

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРОЧНОСТИ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ С НАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Н. Н. Пилюгин

Институт механики МГУ им. М. В. Ломоносова, 119192 Москва, pilyugin@yandex.ru

Выполнен анализ результатов экспериментов, проведенных на баллистической установке по соударению металлических сферических ударников с цилиндрическими мишенями из эпоксидной смолы (как с наполнителем в виде микрочастиц Al_2O_3 , так и без него). Скорости соударения ограничивались диапазоном $0.6 \div 1.1$ км/с, так как при больших скоростях происходило полное разрушение мишеней. В диапазоне рассмотренных скоростей соударения зафиксированы каналы почти цилиндрической формы, в конце которых сохранялся застрявший ударник. На основе ранее установленной зависимости глубины канала от энергии удара, от отношения плотностей материалов ударника и мишени, а также от предела прочности материала мишени на растяжение проведена оценка прочности эпоксидной смолы с наполнителем. Установлено, что при массовой доле наполнителя, равной 0.4, прочность мишени увеличивается примерно в 1.5–2 раза.

Ключевые слова: баллистический эксперимент, высокоскоростное соударение, глубина внедрения, эпоксидная смола, наполнитель, предел текучести, влияние температуры и скорости деформации.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования свойств высоконаполненных полимеров при ударно-волновом нагружении представляют значительный интерес в связи с важными техническими приложениями [1–3]. К данному классу веществ относятся, в частности, материалы на основе механических смесей из эпоксидной смолы в качестве связующего и наполнителя в виде пылевидных частиц Al_2O_3 микронных размеров с объемным содержанием наполнителя до 45 %. Этот композит используется как элемент теплозащитных и противударных конструкций; как материал, при термохимическом разрушении которого образуются электрофильные соединения, влияющие на отражение радиоволн в плазменном слое около космического аппарата при входе в атмосферу [4]. Он применяется также в качестве капсул для электровзрывных компонентов [5, 6]; в качестве оболочек токсичных материалов; как герметик для сегнетоэлектрической керамики в приборах [7]. Однако в литературе практически отсутствует информация о прочности этого композитного материала при ударном на-

гружении, без знания которой невозможно численное моделирование процессов разрушения в сложных конструкциях.

1. КРАТКИЙ АНАЛИЗ ПРЕДЫДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для рассматриваемого композита (краткое название ALOX) за последние 30 лет были получены данные по сжимаемости, модулям упругости и релаксационным параметрам, входящим в модель распространения волн напряжения Максвелла, в умеренном диапазоне скоростей соударения при некоторых значениях концентрации наполнителя [5–11].

В указанных работах [5–11] применяли известный метод соударения пластин с разными скоростями для изучения ударных волн в твердом теле [1]. В этом методе пластина-ударник ударяет по другой, покоящейся пластине-мишени, изготовленной из исследуемого материала (в данном случае из эпоксидной смолы с наполнителем). В качестве материалов для пластин-ударников применялись материалы с известными ударными адиабатами (металлы, кварц). В случае, когда ударник сделан из того же материала, что и мишень, задача экспериментального определения ударной адиабаты становится намного проще. Однако, если в качестве материала ударника брать металл или

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке фонда Президента РФ по поддержке ведущих научных школ (НШ-397.2008.1) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-01-00033).

кварц, то можно в исследуемом веществе получить более мощную ударную волну и расширить диапазон исследования по давлению ударной адиабаты.

Наиболее полные данные приведены в работе [8], где исследовались образцы эпоксидной смолы с объемной долей оксида алюминия, равной 0.43, 0.34 и 0.20. Рассмотрим более детально эти опыты, в которых скорости соударения пластин не превышали 0.6 км/с. Регистрация массовой скорости свободной поверхности образцов осуществлялась лазерным интерферометром VISAR [12]. Для того чтобы получить профиль изменения во времени массовой скорости, были проведены эксперименты трех типов с использованием лазерного интерферометра:

1) эксперименты с «широким» импульсом, в которых сжимающая нагрузка и затухающая волна сильно разделены во времени;

2) эксперименты с «узким» импульсом, или «затухающие» эксперименты, в которых волна затухания обгоняет и взаимодействует с волной сжимающей нагрузки;

3) эксперименты с «повторным сжатием», в которых за волной первичной сжимающей нагрузки после определенного интервала времени следует волна, которая сжимает материал дальше. Для сравнения полученных данных привлекались результаты ультразвуковых измерений продольных (c_l) и поперечных (c_t) скоростей звука в образцах ALOX.

