

**Сравнительное исследование распространения ударных волн
в оргстекле и эпоксидной смоле**

*Б. А. Демидов, Е. Д. Казаков, Ю. Г. Калинин, А. А. Курило, М. Г. Стрижаков,
А. Ю. Шашков*

Представлены экспериментальные результаты исследования динамики ударных волн, возбуждаемых при воздействии сильнофокусированного электронного пучка на образцы из оргстекла и эпоксидной смолы. Давление в фокальном пятне пучка в разных экспериментах составляло 55–95 кбар. Методами теневого лазерного фотографирования в сочетании с электронно-оптической хронографией получены данные о распространении ударной волны в этих образцах. В проделанных опытах измерена скорость распространения фронта ударной волны, которая составила для эпоксидной смолы и оргстекла 3,6 и 3,9 км/с соответственно.

Ключевые слова: ударные волны, электронные пучки, сильнофокусированные ускорители.

Ссылка: Демидов Б. А., Казаков Е. Д., Калинин Ю. Г., Курило А. А., Стрижаков М. Г., Шашков А. Ю. // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 74.

Reference: B. A. Demidov, E. D. Kazakov, Yu. G. Kalinin, A. A. Kurilo, M. G. Strizhakov, and A. Ju. Shashkov, Prikl. Fiz., No. 6, 74 (2018).

Введение

В связи с активным развитием материаловедения и созданием новых конструкционных материалов на основе полимеров и композитов со сложной структурой, вопрос об исследовании прочностных свойств таких материалов оказывается весьма актуальным. Математическое моделирование процессов разрушения для материалов со сложной структурой крайне затруднительно, а существующие модели требуют верификации. Поэтому определенный интерес представляют эксперименты по воздействию мощных потоков энергии на полимерные материалы.

В работе [1] изучалось воздействие мощного импульсного электронного пучка на мишень из оргстекла, т. е. из полиметилметакрилата (ПММА).

Зафиксирована нестандартная картина разрушений ПММА, заключающаяся в наличии прозрачной зоны, расположенной между областью выделения энергии электронного пучка и зоной разрушения. Методом зондирования мишени лазерным излучением с регистрацией одномерного изображения щелевой разверткой во времени измерена скорость ударной волны, отраженной волны и скорость откольной пластины. В дальнейших экспериментах [2, 3] с помощью кадровой развертки изучалась динамика процесса разрушения ПММА.

Представляемая работа в какой-то степени является логическим продолжением работы [1]. Её отличительной особенностью, однако, являются: исследования динамики ударной волны в двух прозрачных полимерах – оргстекло и эпоксидная смола, сравнение их реакции при схожих параметрах воздействия и исследования динамики ударной волны в тех областях образцов, которые не разрушаются при её прохождении, а претерпевают только обратимые изменения оптических свойств материалов, в первую очередь, показателя преломления.

Схема эксперимента и исследуемые материалы

При воздействии мощного импульсного потока энергии (высокоскоростной удар, лазерный импульс, импульсный пучок заряженных частиц) на конденсированное вещество возникает скачок давления, образуется ударная волна, распростра-

Демидов Борис Алексеевич¹, в.н.с., д.ф.-м.н.
Казаков Евгений Давидович^{1,2}, нач. лаб., к.ф.-м.н.
Калинин Юрий Григорьевич¹, нач. отдела, д.ф.-м.н.
Курило Артём Алексеевич^{1,2}, инженер-исследователь.
Стрижаков Михаил Геннадьевич¹, м.н.с.
Шашков Андрей Юрьевич¹, в.н.с., к.ф.-м.н.

¹ НИЦ «Курчатовский институт».

Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1.
E-mail: mister.kurilo@mail.ru, evgenische@gmail.com

² Национальный исследовательский университет «МЭИ».
Россия, 111250, Москва, Красноказарменная улица, 14.

Статья поступила в редакцию 7 августа 2018 г.

© Демидов Б. А., Казаков Е. Д., Калинин Ю. Г., Курило А. А., Стрижаков М. Г., Шашков А. Ю., 2018

няющаяся в веществе. Если толщина материала, подвергнутого импульсному нагружению, имеет конечное значение, то при отражении ударной волны от свободной (тыльной) поверхности мишени формируется волна разрежения, распространяющаяся в глубь вещества, и на границе появляется растягивающее напряжение. При превышении растягивающего напряжения порогового значения σ_0 (откольная прочность материала) часть свободной поверхности откалывается и улетает в виде откольной тарелочки. При изохорическом процессе давление в зоне энерговыделения электронного пучка $P_{ЭВ} = \Gamma\omega$, где Γ – коэффициент Грюнайзена, ω – объемная плотность энергии. При этом давление на фронте возникающей ударной волны $P_{фрУВ} = P_{ЭВ}/2$ [4].

