

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

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

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
ул. Вавилова, 38, Москва 119991, Россия

* Объединенный институт высоких температур РАН,
ул. Ижорская, 13/19, Москва 125412, Россия
krasyuk99@kapella.gpi.ru



Научно-координационная Сессия "Исследования неидеальной плазмы"
23-24 ноября 2011 г., ПРЕЗИДИУМ РАН, Ленинский пр-т 32а, Москва

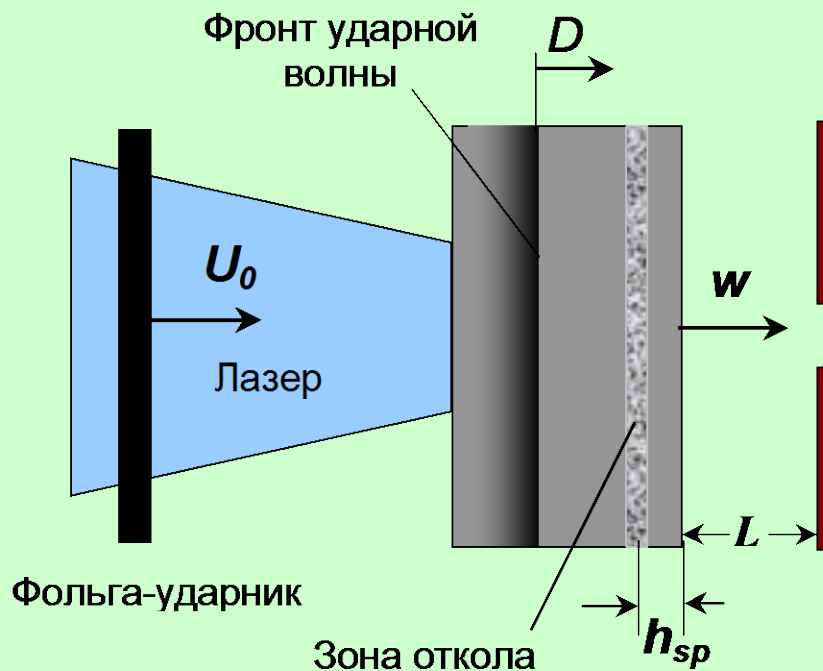
ВВЕДЕНИЕ

Ранее, при исследовании динамической прочности алюминия, алюминий-магниевого сплава АМгбМ и полиметилметакрилата (ПММА) методом лазерной генерации ударных волн было установлено, что при достижении определенных величин скоростей деформирования механические прочности указанных материалов **достигают их предельных значений** [1-3]. Представляет интерес выяснить, что будет при дальнейшем увеличении скорости деформирования. Ответ на этот вопрос можно получить, либо увеличивая **амплитуду** ударного воздействия, либо **существенно сокращая его длительность**.

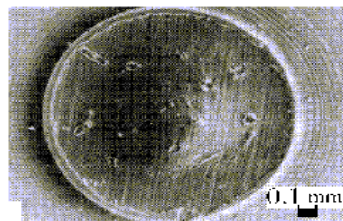
В данной работе представлены результаты исследования динамической механической прочности алюминия, алюминиевого сплава АМгбМ и ПММА при воздействии на них импульсным лазерным излучением **длительностью 70 пс** (в выше цитируемых работах длительность лазерного импульса составляла 1.5 и 2.5 нс).

1. В.И.Вовченко, И.К.Красюк, П.П.Пашинин, А.Ю.Семенов. // Прикладная физика, 2009. № 1. С. 12-17.
2. Д.Батани, В.И.Вовченко, Г.И.Канель и др. // ДАН. 2003. Т. 389. № 3. С. 328.
3. А.А. Geras'kin, K.V. Khishchenko, I.K. Krasyyuk and al. // Contrib. Plasma Phys. 2009. V. 49. No. 7-8. P. 451-454.

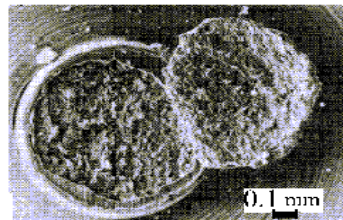
Динамическая прочность материалов исследуется путем анализа откольных явлений при отражении ударной волны от свободной поверхности мишени



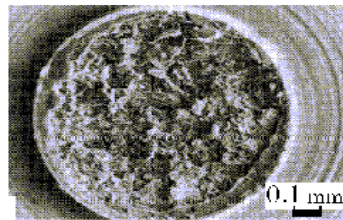
154
кбар



187
кбар



247
кбар



Фотографии тыльных сторон мишеней АМгбМ после лазерно-ударного воздействия ($\tau = 2.5$ нс).

Метод определения величин скорости деформирования и откольной прочности

В данной работе для определения величин откольной прочности и скорости деформирования материала использован подход, основанный на измерении глубины откольной выемки при пороговой величине ударного воздействия на мишень с последующим математическим моделированием ударно-волнового процесса в мишени [1].

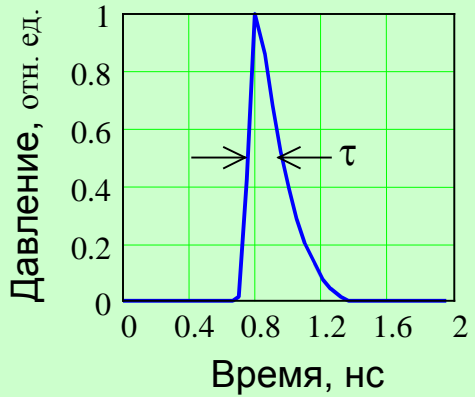
Расчеты проводились с помощью численного кода, созданного по схеме типа Куранта–Изаксона–Риса на основе уравнений гидродинамики [2]. В расчетах были использованы широкодиапазонные полуэмпирические уравнения состояния исследуемых веществ [3, 4].

