , где  $V = \rho^{-1}$  – удельный объем материала,  $V_0 = \rho_0^{-1}$ . Результаты одного из вариантов численного моделирования воздействия лазерного излучения на мишень из алюминия толщиной 50 мкм показаны на рис. 1. Заметим, что при известной величине модуля объемного сжатия  $B_0$  для исследуемого материала скорость деформирования может также быть вычислена по формуле  $\dot{\epsilon} = B_0^{-1}(dP/dt)$ , где  $P(t)$  – временная зависимость давления в плоскости откола, определяемая любым доступным методом.

В первом варианте экспериментов при пороговых амплитудах ударного воздействия за величину откольной прочности принимался модуль минимального значения отрицательного давления в плоскости откола:  $\sigma^* = |P_{min}|$ .

Во втором варианте экспериментов (при больших амплитудах ударного воздействия) величина откольной проч-

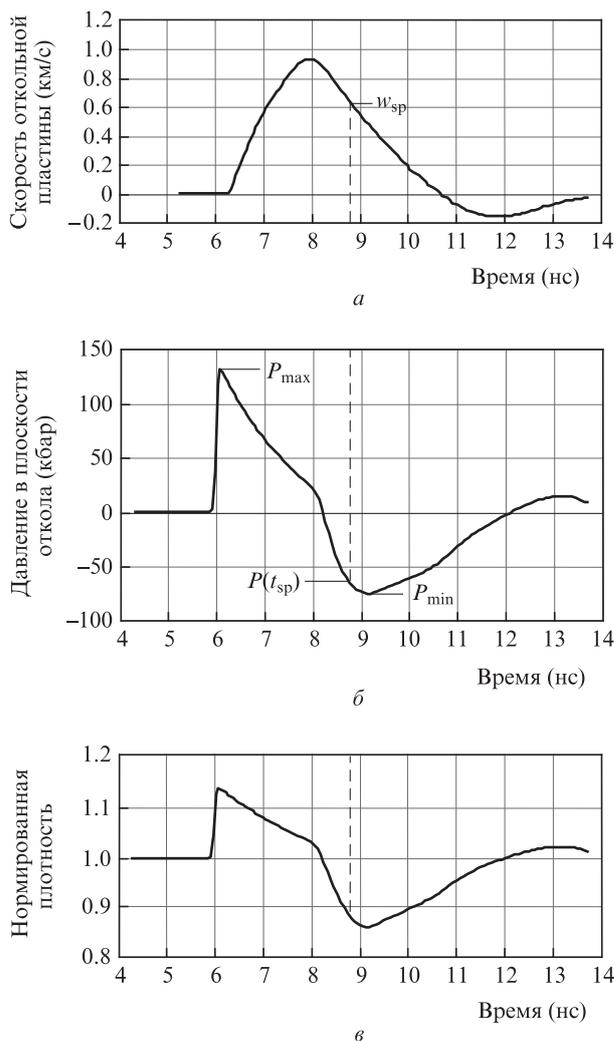


Рис. 1. Расчетные зависимости скорости откольной пластины (а), давления (б) и нормированной плотности вещества  $\rho/\rho_0$  (в) от времени. Вертикальная штриховая линия соответствует моменту откола.