Эксперименты проводились на сильноточном электронном ускорителе «Кальмар» [5, 6]. Ускоритель, формирующий фактически релятивистский электронный пучок (РЭП), работал в следующем режиме: энергия электронов $E = 240$ – 300 кэВ, ток пучка электронов $I = 20$ – 45 кА, длительность электронного пучка на полувысоте 100 нс. Пробег при энергиях электронов от 240 до 300 кэВ составил от $0,52$ до $0,73$ мм [8]. Форма осциллограмм тока и напряжения в целом соответствовала представленной в работе [9]. Диаметр фокального пятна пучка, который определялся с помощью рентгеновской камеры-обскуры с отверстием диаметром $1,5$ мм и уменьшением в $1,25$, в различных экспериментах составлял от 10 до 20 мм.

В качестве мишеней использовались образцы из оргстекла толщиной 28 мм и толщиной 40 мм из эпоксидной смолы. Исследуемая мишень помещалась за анодной пластиной с отверстием, диаметр которого существенно превышает диаметр пучка в рабочем режиме. Для лазерной диагностики использовался импульсный твердотельный лазер с активным элементом из монокристалла ортоалюмината иттрия с неодимом. Излучатель такого лазера представляет собой конструкцию, позволяющую генерировать вторую гармонику в кристалле титанил-фосфата калия, размещенного внутри резонатора. При этом излучение второй гармоники имеет следующие параметры: длина волны 540 нм, длительность гладкого во времени импульса 200 мкс по основанию, энергия импульса до 100 мДж, расходимость 6 мрад. Применение такого устройства позволяет производить зондирование исследуемых нагрузок с регистрацией теневых или шпирен-снимков объектов исследования с помощью электронно-оптических камер.

На рис. 1 изображена схема эксперимента. Луч лазера 1 проходит через систему зеркал и диагностические окна в вакуумную камеру ускорите-

ля. Луч зондирует образец исследуемого полимера (оргстекло или эпоксидная смола) с отполированными параллельными боковыми гранями. Длительность импульса лазера по основанию составляет 200 мкс, что, как минимум, на порядок превосходит длительность исследуемого процесса. Поэтому интенсивность лазерного излучения можно считать одинаковой на всем исследуемом временном промежутке. В результате взаимодействия РЭП с поверхностью мишени по образцу проходит ударная волна, изменяющая его коэффициент преломления. Теневое изображение формируется объективом 3 (фокусное расстояние объектива 120 см, световая апертура 30 мм, увеличение 1^x) на времяанализирующей щели 5 длиной 15 мм, которая расположена параллельно оси пучка. Электронно-оптическая камера СФЭР-6, работающая в хронографическом режиме, используется для регистрации эволюции во времени одномерного теневое изображения, которое переносится на фотокатод камеры объективом 6 в масштабе $1:1$. С экрана ЭОПа изображение фотографируется цифровым зеркальным фотоаппаратом [7]. Временное разрешение системы определялось шириной щели и при развертке 21 мкс составляло 10 нс. Чтобы отделить лазерное излучение от собственного свечения диодной плазмы, которое может проникать в оптический тракт, используется набор стеклянных оптических фильтров 4.

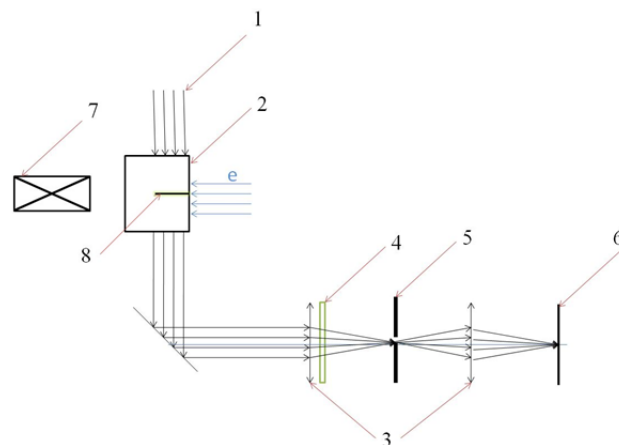


Рис. 1. 1 – луч лазера, 2 – исследуемый прозрачный полимер, 3 – объективы, 4 – светофильтр, 5 – времяанализирующая щель ЭОПа, 6 – фотокатод, 7 – камера-обскура, 8 – область, попадающая на фотокатод.