1. *R.G. McQueen, D. March. J. Appl. Phys. 1962. V. 33, № 2. P. 654 – 665.*
2. *Куликовский А.Г., Погорелов Н.В., Семенов А.Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 607 с.*
3. *Fortov V.E., Khishchenko K.V., Levashov P.R., Lomonosov I.V. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 1998. V. 415. № 3. P. 604–608.*
4. *Khishchenko K.V., Lomonosov I.V., Fortov V.E. High Temp.–High Press. 1998. V. 30. № 3. P. 373–378.*

Результаты численного моделирования лазерного воздействия ($\tau = 70$ пс) на алюминиевую мишень толщиной 50 мкм ($I_l = 1.7 \cdot 10^{12}$ Вт/см², $P_{abl} = 0.45$ Мбар)

$$P_{abl}(\text{Мбар}) = 12 \cdot (I_l \cdot 10^{-14} \text{ Вт/см}^2)^{2/3} \cdot (\lambda, \text{ мкм})^{-2/3} \cdot (A/2Z)^{3/16}$$

(λ - длина волны лазерного излучения, A – атомный вес, Z - атомный номер вещества мишени)

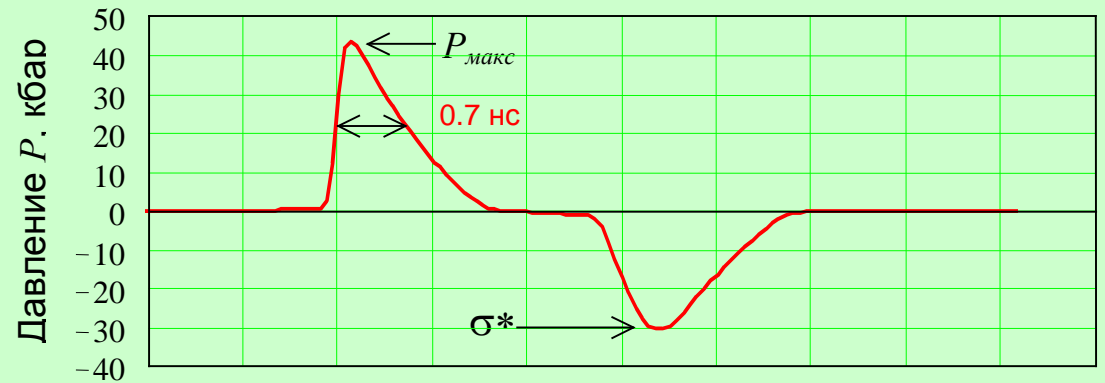


