

УДК 539.4

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТКОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Б.А. Демидов, Е.Д. Казаков, А.А. Курило*

*НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

Представлены результаты экспериментального определения откольной прочности полимерных материалов на примере образцов из оргстекла и полистирола. Исследование проводилось в диапазоне плотности энергии 35—1500 Дж/см<sup>2</sup>. Несмотря на близкие физико-технические параметры исследуемых полимеров (оргстекло, полистирол, эпоксидные смолы), характер их разрушения при импульсном объёмном энерговыделении различен [1, 2]. Показано, что в полистироле трещины возникают непосредственно из зоны энерговыделения, в оргстекле рядом с зоной энерговыделения наблюдается прозрачный неповреждённый участок, за которым образуются трещины. Определена откольная прочность полистирола, которая составила  $\sigma = 0,35$  ГПа и мало отличается от откольной прочности оргстекла, что интересно, так как пространственная локализация зон разрушения образцов из этих двух материалов сильно различается.

**Ключевые слова:** откольная прочность, сильноточные ускорители, электронные пучки, ударные волны, ионизирующее излучение.

## EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE SPALLATION STRENGTH OF POLYMERIC TARGETS

*B.A. Demidov, E.D. Kazakov, A.A. Kurilo*

*NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

The results of experimental evaluation of the spallation strength of polymeric materials that was identified through the examples of the samples made of Plexiglas and polystyrene are introduced in the article. The investigation was made in the range of power density: 35—1500 J/cm<sup>2</sup>. The way of distraction of the investigated materials (Plexiglas and polystyrene) under pulse spatial energy release is different despite of their resembling physico-technical characteristics [1, 2]. It is described in the article that in polystyrene cracks appear directly in the area of energy release but in Plexiglas near the area of energy release you may see an undamaged transparent section and cracks appear behind it. Also spallation strength of polystyrene is defined as  $\sigma = 0.35$  GPa and is practically the same as of Plexiglas that is curious because location of rupture zone of the samples of these two materials is highly different.

**Key words:** spallation strength, high-current generators, electron beam, shock waves, ionizing radiation.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-2-73-77

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования взаимодействия ионизирующего излучения с полимерными материалами, композитными и многослойными структурами на их основе являются актуальными как с точки зрения фундаментальных проблем, так и для решения прикладных задач, связанных с выбором оптимальных сочетаний материалов для защитных экранов в лабораторных и космических плазменных экспериментах. Так, различные полимеры, многослойные структуры и композиты на их основе часто применяются в качестве защитных экранов как в лабораторных плазменных исследованиях, включая решение задач управляемого термоядерного синтеза (УТС), так и в космической технике. Ранее было показано [2, 7], что при импульсном воздействии ионизирующего излучения, характерном для аварийных режимов стационарных плазменных установок или штатных срабатываний импульсных ускорителей и генераторов тока, включая установки для решения задач инерциального УТС, разрушение происходит несколько иначе, чем при непрерывном воздействии. В связи с этим все большее распространение получают различные методы математического моделирования, позволяющие предсказывать поведение материалов при воздействии на них импульсных нагрузок различной величины и природы. Хорошим средством для проверки соответствующих методов моделирования являются эксперименты, в которых изучается реакция материалов, обладающих различными механическими и термодинамическими характеристиками, при воздействии на них сильноточных релятивистских электронных пучков с различными параметрами.

Изучение эффективных свойств полимеров, а также гетерогенных сред со сложными внутренними макроструктурами, широко используемыми, например, в ракетно-космической технике, является в настоящее время актуальной задачей. Проводятся экспериментальные исследования и моделирование как специально создаваемых композитных и малоплотных материалов, так и естественных поликристаллических образцов. Исследования, главным образом, сконцентрированы на определении интегральных оптических, электрических, тепловых, акустических, прочностных характеристик как самих материалов [3, 4], так и изделий из них, а также на соотношении наблюдаемых эффектов с параметрами диодной плазмы, летящей с поверхности исследуемого образца. Отличительной чертой данного проекта будет визуализация распространения возмущений в гетерогенной среде, которая позволит изучать различные режимы радиационного воздействия на мишени и мелкие, но важные пространственные особенности этого процесса в эксперименте, в то время как обычно для получения сведений о пространственных распределениях параметров используют только численное моделирование [5, 6].