Ранее в работах [1, 5] было продемонстрировано, что ряд полимерных материалов (например, оргстекло, эпоксидная смола) имеют весьма существенные особенности разрушения при мощном импульсном воздействии. Область вблизи «удара» оказывается неповрежденной, что не совпадает с большинством других прозрачных мате-

риалов (полистирол, стекло, кварц). Поэтому для исследования были выбраны именно оргстекло и эпоксидная смола, причем обычно оптическая система настраивалась так, чтобы в поле зрения попадала передняя сторона мишени и область за ней на глубину 15 мм.

Результаты экспериментов

Разрушения в образце из оргстекла толщиной 28 мм, подвергнутом воздействию РЭП с током 45 кА, представлены на рис. 2. На нем хорошо видна прозрачная область между разрушениями в объеме мишени и плоскостью взаимодействия с электронным пучком, а также зарождающийся характерный откол на тыльной стороне мишени, обусловленный выходом ударной волны на свободную поверхность.

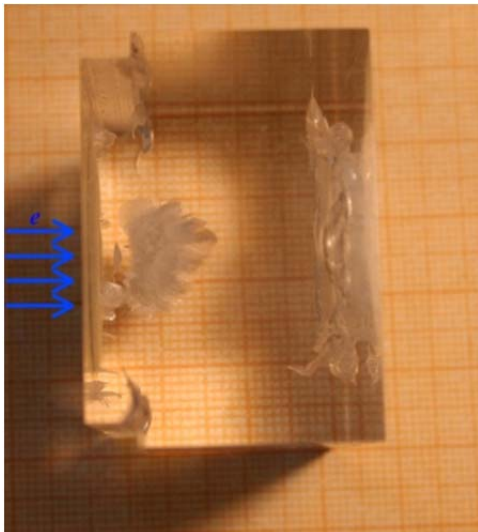


Рис. 2. Внутренние разрушения мишени после воздействия РЭП.

Если электронный пучок не пробил сквозное отверстие и не привел к полному разрушению образца из оргстекла и эпоксидной смолы, то картина разрушения, включая прозрачную зону, была схожей для всех мишеней. В то же время наблюдалась определенная зависимость картины разрушения от параметров падающего пучка. Например, при увеличении тока ускорителя и диаметра пучка толщина прозрачной зоны тоже увеличивается.

На рис. 3 приводится хронограмма, полученная при настройке ЭОПа на переднюю часть мишени из оргстекла толщиной 28 мм, подвергнутой воздействию РЭП с током $I = 24$ кА. Так как длина щели ЭОПа всего 15 мм, а изображение передается в масштабе 1:1, то на снимке не видно тыльной стороны мишени. Справа от снимка приведена схема, на которой

отмечена та область мишени, проходя через которую луч лазера попадает на фотокатод.

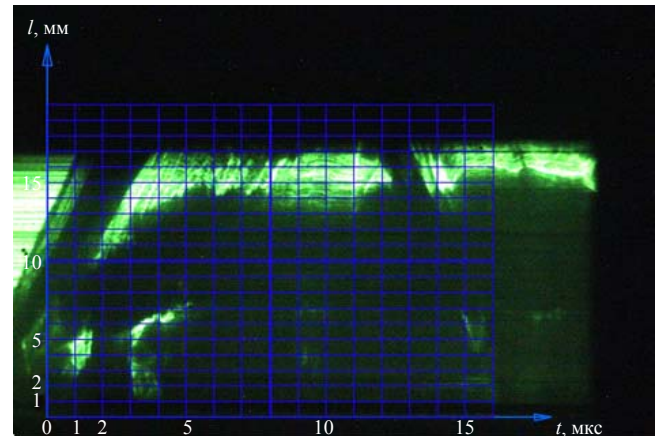


Рис. 3. Снимок распространения ударной волны в оргстекле.

При прохождении ударной волны из-за увеличения давления существенно изменяется коэффициент преломления. В связи с этим лазерное излучение перестает попадать на фотокатод. Если при этом не происходит разрушение материала, то через некоторое время эта область снова становится прозрачной. По наклону границы освещенной области определена скорость распространения ударной волны, представленной на рис. 3, которая составила 3,9 км/с. Используя данные по ударно-волновому сжатию оргстекла [10] и формулу $P = DU\rho$, где D – скорость распространения фронта ударной волны, U – массовая скорость, ρ – плотность образца, было определено давление на фронте ударной волны, которое составило величину $P = 39$ кбар.