Форма импульса давления на расстоянии 5 мкм от лицевой поверхности мишени

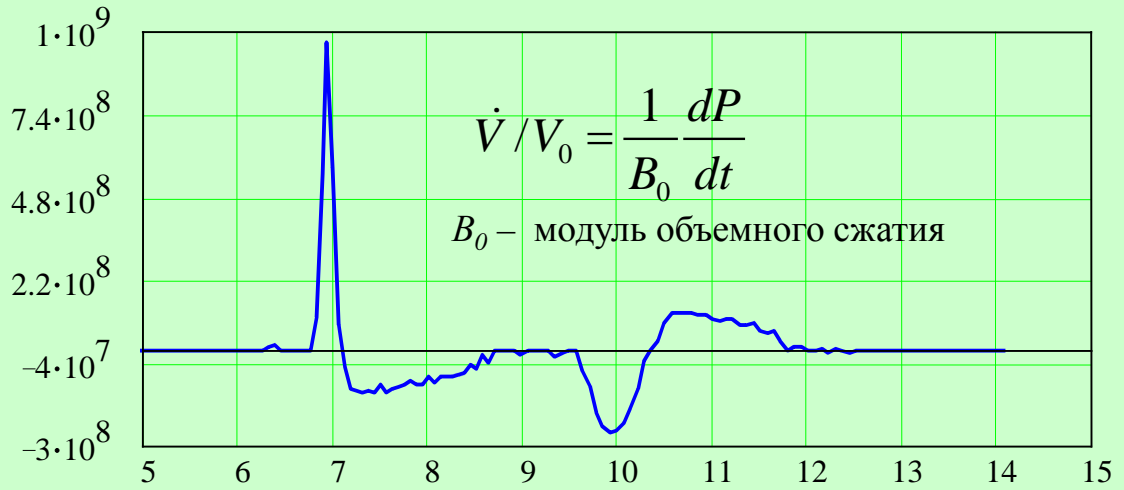
$\tau = 0.2$ нс

На расстоянии 42 мкм

$\tau = 0.7$ нс



Скорость деформирования, 1/с



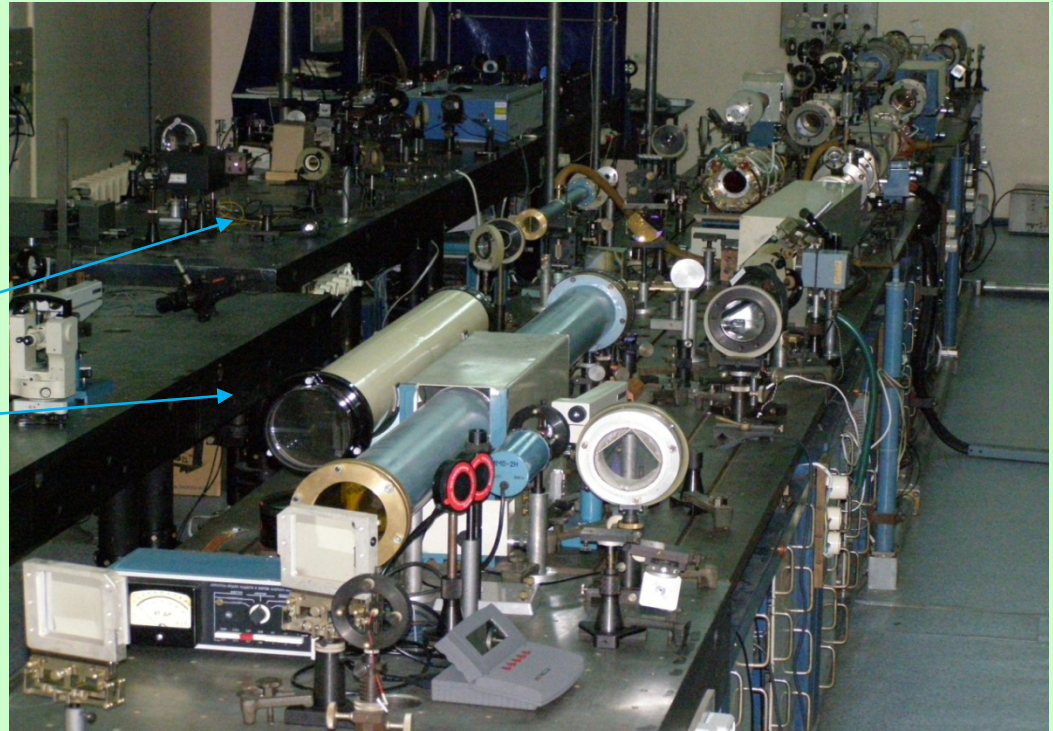
Время, нс

Эксперименты выполнены на лазерной установке "Камертон – Т"

Задающий генератор

Усилительные каскады

Камера взаимодействия



Длительность лазерного импульса

$$\tau = 70 \text{ пс}$$

Длина волны излучения $\lambda = 0.527 \text{ мкм}$

Условия экспериментов

Основные параметры установки “Камертон-Т”: длина волны излучения второй гармоники- **0.527 мкм**, максимальная энергия в импульсе до **5 Дж**, длительность импульса излучения- **70 пс**.

Диаметр лазерного пучка на фокусирующей линзе равен 5 см, фокусное расстояние линзы 40 см.

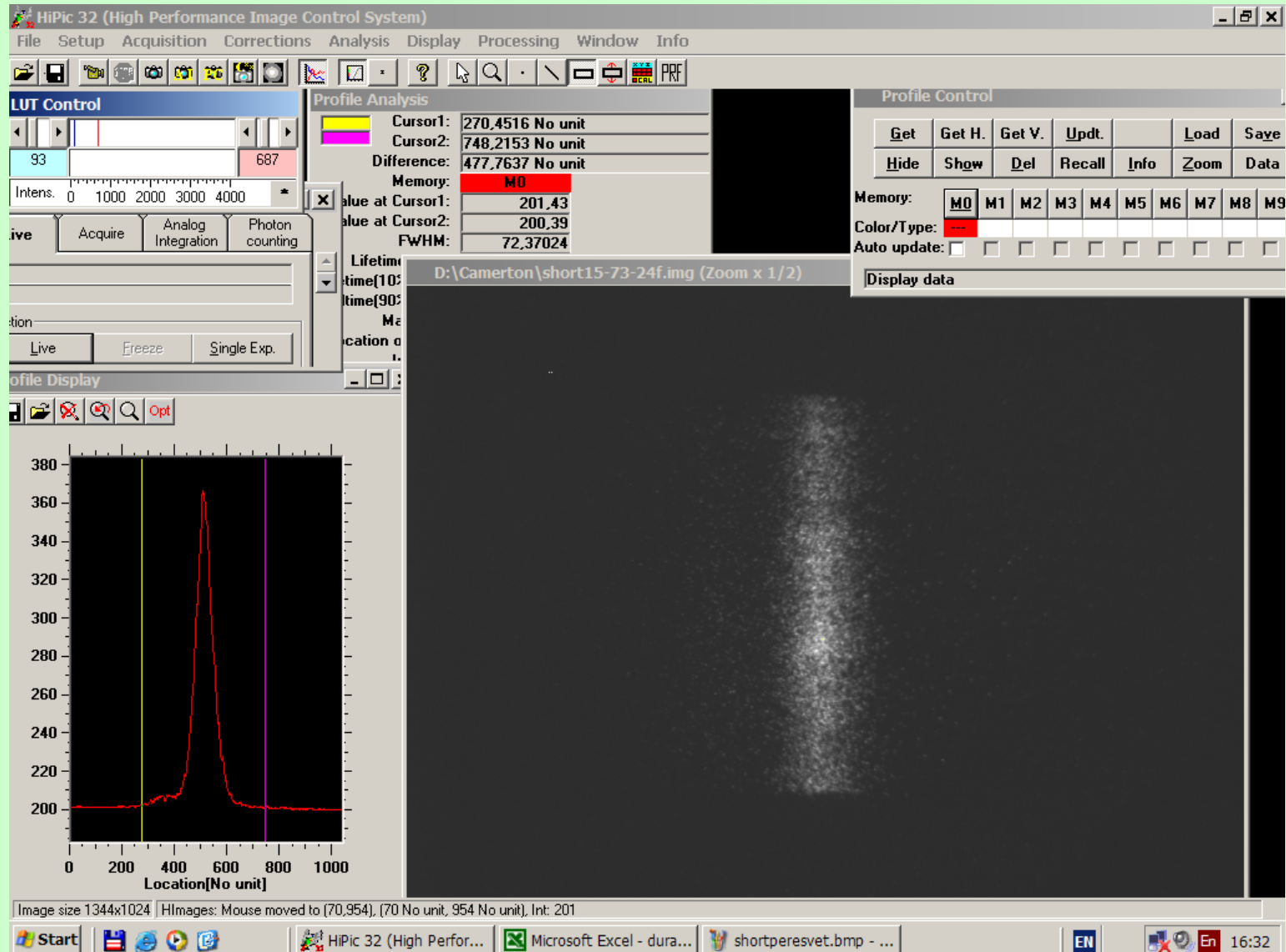
Лазерное излучение фокусировалось на мишени в пятна диаметром **0.3 – 0.8 мм**.