При воздействии мощного импульсного потока энергии (высокоскоростной удар, импульс электромагнитного излучения, импульсный пучок заряженных частиц) на конденсированное вещество возникает скачок давления, образуется ударная волна, распространяющаяся в веществе. Если толщина материала, подвергнутого импульсному нагружению, имеет конечную величину, то при отражении ударной волны от свободной (тыльной) поверхности мишени формируется ударная волна разрежения, распространяющаяся в глубь вещества, и появляется растягивающее напряжение. При превышении растягивающего напряжения порогового значения  $\sigma_0$  (откольная прочность материала) часть свободной поверхности откалывается и улетает приблизительно с двойной массовой скоростью в виде откольной тарелочки.

### СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА И ИССЛЕДУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Эксперименты проводились на сильноточном электронном ускорителе «Кальмар» [8]. При проведении исследований параметры электронного пучка изменялись в достаточно широком диапазоне. Ток

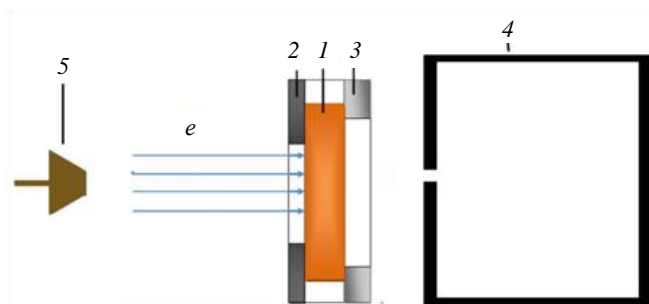


Рис. 1. Схема эксперимента

пучка изменялся в диапазоне 9—27 кА, напряжение на диоде 150—310 кВ. Длительность импульса тока составляла  $\tau_0 \sim 100$  нс. При этом диаметр пучка изменялся незначительно и площадь взаимодействия с мишенью составляла в большинстве экспериментов порядка  $1 \text{ см}^2$ . Следовательно поток энергии на поверхности мишени варьировался в диапазоне 35—1500 Дж/см<sup>2</sup>. Схема эксперимента показана на рис. 1.

Исследуемый образец 1 располагается на анодной пластине 2, в центре которой отверстие диаметром 22 мм. С тыльной стороны мишень прижимается металлической пластиной 3 с отверстием 24 мм. Камера-обскура 4 с отверстием 0,5 мм позволяет получать интегральное во времени рентгеновское изображение области взаимодействия электронного пучка с мишенью и даёт возможность определить распределение плотности энергии, вложенной в образец. Пучок электронов, возникший за счёт взрывной эмиссии с катода 5, ускоряется электрическим полем и попадает на мишень 1.

Идентичные по толщине образцы из оргстекла и полистирола подвергаются облучению равными по величине импульсами потока энергии. Зная откольную прочность оргстекла  $\sigma_0 = 0,25 \text{ ГПа}$  [12], путём сравнения откольного разрушения оргстекла и полистирола можно оценить откольную прочность полистирола. Мишени из оргстекла и полистирола имели одинаковую толщину 6 мм. Для удобства проведения эксперимента образцы из полистирола и оргстекла изготовлялись разной формы. Полистирол в виде квадрата 50×50 мм, оргстекло в виде диска диаметром 50 мм или в виде квадрата со скошенными углами. Микротвёрдость мишеней, измеренная с помощью прибора ПМТ-3, составляла 38 кг/мм<sup>2</sup> для оргстекла и 27 кг/мм<sup>2</sup> для полистирола.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При максимальных плотностях энергии ускорителя «Кальмар» — выше  $1000 \text{ Дж/см}^2$  — в обеих мишенях из оргстекла и полистирола наблюдается мощный откол задней поверхности диаметром 24 мм, со сквозным отверстием диаметром 12—15 мм. Об этом свидетельствуют фотографии на рис. 2.