Измеренные в [8] профили массовой скорости во времени качественно подобны тем, которые реализуются в вязкоупругих материалах [2]. Отличительной чертой таких сред является существование мгновенной и равновесной ударных адиабат. Вещество при импульсном воздействии сначала попадает в состояние на мгновенной адиабате, а затем релаксирует к равновесному состоянию. В широкоимпульсных экспериментах [8] наблюдалось крутое, но гладкое возрастание скорости частиц на фронте сжимающей волны. Волновой фронт значительно закруглялся по мере приближения к пику скорости. В каждом эксперименте наблюдались постоянные скорости частиц в течение значительного периода времени ($\approx 2 \div 6$ мкс) после того, как был достигнут максимум скорости. Профили узкоимпульсных экспериментов в [8] качественно показывают тот же отклик, однако в этом случае волны сжатия и разгрузки взаимодействуют друг с другом, вызывая затухание сразу после достижения мак-

Таблица 1
Параметры адиабат Гюгонно для ALOX

α_1	D , км/с	ρ , кг/м ³	Источник
0.714	$3.107 + 1.481u$	2370	[8]
0.625	$2.881 + 1.048u$	2130	[8]
0.455	$2.736 + 0.858u$	1750	[8]
0.714	$2.88 + 1.99u$	2373	[6]
0	$2.64 + 1.66u$	1200	[9]
0.714	$3.0 + 1.67u$	2370	[9] ($u < 0.6$ км/с)
0.714	$2.63 + 2.27u$	2370	[9] ($u > 0.6$ км/с)
0	$2.64 + 1.66u$	1194	[10]
0	$2.69 + 1.51u$	1140	[11]
0	$2.58 + 1.47u$	1140	[11]
0.714	$2.93 + 1.63u$	2280	[11]
0.60	$2.63 + 1.66u$	1870	[11]

симула скорости частиц. Из полученных профилей волн в [5–11] можно определить данные для адиабат Гюгонно

$$D = c_b + Su, \quad (1)$$

где D — скорость ударной волны, u — массовая скорость, c_b , S — константы материала. Эти данные, полученные различными авторами, приведены в табл. 1 в зависимости от массовой концентрации наполнителя α_1 . Видно значительное отличие коэффициентов уравнения (1). В работе [8] отмечалось, что величина c_b в (1) близка к измеренным ультразвуковым методом продольным скоростям звука c_l . Однако в работе [6] на примере эпоксидной смолы с наполнителем (0.43 по объему) был отмечен заметный разброс результатов ультразвуковых измерений скоростей звука в разных работах. Так, в одних работах значения продольных скоростей звука находятся в диапазоне $c_l = 3.16 \div 3.23$ км/с, а поперечная скорость равна $c_t = 1.71 \div 1.73$ км/с, в то время как в других работах приведены иные значения: $c_l = 3.26 \div 3.40$ км/с и $c_t = 1.57 \div 1.92$ км/с. Авторы [6] объясняют такой разброс отличием составов материалов (за счет применения разных отвердителей), а также различием в технике ультразвуковых измерений, применяемой разными авторами.

Релаксационные свойства композита в [8] описывались моделью Максвелла, в которой содержались (подбираемые на основе согласования с экспериментами) «мгновенный» модуль упругости F , «равновесный» модуль упругости k и время релаксации τ . Считалось, что модули F и k не зависят от скорости деформации $\dot{\epsilon}$, температуры T и давления p , а параметр τ не зависит от концентрации наполнителя. Для времени релаксации τ в [8] выбран физически ничем не обоснованный закон $\tau = f(\dot{\epsilon})$ с двумя подгоночными (из условия совпадения с расчетами) параметрами $\tau_1 = 0.03$ мкс и $\tau_2 = 0.25$ мкс. Пределы прочности и текучести в работах [5–11] не определялись, так как рассматривалась начальная стадия соударения (до разрушения).