Максимальная величина плотности потока лазерного излучения в области фокусировки достигала величины **$6.2 \cdot 10^{13}$ Вт/см²**, а абляционное давление — **13.5 Мбар**.

Толщины мишеней из алюминия, сплава АМг6М и ПММА - от **50 до 220 мкм**.

Результат измерения временных параметров лазерного импульса

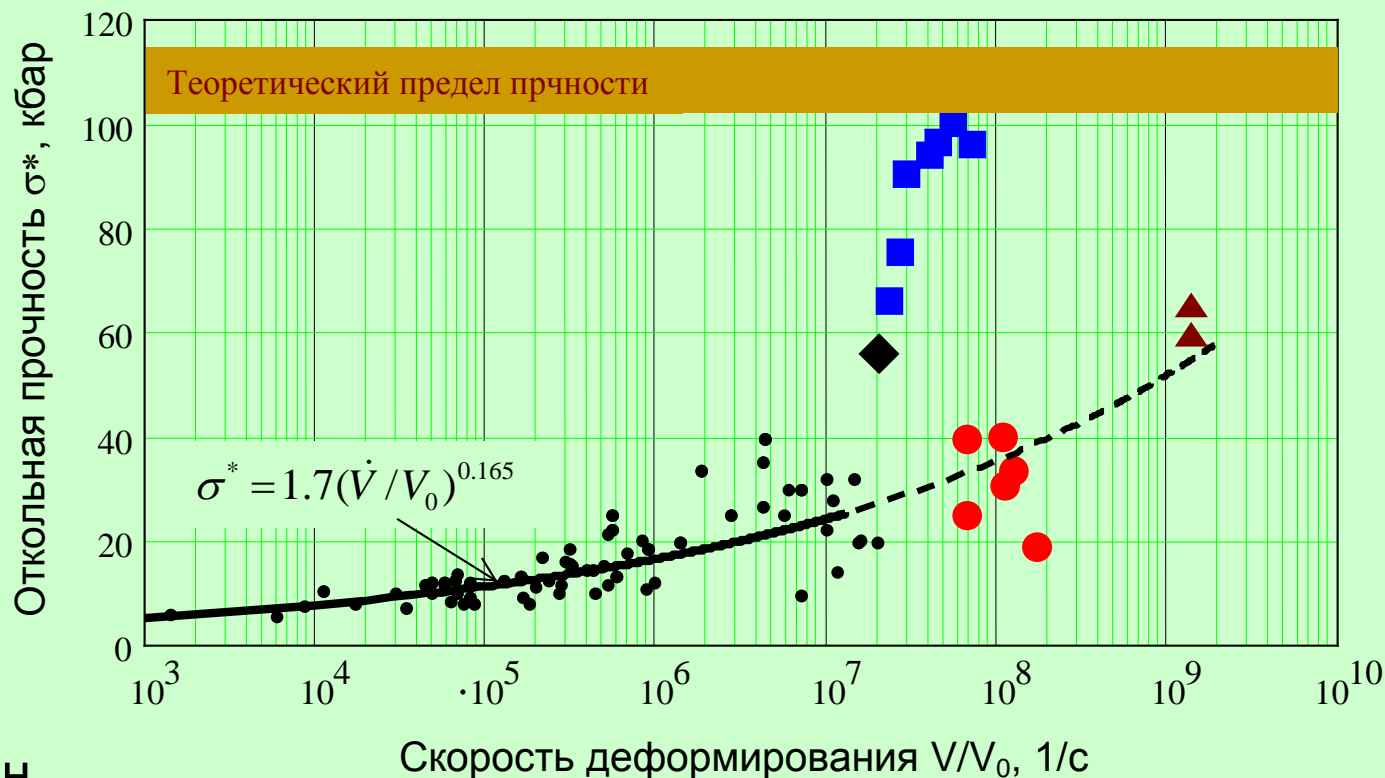
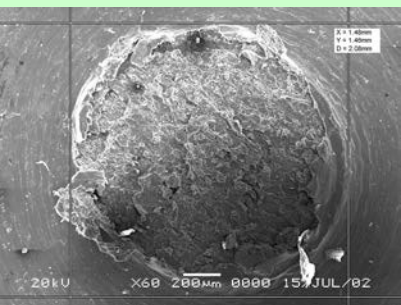
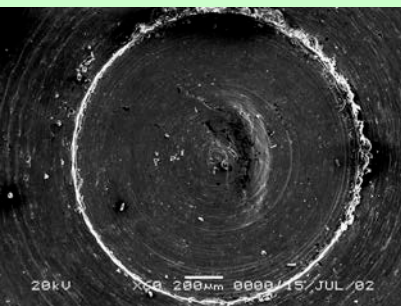
(проведено сотрудниками отдела М.Я. Щелева, ИОФ РАН)



Далее представлены основные результаты исследования зависимостей откольной прочности алюминия, алюминиевого сплава АМг6М и полиметилметакрилата от скорости деформирования.