При уменьшении плотности энергии сквозного отверстия не образуется, наблюдается откол задней поверхности, диаметр которого постепенно падает с уменьшением плотности энергии. Это подтверждают фотографии тыльной поверхности мишени, представленные на рис. 3 и 4.

На рис. 3 можно видеть отколы задней поверхности мишени из полистирола (а) и оргстекла (б) при плотности энергии 620—640  $\text{Дж/см}^2$ . Диаметр откольного разрушения составляет 18—20 мм.

Диаметр откольного разрушения составляет 10—11 мм при плотности энергии 90  $\text{Дж/см}^2$  (см. рис. 4).

Мишени № 11 и № 13 были разрезаны по диаметру, вид этих мишеней в плоскости разреза показан на рис. 5. Электронный пучок падает на правую сторону мишени.

Пороговая плотность энергии, когда откольные явления ещё наблюдаются, наступает в диапазоне 35—40  $\text{Дж/см}^2$ .

На рис. 6 показан график зависимости диаметра откольной поверхности от плотности потока энергии для полистирола и оргстекла.

При максимальной плотности мощности диаметры откольной поверхности у оргстекла и полистирола совпадают и равны 24 мм.

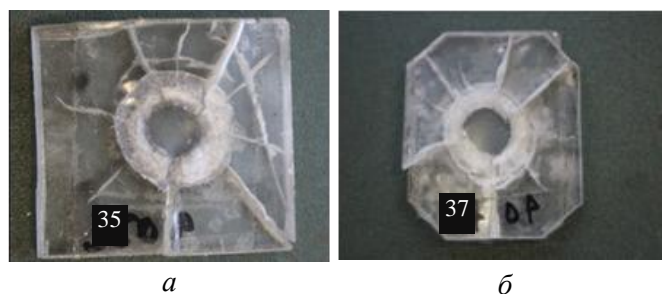


Рис. 2. Мишень из полистирола № 35 (а) и мишень из оргстекла № 37 (б), пробитые насквозь. Вид со стороны откола

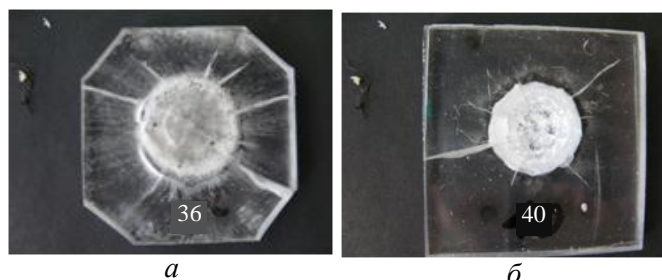


Рис. 3. Мишени № 36 (а) и № 40 (б). Воздействие пучка электронов при одинаковом энергосходе. Вид со стороны откола.  $Q = 620\text{—}640 \text{ Дж/см}^2$

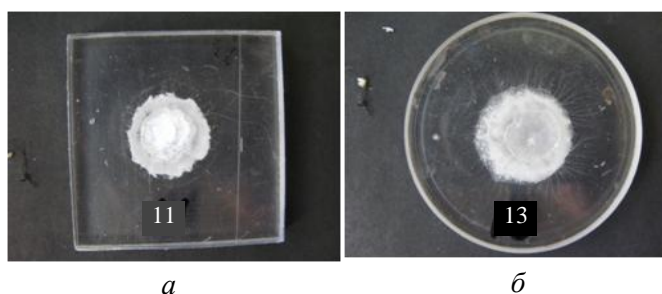


Рис. 4. Вид со стороны откола мишени № 11 — полистирол (а) и № 13 — оргстекло (б) ( $Q = 90 \text{ Дж/см}^2$ )