Методика изучения прочностных характеристик при соударении плоских пластин ограничена по скоростям соударения и одномерной геометрией. В этих экспериментах напряжения в зоне контакта соударяющихся пластин не превышают пределов прочности материала. Эксперименты по соударению тел, проводимые на баллистических установках, носят другой, более сложный характер: из-за больших скоростей соударения напряжения, возникающие в зоне контакта, превышают пределы прочности полимерных материалов. Одним из методов изучения прочности конструкций реальной геометрии в широком диапазоне скоростей соударения является экспериментальное моделирование на баллистических стендах проникания ударников в преграды, содержащие слои из исследуемых композиционных материалов.

К настоящему времени накоплен значительный экспериментальный материал, главным образом, по соударению компактных металлических ударников с разными металлическими преградами [13–15] и мишенями из некоторых горных пород [16], а также из льда [17] и замороженной углекислоты [18]. На основе этих данных, например, для металлических мишеней установлено [15], что зависимость глубины внедрения от скорости ударника v_0 состоит из нескольких различных участков. В случае соударения металлических ударников с мишенями из других менее прочных материалов характер зависимости глубины внедрения от скорости v_0 также различен в разных интервалах скоростей. Так, в [19] при больших скоростях соударения ($v_0 = 2 \div 6$ км/с) в мишенях из оргстекла зафиксированы кратеры,

близкие по форме к затупленным конусам, при этом ударники были полностью разрушены. В экспериментах [20] в мишенях из оргстекла при $v_0 = 0.7 \div 2.1$ км/с зафиксированы каналы различной глубины с диаметрами, примерно равными диаметрам ударников. В конце каналов обнаружены металлические ударники, сохранившие свою форму.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проведения экспериментов по соударению компактных тел с мишенями из эпоксидной смолы с наполнителем использовался ускоритель, в котором метаемым газом являлся сжатый водород. Метание производилось сферическими металлическими ударниками массой m_0 и диаметром $d_0 = 4.8 \cdot 10^{-3}$ м. Полет ударников проходил в закрытой цилиндрической трассе, заполненной воздухом при давлении $3 \div 5$ Торр. Мишени представляли собой цилиндры, изготовленные либо из чистой эпоксидной смолы (эксперименты 1–3), либо из эпоксидной смолы с наполнителем в виде микрочастиц Al_2O_3 с массовой концентрацией $\alpha_1 = 0.4$ (эксперименты 4, 5). Условия проведения экспериментов приведены в табл. 2, где указаны скорость ударника v_0 , его масса m_0 и его плотность ρ_p , масса мишени M_t и ее плотность ρ_t . (Везде далее индексом t обозначены параметры мишени, индексом p — ударника.) Мишени изготовлены по технологии, близкой к той, что подробно описана в [6, 8]. Средний размер частиц наполнителя порошка примерно равен 8 мкм. Плотность Al_2O_3 составляла 3969 кг/м³. Плотность образцов мишени определялась двумя способами: гидростатическим методом и по вычислению объема из геометрических размеров образца. Некоторое различие в плотности образцов в экспериментах 1–

Таблица 2
Условия проведения экспериментов

Номер эксперимента	v_0 , м/с	m_0 , 10^{-3} кг	ρ_p , кг/м ³	M_t , кг	ρ_t , кг/м ³
1	673	0.45	7 800	0.172	1 200
2	1 120	0.156	2 700	0.117	1 186
3	1 182	0.45	7 800	0.635	1 200
4	976	0.45	7 800	0.303	1 665
5	962	0.45	7 800	0.299	1 665