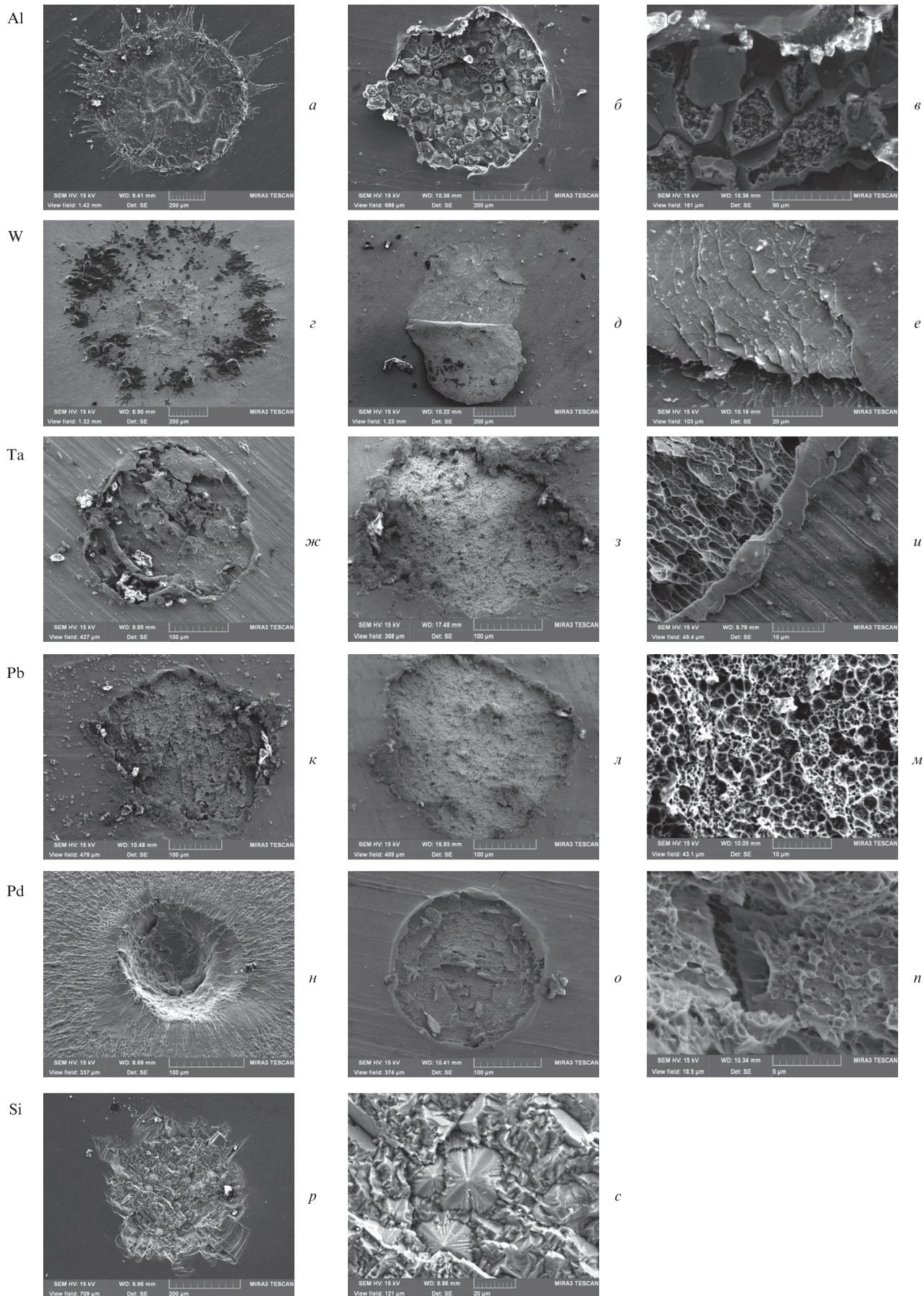


Рис.2. Изображения с разным увеличением лицевых (*а, г, н*) и тыльных (все остальные) поверхностей мишеней после лазерного воздействия, полученные с помощью растрового электронного микроскопа для алюминия (*а-в*), вольфрама (*г-е*), тантала (*ж-и*), свинца (*к-м*), палладия (*н-п*) и кремния (*р, с*).

ности определялась исходя из измеренной скорости откольного слоя  $w_{sp}$ , которая дает возможность найти момент  $t_{sp}$  по расчетной зависимости скорости откольной пластины от времени (эта скорость определялась как импульс пластины, деленный на ее массу, с учетом положения плоскости откола). В этом варианте за величину откольной прочности принимался модуль отрицательного давления в момент времени откола:  $\sigma^* = |P(t_{sp})|$  (см. рис.1).

#### 4. Полученные результаты

На рис.2 показаны изображения лицевых и тыльных поверхностей мишеней после воздействия на них лазерным излучением длительностью 70 пс. Фотографии получены с помощью сканирующего электронного микроскопа. Обратим внимание на изображения алюминиевой и вольфрамовой мишеней. В случае алюминия (рис.2,б,в) в плоскости откола видны равномерно распределенные образования, похожие на последствия микровзрывов в откольном слое. Вероятно, это является свидетельством возможных неоднородностей вещества [1]. В случае вольфрама на рис.2,д (в нижней его части) можно видеть изображение откольного слоя, не отделившегося от мишени, а на рис.2,е видна его слоистая структура на границе откола, что говорит о множественном отколе. Характер откольного слоя в пластинах из кремния толщиной 380 мкм (рис.2,с) с ориентацией лицевой поверхности (100) (угловое отклонение  $\pm 0.5^\circ$ ), по-видимому, указывает на плавление в области откола с последующей рекристаллизацией.