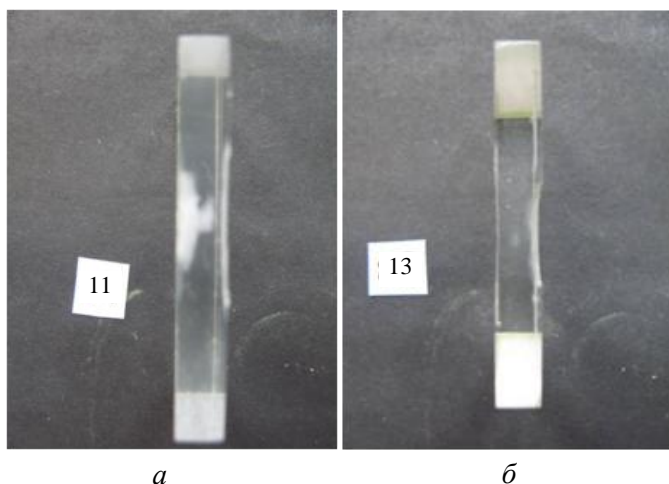


Рис. 5. Вид в разрезе мишени № 11 — полистирол (а) и № 3 — оргстекло (б)

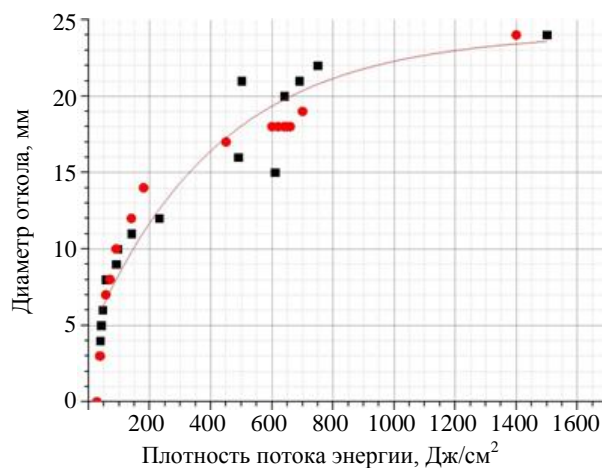


Рис. 6. Зависимость диаметра откола оргстекла (●) и полистирола (■) от плотности потока энергии

Интересно отметить фотографии поперечных сечений мишеней (см. рис. 5), на которых видно, что характер внутреннего разрушения оргстекла и полистирола различен.

График на рис. 6 показывает, что с уменьшением плотности энергии диаметр откольной поверхности сокращается. Это обусловлено двумя причинами:

— несмотря на то, что толщина мишени меньше диаметра электронного пучка, происходит боковая разгрузка по радиусу волны давления;

— профиль энергосвечения электронного пучка является куполообразным, а не прямоугольным. По мере снижения плотности энергии диаметр растягивающих напряжений, превышающих  $\sigma_0$ , падает.

Тем не менее на графике (см. рис. 6) видно, что на воздействие одинаковых потоков энергии мишени из полистирола и оргстекла реагируют очень схожим образом. Диаметры откольных разрушений практически совпадают. Отсюда следует, что откольная прочность полистирола очень близка к откольной плотности оргстекла.

Можно оценить откольную прочность полистирола следующим образом. Порог возникновения откольных явлений  $Q = 35 \text{ Дж/см}^2$  при длительности воздействия электронного пучка  $\tau_0 = 10^{-7} \text{ с}$ , энергии электронов 80 кэВ. При этом пробег электронов составляет  $h_0 = 0,1 \text{ мм}$  [10], площадь фокального пятна  $1 \text{ см}^2$ , скорость звука  $C_s = 2,4 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ . Считая, что давление в фокальном пятне разгружается за время  $\tau^x = h_0/C_s$ , можно грубо оценить давление в фокальном пятне по следующей формуле:

$$P_p = \Gamma \omega \frac{\tau^x}{\tau_0}, \quad (1)$$

где  $\Gamma$  — коэффициент Грюнайзена;  $\omega$  — объёмная плотность энергии. Подставляя в формулу значения  $\Gamma = 0,79$  [9],  $\omega = 3,5 \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3$ , получим, что  $P \sim 1,1 \text{ ГПа}$ . Это максимальное давление в зоне энергосвечения электронного пучка, когда реализуется откол задней поверхности мишени. На тыльной стороне мишени давление будет в 2—3 раза ниже. Поэтому откольная прочность полистирола лежит в диапазоне 0,35—0,4 ГПа.