На графиках наряду с новыми результатами приведены также и результаты, полученные ранее как авторами данного сообщения, так и известные из литературы.

Зависимость откольной прочности алюминия от скорости деформирования



Фотографии
тыльных сторон
мишеней.

Вверху –
порог откола

■ - длительность импульса 1.5 нс

● - длительность импульса 70 пс

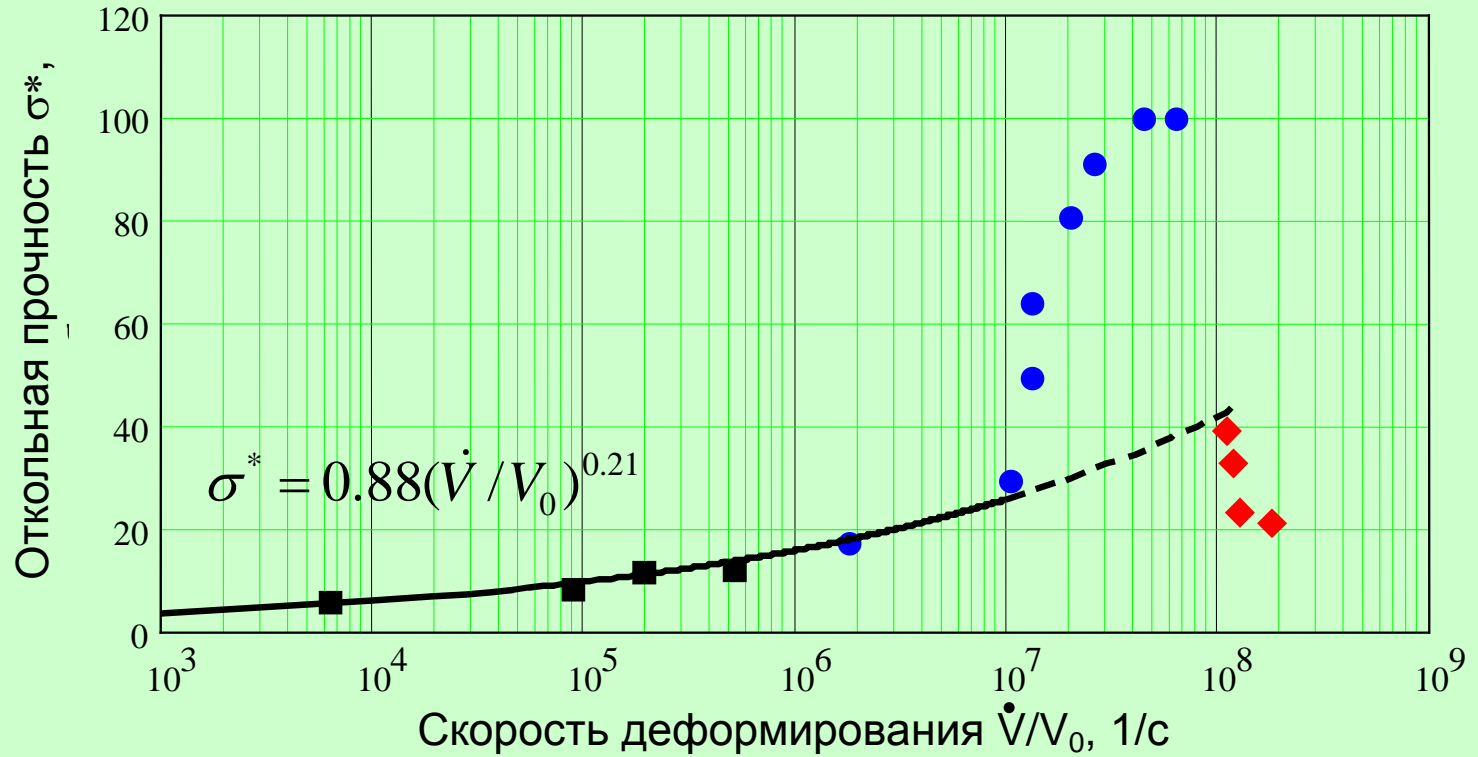
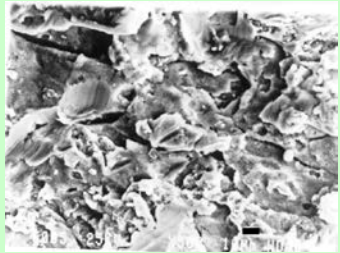
Внизу –
развитый откол

Пояснения к рисунку

Рис. 1. Зависимость откольной прочности алюминия от скорости деформирования. Сплошная кривая является аппроксимацией экспериментальных данных (в количестве 85), опубликованных в работах [1–7], штриховая кривая – ее продолжение в область больших скоростей деформирования. Значки – экспериментальные данные: ■ – [1], ◆ – [3], ▲ – [8], ● – настоящая работа.