Также был проделан опыт с образцом из эпоксидной смолы. ЭОП был настроен аналогично эксперименту, изображенному на рис. 3. Картина распространения ударной волны в эпоксидной смоле на рис. 4 в целом похожа на представленную на рис. 3 для оргстекла.

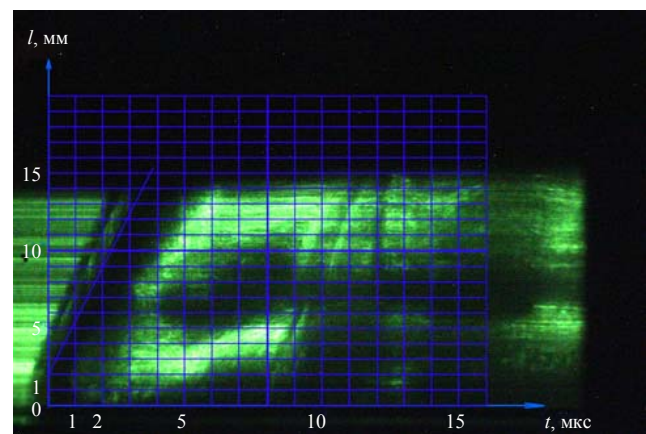


Рис. 4. Снимок распространения ударной волны в эпоксидной смоле.

Хорошо видно, что рядом с зоной энерговыделения (низ изображения) наблюдается прозрачный неповрежденный участок, за которым образуются трещины. Особенность распространения ударной волны в эпоксидной смоле – меньшая оптическая прозрачность образца и четкость изображения. Также стоит отметить, что угол наклона

границы светлой области к горизонтали становится более острым. Это говорит о некотором уменьшении скорости фронта ударной волны в образце. Средняя скорость фронта ударной волны составила 3,6 км/с, давление в фокальном пятне – 56,5 кбар.

Краткие результаты представлены в сводной таблице.

Таблица

Результаты опытов

№	Материал, толщина	Энергия электронов, кэВ	ω , кДж/см ³	$P_{ЭВ}$, кбар (расчет)	D , км/с (эксперимент)	$P_{фрУВ}$, кбар (эксперимент)
1	Оргстекло, 28 мм	300	15,75	94,5	3,9	39
2	Эпоксидная смола, 40 мм	264	10,35	56,5	3,6	30

Обозначения величин, представленных в таблице: ω – объемная плотность энергии, $\omega = \frac{E_b}{Sh_0}$, где h_0 – средний пробег электронов в образце [8]; S – площадь взаимодействия РЭП с мишенью; E_b – энергия пучка, определенная из осциллограмм тока и напряжения; $P_{ЭВ}$ – давление в зоне энерговыделения; $P_{фрУВ}$ – давление на фронте ударной волны. В расчетах использовался коэффициент Грюнайзена $\Gamma = 0,6$, а процесс считался изохорическим, так как время разгрузки $h_0/C_s > \tau_0$, где C_s – скорость звука в полимере, а τ_0 – длительность тока на полувысоте.

Наличие прозрачной области в оргстекле между зоной энерговыделения и областью разрушения можно объяснить следующим образом. По-видимому, при достаточно высоком скачке давления оргстекло переходит в пластичное состояние и образование трещин не происходит. На больших расстояниях давление падает, оргстекло теряет пластичные свойства, и появляются трещины. Это подтверждают результаты эксперимента, из которых следует, что при увеличении энергии электронного пучка и его радиуса область трещин и разрушений удаляется от зоны энерговыделения, и её размеры увеличиваются. При неизменном токе ускорителя и увеличении диаметра пучка плотность тока падает и, соответственно, уменьшается давление в зоне энерговыделения. Однако при большем диаметре пучка уменьшается затухание ударной волны, и поэтому ширина прозрачной зоны в оргстекле слабо меняется. За зоной разрушения давление падает, напряжения сдвига уменьшаются и становятся меньше прочности материала, поэтому оргстекло остается прозрачным.

Заключение

Получены теневые изображения распространения фронта ударной волны в прозрачных полимерах (на примере образцов из оргстекла и эпоксидной смолы), возбуждаемой при воздействии сильнооточного электронного пучка.

Общая картина распространения фронта ударной волны в оргстекле и эпоксидной смоле схожа.

В проделанных опытах измерена скорость распространения фронта ударной волны, которая составила 3,6–3,9 км/с.