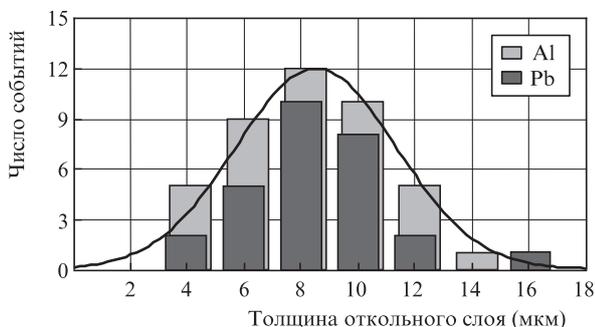


Рис.3. Гистограммы количества отколов в зависимости от толщины откольного слоя для мишеней из алюминия и свинца.

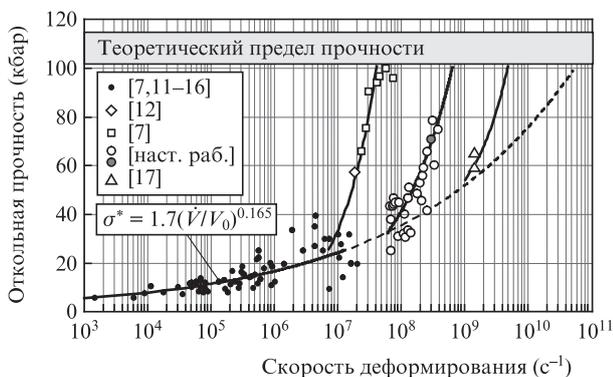


Рис.4. Зависимости откольной прочности  $\sigma^*$  алюминиевых мишеней от скорости деформирования  $\dot{V}/V_0$  (экспериментальные данные) (● — результат одного из опытов настоящей работы с использованием электроконтактного датчика, см. рис.1).

Рис.3 демонстрирует количество отколов в алюминиевых и свинцовых мишенях в зависимости от толщины откольного слоя. Распределение величин описывается кривой Гаусса, что указывает на статистический характер возникновения отколов.

На рис.4–7 приведены графики зависимостей откольной прочности для алюминия, сплава АМг6М, ПММА, тантала, меди и свинца от скорости деформирования. Для полноты картины, а также для сравнения наряду с результатами настоящей работы показаны данные экспериментов из работ [8–19].

Из анализа рис.5–6 видно, что в случае алюминия, АМг6М и ПММА при длительностях ударно-волнового воздействия 1.5 и 2.5 нс после монотонного возрастания



Рис.5. Зависимости откольной прочности  $\sigma^*$  мишеней из алюминий-магниевого сплава АМг6М от скорости деформирования  $\dot{V}/V_0$  (экспериментальные данные).

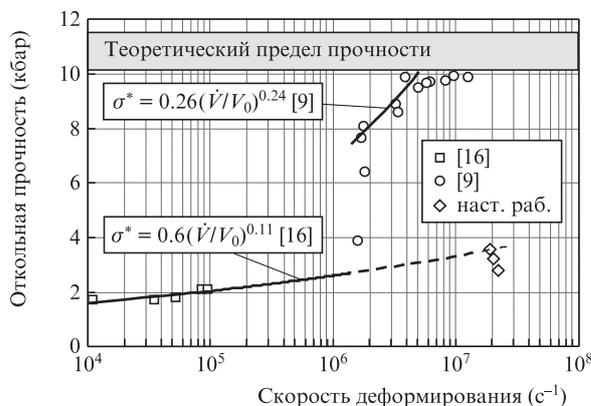


Рис.6. Зависимости откольной прочности  $\sigma^*$  мишеней из ПММА от скорости деформирования  $\dot{V}/V_0$  (экспериментальные данные).

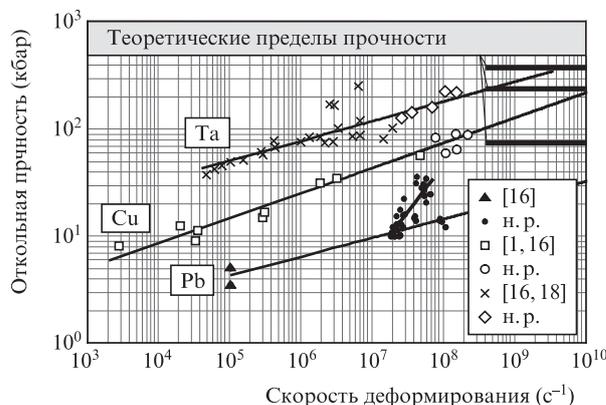


Рис.7. Зависимости откольной прочности  $\sigma^*$  мишеней из свинца, меди и тантала от скорости деформирования  $\dot{V}/V_0$  (экспериментальные данные).