1. *Вовченко В.И., Красюк И.К., Пашинин П.П., Семенов А.Ю. // Прикладная физика. 2009. № 1. С. 12–17.*
2. *Moshe E., Eliezer S., Henis Z. et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. № 12. P. 1555–1557.*
3. *Eliezer S., Gilath I., Bar-Noy T. // J. Appl. Phys. 1990. V. 67. № 2. P. 715–724.*
4. *Fortov V.E., Kostin V.V., Eliezer S. // J. Appl. Phys. 1991. V. 70. № 8. P. 4524–4531.*
5. *Moshe E., Eliezer S., Dekel E. et al. // J. Appl. Phys. 1998. V. 83. № 8. P. 4004–4011.*
6. *Bachmann H., Baumung K., Kanel G.I. et al. // Proceedings of the 9th Int. Conf. on High Power Particle Beams, Washington DC, May 25–29, 1992 / Eds. Mosher D., Cooperstein G. Springfield, VA: NTIS, 1993. V. 2. P. 963–968.*
7. *Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 407 с.*
8. *Ашитков С.И., Агранат М.Б., Канель Г.И., и др. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 92. № 8. С. 568–573.*

Зависимость откольной прочности алюминниевого сплава АМг6М от скорости деформирования



Фотографии
откольных
плоскостей

Вверху - $V/V_0 \approx 1 \times 10^6$ 1/c.

Внизу - $V/V_0 \geq 1 \times 10^7$ 1/c

● - длительность импульса 2.5 нс

◆ - длительность импульса 70 пс

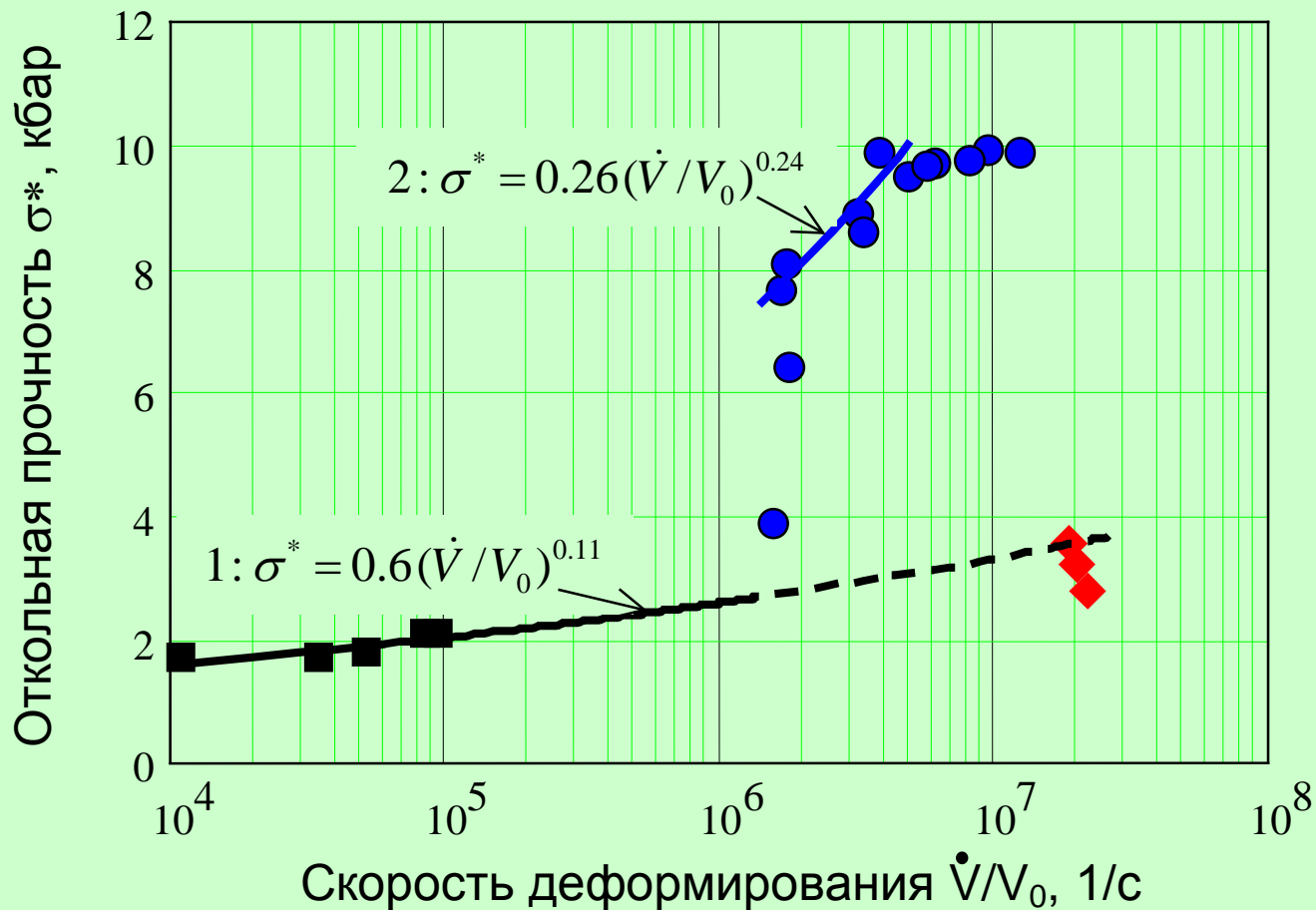
Пояснения к рисунку

Рис. 2. Зависимость откольной прочности алюминиевого сплава АМгбМ от скорости деформирования. Сплошная кривая является функцией сглаживания экспериментальных данных, штриховая кривая – ее продолжение в область больших скоростей деформирования. Значки – экспериментальные данные: ■ – [1], ● – [2], ◆ – настоящая работа.

1. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортков В.Е. // Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М., Янус-К, 1996, 407 с.

2. Д.Батани, В.И.Вовченко, Г.И.Канель и др. // ДАН. 2003. Т. 389. № 3. С. 328.

Зависимость откольной прочности полиметилметакрилата от скорости деформирования



● - длительность импульса 2.5 нс

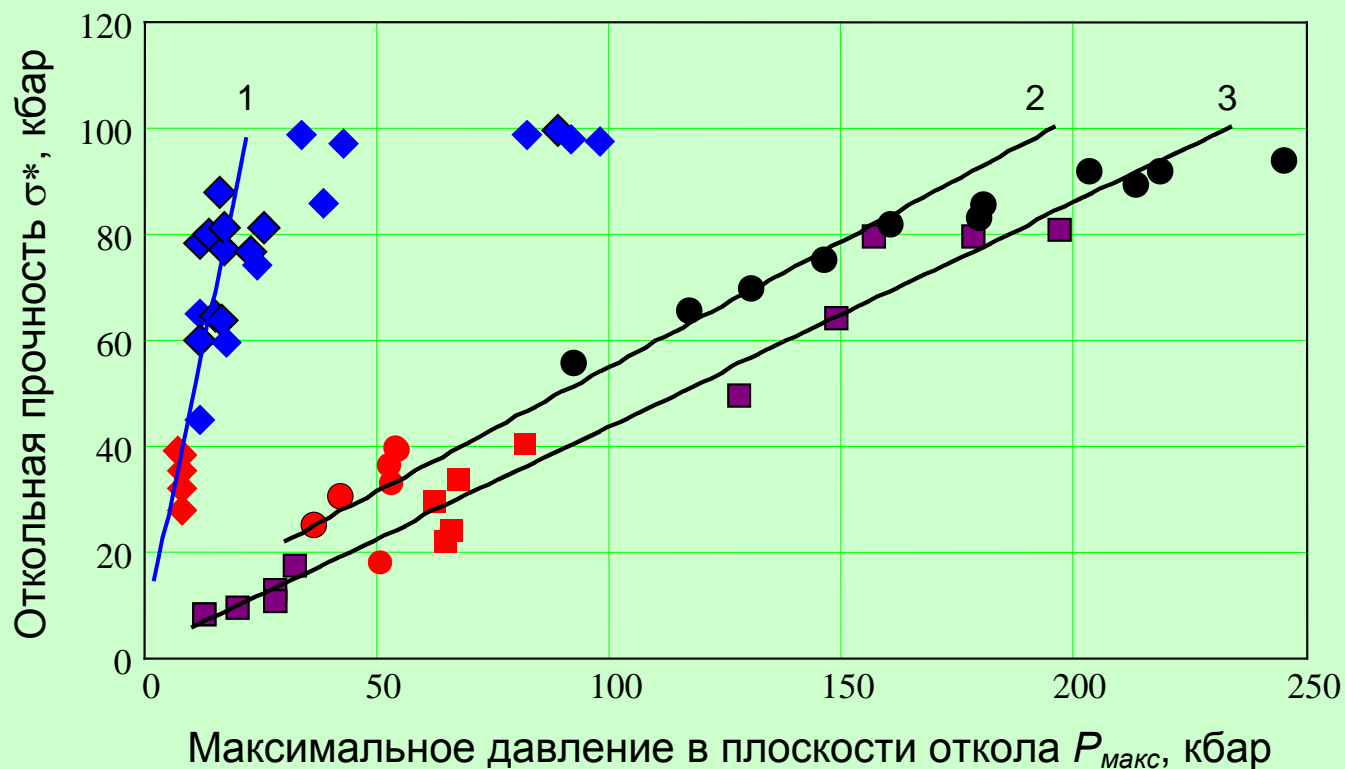
◆ - длительность импульса 70 пс

Пояснения к рисунку

Рис. 3. Зависимость откольной прочности ПММА от скорости деформирования. Сплошная кривая 1 является функцией сглаживания экспериментальных данных при $P_{\text{макс}} \leq 10$ кбар, штриховая кривая – ее продолжение в область больших скоростей деформирования, сплошная кривая 2 является функцией сглаживания экспериментальных данных, полученных при $P_{\text{макс}} = 30$ кбар. Значки – экспериментальные данные: ■ – [1], ● – [2], ◆ – настоящая работа.

1. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. // Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М., Янус-К, 1996, 407 с.
2. A.A. Geras'kin, K.V. Khishchenko, I.K. Krasnyuk and al. // Contrib. Plasma Phys. 2009. V. 49. No. 7-8. P. 451-454.

Установлено, что откольная прочность исследованных материалов возрастает при увеличении амплитуды ударного воздействия из-за упрочнения материала



Мишени из ПММА (кривая 1), алюминия (кривая 2) и сплава АМгбМ (кривая 3)

Значения откольной прочности ПММА увеличены в 10 раз

Красным цветом выделены новые данные

Пояснения к рисунку

Рис. 4. Зависимости откольной прочности от максимального давления в плоскости откола $P_{\text{макс}}$ для ПММА (кривая 1), алюминия (кривая 2,) и сплава АМгбМ (кривая 3). Значки – экспериментальные данные: \blacklozenge – [3], \bullet – [1], \blacksquare – [2], **красным цветом** выделены данные, полученные в настоящей работе. **Значения откольной прочности ПММА увеличены в 10 раз.**