## ВЫВОДЫ

Подтверждено два типа разрушения исследуемых материалов. В одном случае необратимые явления, трещины возникают непосредственно из зоны энергосвечения (полистирол), в другом случае рядом с зоной энергосвечения наблюдается прозрачный неповреждённый участок, за которым образуются трещины (оргстекло).

Несмотря на близкие физико-технические параметры исследуемых полимеров (оргстекло, полистирол), характер их разрушения при импульсном объёмном энергосвечении различен. Это необходимо учитывать при использовании элементов из оргстекла и полистирола, подвергаемых воздействию мощных потоков энергии.

Путём сравнительных экспериментов с образцами оргстекла и полистирола была определена откольная прочность полистирола, которая составила  $\sigma = 0,35 \text{ ГПа}$ , что согласуется с откольной прочностью оргстекла  $\sigma_{\text{орг}} = 0,25\text{—}0,3 \text{ ГПа}$ , оцененной в работах [11, 12]. Это достаточно неожиданный результат, так как пространственная локализация зон разрушения образцов из этих двух материалов сильно различается.

Данная методика, по которой идентичные по толщине образцы из исследуемого, с одной стороны, и хорошо изученного материала, с другой, подвергаются облучению равными по величине импульсами потока энергии, может быть использована для изучения широкого спектра полимерных материалов и оценки их откольной прочности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-32-20308 мол\_a\_вед.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Demidov B.A., Efremov V.P., Ivkin M.V., Petrov V.A., Mescheryakov A.N. — J. of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2008, № 8, p. 55—60 [in Russian].

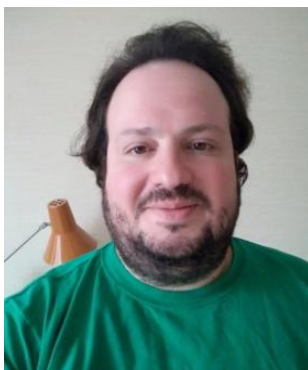
2. **Demidov B.A., Efremov V.P., Petrov V.A., Mescheryakov A.N.** — J. of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2009, № 1, p. 1—6 [in Russian].
3. **Kai Kadau, Timothy C. Germann, Peter S.** — Lomdahl, PRL 98, 135701, 2007.
4. **Ghofraniha N., Gentilini S., Folli V., DelRe E.** — Conti C. PRL, 2012, vol. 109, p. 243902.
5. **Kafesaki M., Economou E.N.** — Phys. Rev. B, 1999, vol. 60, № 17.
6. **Aristegui C., Angel Y.C.** — Phys. Rev. E, 2007, vol. 75, p. 056607.
7. **Физика ядерного взрыва.** В 5 т. Том 2. Действие взрыва. Изд. 3-е, дополнительное (Министерство обороны Российской Федерации. 12 Центральный научно-исследовательский институт). — М.: Издательство физико-математической литературы, 2010. 620 с.
8. **Demidov B.A., Ivkin M.V., Petrov V.A. et al.** — Atomnaja Energija, 1976, vol. 46, № 2, p. 100—104 [in Russian].
9. **Sharma B.K.** — J. Phys. D: Appl. Phys., 1959 (1983), № 16.
10. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>.
11. **Vshivkov O.Y., Rybakov A.P.** — Vestnik PGU. Applied Mathematics and Mechanics, 2011, № 9, p. 62—71 [in Russian].
12. **Dremin A.N., Kanel G.I., Koldunov S.A.** — М.: Nauka, 1972, p. 569—574 [in Russian].



Борис Алексеевич Демидов, в.н.с., д.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Артём Алексеевич Курило, инженер-исследователь; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия  
mister.kurilo@mail.ru



Евгений Давидович Казаков, нач. лаб., к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия

Статья поступила в редакцию 19 января 2017 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 2, с. 73—77.