Вычислено давление в фокальном пятне пучка ускорителя, которое менялось от опыта к опыту в диапазоне 57–95 кбар.

Предложено объяснение наличия прозрачной области в оргстекле между зоной энерговыделения и областью разрушения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00678 мол. а.

ЛИТЕРАТУРА

- Demidov B. A., Ivkin M. V., Kalinin Ju. G., Shachkov A. Ju. / Proc. of the Eighth International Conference on High-Power Particle Beams. USSR, Novosibirsk. 1990. Vol. 2. P. 709.
- Демидов Б. А., Ефремов В. П., Ивкин М. В., Петров В. А., Мещеряков А. Н. // Поверхность. 2008. № 8. С. 55.
- Демидов Б. А., Ефремов В. П., Петров В. А., Мещеряков А. Н. // Поверхность. 2009. № 9. С. 1.
- Канель Г. И. Ударные волны в твердых телах, курс лекций – Москва. 2017.
- Демидов Б. А., Казаков Е. Д., Курило А. А. // ВАНТ. Серия. Термоядерный синтез. 2017 Т. 40. № 2. С. 73.
- Демидов Б. А., Ивкин М. В., Петров В. А., Фанченко С. Д. // Атомная энергия. 1979. Т. 46. № 2. С. 100.
- Ананьев С. С., Багдасаров Г. А., Казаков Е. Д., Шведов А. А. // ВАНТ. Серия. Термоядерный синтез. 2013. Т. 36. № 4. С. 85.
- <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>.
- Демидов Б. А., Ефремов В. П., Ивкин М. В., Калинин Ю. Г., Петров В. А., Ткаченко С. И., Чукбар К. В. // ЖТФ. 2017. Т. 82. № 3. С. 94.
- Last Shock Hugoniot Data. / Ed. S.P. Marsh. – Berkeley: University of California Press. 1980.

Comparative study of the shock waves propagation in Plexiglas and epoxy resin

*B. A. Demidov, E. D. Kazakov, Yu. G. Kalinin, A. A. Kurilo, M. G. Strizhakov,
and A. Ju. Shashkov*

National Research Center “Kurchatov Institute”
1 Akademika Kurchatova pl., Moscow, 123182, Russia
E-mail: mister.kurilo@mail.ru, evgenische@gmail.com

Received August 7, 2018

Experimental results of the investigation of the dynamics of shock waves induced by the action of a high-current electron beam on samples of Plexiglas and epoxy resin are presented in this article. The pressure in the focal spot of the beam in different experiments was 55–95 kbar. Shadow laser photography methods in combination with electron-optical chronography allowed to obtain the data of the propagation of a shock wave in the samples. In the experiments, the front of the shock wave velocity was measured, which was equal to 3.6 km/s for epoxy resin and 3.9 km/s for Plexiglas.

Keywords: shock waves, electron beam, high-current electron generator.

REFERENCES

1. B. A. Demidov, M. V. Ivkin, Yu. G. Kalinin, and A. Ju. Shashkov, in *Proc. of the Eighth international conference on high-power particle beams*. (1990. USSR, Novosibirsk). Vol. 2. P. 709.
2. B. A. Demidov, V. P. Efremov, M. V. Ivkin, B. A. Petrov, and A. N. Mescheryakov, *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques* **8**, 55 (2008).
3. B. A. Demidov, V. P. Efremov, B. A. Petrov, and A. N. Mescheryakov, *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques* **9**, 1 (2009).
4. G. I. Kanel, *Shock waves in condensed matter* (Lecture course, Moscow, 2017) [in Russian].
5. B. A. Demidov, E. D. Kazakov, and A. A. Kurilo, *Problems of Atomic Science and Technology, Series Thermonuclear Fusion* **40** (2) 73 (2017).
6. B. A. Demidov, M. V. Ivkin, B. A. Petrov, and S. D. Fanchenko *Atomnaya Energiya* **46** (2), 100 (1979).
7. S. S. Anan'ev, G. A. Bagdasarov, E. D. Kazakov, and A. A. Shvedov, *Problems of Atomic Science and Technology, Series Thermonuclear Fusion* **36** (4), 83 (2013).
8. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>.
9. B. A. Demidov, V. P. Efremov, M. V. Ivkin, Yu. G. Kalinin, B. A. Petrov, S. I. Tkachenko, and K. V. Chukbar, *Technical Physics* **82** (3), 94 (2017).
10. *Last Shock Hugoniot Data*. Ed. S.P. Marsh. (Berkeley: University of California Press. 1980).