откольной прочности  $\sigma^*$  (взрывные эксперименты), при увеличении скорости деформирования выше некоторого значения, происходит значительный рост прочности вплоть до достижения предельных величин. Для алюминия рост наблюдается в диапазоне скоростей  $(1.4-4.4) \times 10^7 \text{ c}^{-1}$ , для сплава АМг6М –  $(1.0-4.0) \times 10^7 \text{ c}^{-1}$  и для ПММА – при  $2.0 \times 10^6 \text{ c}^{-1}$ .

Значения предельной (идеальной) прочности вычислены по формуле

$$\sigma_{id} = -\rho_0 c_0^2 / (4b),$$

где  $c_0$  и  $b$  – коэффициенты ударной адиабаты материала  $D = c_0 + bu$  [20].

Следует отметить, что вычисленные таким образом значения предельной прочности являются завышенными примерно на 20% по сравнению с данными реальных полуэмпирических широкодиапазонных уравнений состояния [1].

Данные, полученные при воздействии на мишени лазерных импульсов длительностью 70 пс, показывают, что при умеренных амплитудах ударного воздействия откольные прочности находятся в согласии с известными функциональными зависимостями этих величин от скорости деформирования. При больших давлениях в случае алюминия и свинца (рис.4 и 7) наблюдается резкий рост откольной прочности, что указывает на упрочнение этих материалов в результате ударного воздействия. Зарегистрированный рост откольной прочности алюминия и свинца связан с тем, что в проведенных экспериментах увеличение скорости деформирования достигалось не только сокращением длительности воздействия, но и повышением амплитуды ударного воздействия. Последнее приводит к упрочнению исследуемых материалов. В этом случае могут исчезать дефекты материала, приводящие к его преждевременному отколу. Такой вывод подтверждают результаты рентгеноструктурного анализа мишеней из алюминия и свинца на дифрактометре ДРОН-4 после лазерного ударного воздействия. Исследование показало, что в этих материалах не происходит изменения кристаллической структуры вещества мишени – новые фазы не образуются. Обнаружено уширение рентгеновских дифракционных линий, что указывает на уменьшение размеров кристаллических зерен. Появление наблюдаемых структурных изменений вещества означает, что для разрушения материала необходимы более высокие напряжения, т.е. предел

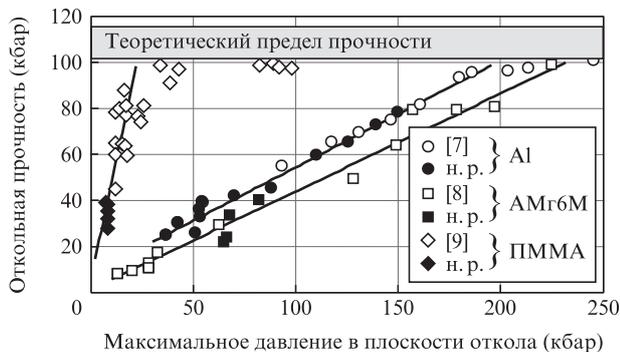


Рис.8. Зависимости откольной прочности  $\sigma^*$  от максимального давления в плоскости откола  $P_{\max}$  для алюминия (1, 2), АМг6М (3, 4) и ПММА (5, 6) (экспериментальные данные).

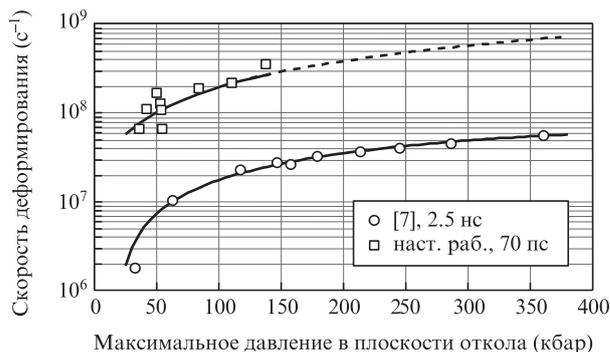


Рис.9. Зависимости скорости деформирования  $\dot{V}/V_0$  мишеней из алюминия от максимального давления в плоскости откола  $P_{\max}$  при длительности ударного воздействия на мишень 2.5 нс [7] и 70 пс.

прочности материала повышается [21], что и наблюдается в проведенных экспериментах.

Как видно из рис.8, с увеличением максимального давления в плоскости откола  $P_{\max}$  откольные прочности алюминия, сплава АМг6М и ПММА линейно возрастают вплоть до достижения теоретических пределов прочности. На рис.9 приведены зависимости скорости деформирования от  $P_{\max}$  в плоскости откола по результатам [7] и настоящей работы. Приведенные данные показывают, что для продвижения в область более высоких скоростей деформирования необходимо либо увеличивать амплитуду ударно-волнового воздействия, либо сокращать его длительность, что является более перспективным.