3 обусловлено тем, что при их изготовлении применялись разные отвердители. Перед каждым экспериментом мишень устанавливалась в металлическом цилиндре в аэробаллистической трассе на расстоянии более 2.5 м от дульного среза ствола. Скорость ударника измерялась контактным методом: с помощью частотомера определялось время пролета точно заданных расстояний между плоскими рамками с тонкой фольгой. Погрешность измерения скорости таким датчиком составляет менее 1 %. Перед каждым экспериментом измеряли массы ударника и мишени, диаметр ударника и размер мишеней. Удар производился по центру и по нормали к торцевой поверхности мишени. После каждого эксперимента сигналы с датчиков обрабатывали и анализировали, определяли размеры образовавшихся в мишени каналов, а также фотографировали мишени.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты измерений приведены в табл. 3, где для каждого эксперимента указаны безразмерная глубина проникания h/d_0 , кинетическая энергия ударника E_0 , отношение плотностей ударника ρ_p и мишени ρ_t . В [20] представлены фотографии каналов и полостей, образовавшихся в мишенях из оргстекла при ударах сферическими ударниками из стали и карбида вольфрама со скоростями $0.7 \div 2.1$ км/с. Подобные каналы разной длины образовывались также при ударах алюминиевыми сферическими ударниками по мишени из оргстекла и стальными шариками по мишеням из полиэтилена [21]. Аналогичные каналы зафиксированы и в данных опытах. Для примера на рис. 1, 2 представлены фотографии образовавшихся каналов в мишени из эпоксидной смолы (эксперимент 3) и из

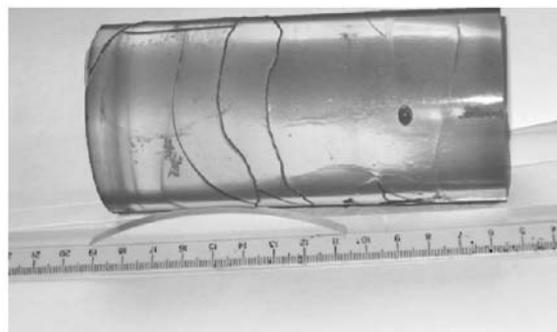


Рис. 1. Фотография мишени из эпоксидной смолы после удара (эксперимент 3)

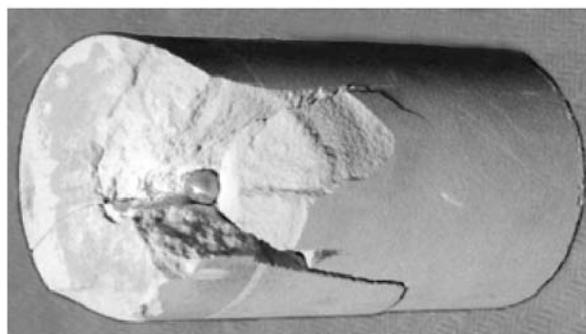


Рис. 2. Фотография мишени из эпоксидной смолы с наполнителем Al_2O_3 после удара (эксперимента 4)

ALOX (эксперимент 4). В последнем случае из-за малой толщины стенок канала часть боковой поверхности откололась. В конце каналов видны металлические ударники, сохранившие форму. Канал в чистой эпоксидной смоле в конце пути ударника схлопывается и практически исчезает (см. рис. 1). На боковой цилиндрической поверхности мишени имеются длинные продольные и поперечные изогнутые трещины, глубина которых меньше 10^{-3} м, а расстояние между ними около $0.01 \div 0.03$ м. Эти трещины являются следствием отражения ударных волн от боковых границ мишени.

В последнем столбце табл. 3 приведены значения предела прочности мишеней σ_t на растяжение, найденные по формуле для глубины канала из [21]. В этой работе с помощью теории подобия и размерностей рассмотрена задача об ударе тела длиной l_0 , диаметром d_0 , плотностью ρ_p , летящего со скоростью v_0 , по полубесконечной мишени с плотностью мате-

Таблица 3
Результаты экспериментов

Номер эксперимента	h/d_0	E_0 , кДж	ρ_p/ρ_t	σ_t , МПа
1	3.75	0.1019	6.5	18.22
2	6.354	0.09784	2.28	20.89
3	7.29	0.3143	6.5	28.91
4	5.21	0.2143	4.68	34.42
5	4.792	0.2082	4.68	36.27