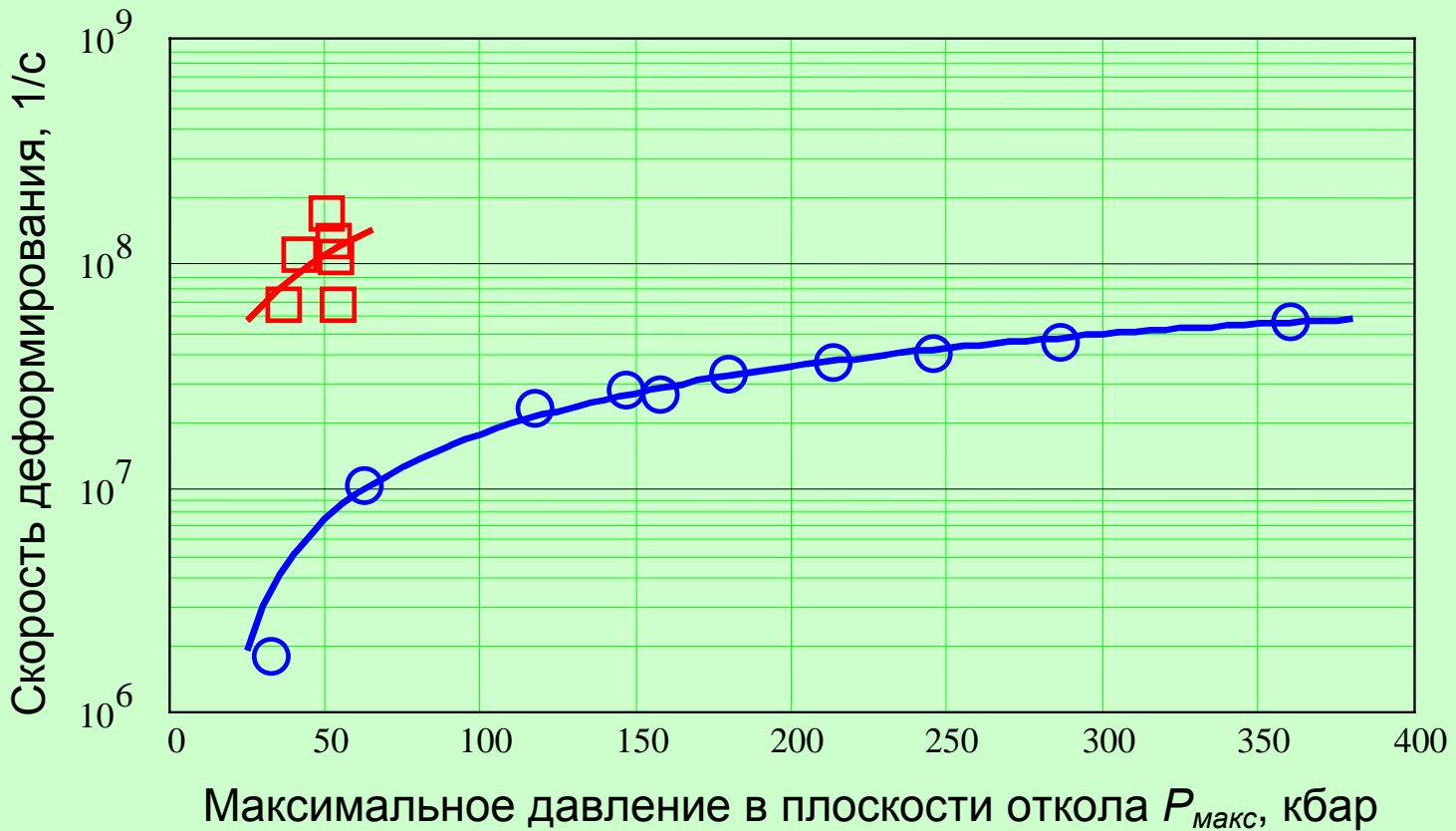
Зависимости откольных прочностей исследованных материалов от величин положительных давлений в плоскости откола указывают на практически линейное возрастание откольных прочностей при увеличении амплитуды давления вплоть до достижения предельных прочностей.

1. В.И. Вовченко, И.К. Красюк, П.П. Пашинин, А.Ю. Семенов. // Прикладная физика, 2009. № 1. С. 12-17.

2. Д. Батани, В.И. Вовченко, Г.И. Канель и др. // ДАН. 2003. Т. 389. № 3. С. 328.

3. А.А. Geras'kin, К.В. Khishchenko, I.К. Krasyyuk and al. // Contrib. Plasma Phys. 2009. V. 49. No. 7-8. P. 451-454.

Для увеличения скорости деформирования при фиксированной длительности ударного воздействия необходимо увеличивать его амплитуду



○ - длительность импульса 2.5 нс

□ - длительность импульса 70 пс

Заключение

Поведение вещества в области отрицательных давлений зависит в большой степени от предыстории динамического нагружения, включающей в себя много факторов, среди которых основными являются **амплитуда и **длительность** импульса ударного воздействия.**

Достижение высоких скоростей деформирования за счет увеличения амплитуды ударно-волнового воздействия при его фиксированной длительности приводит к **упрочнению исследуемого материала, следовательно, к **повышению его динамической прочности**.**

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 09-02-00487, 09-02-01133, 09-02-12046, 11-02-12003-офи_2011), Программ Президиума РАН № 12 "Экстремальные световые поля и их приложения" и № 2 "Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физика сильно сжатого вещества" и при государственной поддержке ведущих научных школ РФ (грант НШ-3675.2010.2).

Спасибо за внимание!