## 5. Заключение

В настоящей работе получены новые данные о прочности ряда материалов при высоких (вплоть до  $4 \times 10^8 \text{ c}^{-1}$ ) скоростях деформирования. Выяснено, что поведение вещества при отрицательных давлениях зависит в большей степени от предыстории динамического нагружения, включающей в себя много факторов, среди которых существенное значение имеют как амплитуда, так и длительность импульса ударного сжатия мишени. Полученные результаты, помимо фундаментального значения, могут найти применение при создании конструктивных элементов, работающих в условиях высококонцентрированных энергетических воздействий малой длительности.

Авторы благодарны А.И.Савватимскому за предоставление ряда исследованных материалов. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 11-02-12003-офи\_м-2011, 11-08-01225, 12-02-00625-а и 12-02-00746-а), программ Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения» № 13П и «Вещество при высоких плотностях энергии» № 2П, а также грантов Президента РФ поддержки ведущих научных школ № НШ-368.2012.2 и НШ-7241.2012.2.

1. Канель Г.И., Фортвов В.Е., Разоренов С.В. *УФН*, 177 (8), 809 (2007).
2. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (М.: Физматлит, 2008).
3. Красюк И.К., Пашинин П.П., Семенов А.Ю., Фортвов В.Е. *Квантовая электроника*, 33 (7), 593 (2003).
4. Куликовский А.Г., Погорелов Н.В., Семенов А.Ю. *Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений* (М.: Физматлит, 2012, с. 60).
5. Fortov V.E., Khishchenko K.V., Levashov P.R., Lomonosov I.V. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, 415 (3), 604 (1998).

6. Khishchenko K.V., Lomonosov I.V., Fortov V.E. *High Temp. High Press.*, **30** (3), 373 (1998).
7. Абросимов С.А., Бажулин А.П., Воронов В.В., Красюк И.К., Пащинин П.П., Семенов А.Ю., Стучебрюхов И.А., Хищенко К.В. *ДАН*, **442** (6), 752 (2012).
8. Вовченко В.И., Красюк И.К., Пащинин П.П., Семенов А.Ю. *Прикладная физика*, **1**, 12 (2009).
9. Батани Д., Вовченко В.И., Канель Г.И., Кильпино А.В., Красюк И.К., Ломоносов И.В., Пащинин П.П., Семенов А.Ю., Фортов В.Е., Шашков Е.В. *ДАН*, **389** (3), 328 (2003).
10. Geras'kin A.A., Khishchenko K.V., Krasuyuk I.K., Pashinin P.P., Semenov A.Yu., Vovchenko V.I. *Contrib. Plasma Phys.*, **4** (7–8), 451 (2009).
11. Вовченко В.И., Красюк И.К., Пащинин П.П., Семенов А.Ю. *ДАН*, **338** (3), 322 (1994).
12. Moshe E., Eliezer S., Henis Z., Werdiger M., Dekel E., Horovitz Y., Maman S. *Appl. Phys. Lett.*, **76** (12), 1555 (2000).
13. Eliezer S., Gilath I., Bar-Noy T. *J. Appl. Phys.*, **67** (2), 714 (1990).
14. Fortov V.E., Kostin V.V., Eliezer S. *J. Appl. Phys.*, **70** (8), 4524 (1991).
15. Moshe E., Eliezer S., Dekel E., Ludmirsky A., Henis Z., Werdiger M., Goldberg I.B., Eliaz N., Eliezer D. *J. Appl. Phys.*, **83** (8), 4004 (1998).
16. Bachmann H., Baumung K., Kanel G.I., Karov H.U., Licht V., Rusch D., Singer J., Stoltz O. *Proc. 9th Int. Conf. High Power Particle Beams* (Springfield, VA: NTIS, 1993, vol. 2, p. 963).
17. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. *Ударно-волновые явления в конденсированных средах* (М.: Янус-К, 1996, с. 149).
18. Ашитков С.И., Агранат М.Б., Канель Г.И., Комаров П.С., Фортов В.Е. *Письма в ЖЭТФ*, **92** (8), 568 (2010).
19. Разоренов С.В., Канель Г.И., Гаркушкин Г.В., Игнатова О.Н. *ФТТ*, **54** (4), 742 (2012).
20. McQueen R.G., Marsh S.P. *J. Appl. Phys.*, **33**, 654 (1962).
21. Ионов В.Н., Селиванов В.В. *Динамика разрушения деформируемого тела* (М.: Машиностроение, 1987, с. 45).