риала ρ_t и пределом прочности на растяжение σ_t . При этом предполагается, что $\sigma_p \gg \sigma_t$. На основе работ [13, 22] предполагалось, что действие ударника на мишень определяется только параметрами E_0 и m_0 , а не его размерами l_0 , d_0 и плотностью в отдельности. В этом случае параметр, определяющий последствия удара, например глубина канала, будет функцией вида

$$h = f(E_0, m_0, \rho_t, \sigma_t).$$

Далее используется стандартная последовательность действий, применяемых при анализе размерностей [23]. В данной задаче можно установить явный вид неизвестной функции, если использовать метод Хантли [24] и ввести различные единицы длины при измерении длин в двух разных направлениях — вдоль оси канала (L_y) и в радиальном направлении (L_x). Таким образом, в этом методе используется класс основных систем единиц измерения $\{L_x, L_y, M, T\}$.

После обезразмеривания, применения π -теоремы [23] и некоторых преобразований в [21] получено соотношение

$$\frac{h}{d_0} = Az, \quad A = \frac{c_1}{2} \sqrt[3]{\frac{\pi}{6}}, \quad z = \left(\frac{\rho_t}{\rho_p}\right)^{2/3} \left(\frac{\rho_p v_0^2}{\sigma_t}\right). \quad (2)$$

Из обработки экспериментов в [21] в соответствии с зависимостью (2) найдено, что $A = 0.0674 \pm 0.0191$. В [21] показано, что полученная зависимость глубины канала от указанных параметров хорошо подтверждается как экспериментами по прониканию сферических ударников из стали, алюминия, карбида вольфрама в мишени из оргстекла и полиэтилена в диапазоне скоростей $0.7 \div 2.1$ км/с, так и экспериментами других авторов для иных пар материалов ударника и мишени, в которых материал ударников превосходил по прочности материал мишени. В [21] значения σ_t для рассматриваемых мишеней взяты из известных справочных данных.

Зависимость (2) позволила определить σ_t для данных опытов (см. табл. 3). Для чистой эпоксидной смолы среднее значение σ_t оказалось равным 22.68 ± 9.36 МПа, а для смолы с наполнителем Al_2O_3 (ALOX) — $\sigma_t = 35.30 \pm 6.45$ МПа при $\alpha_1 = 0.4$. Отсюда следует, что добавление наполнителя в среднем повышает динамический предел прочности эпоксидной смолы в $1.5 \div 2$ раза. Подобное заметное влияние

наполнителя в виде микрочастиц на прочность охлажденного жидким азотом льда отмечено в [17].

Найденные значения σ_t оказались близки к значениям σ_t для эпоксидной смолы [25], получаемым из статических испытаний. Такое уменьшение по сравнению с динамическим значением σ_t связано с рядом факторов, которые обсуждаются в следующем параграфе.

4. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Известно [1], что при динамических и ударных нагружениях для всех полимерных материалов механические и прочностные характеристики зависят от скорости деформации $\dot{\epsilon}$. Следует отметить, что в литературе в качестве основной характеристики прочности материалов при высокоскоростном ударе используется предел упругости Гюгонио и линейно связанный с ним динамический предел текучести σ_T , а также динамическая твердость H_d . Последняя связана с динамическим пределом текучести также пропорциональной зависимостью [1, 3]. В случае идеально пластического тела предел упругости и предел текучести совпадают [1]. Имея в виду указанные соотношения, далее рассмотрим влияние скорости деформации $\dot{\epsilon}$ и температуры на предел текучести.

В Институте механики МГУ были проведены испытания эпоксидной смолы на испытательной машине ZWICK-Z100 при малых скоростях деформации $\dot{\epsilon} = 2.35 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и $\dot{\epsilon} = 0.235 \text{ с}^{-1}$, а также при $\dot{\epsilon} = 800 \text{ с}^{-1}$ с использованием разрезного стержня Гопкинсона [1]. Обработка полученных диаграмм напряжение—сжатие для предела текучести этого материала, представленная в виде зависимости типа Людвига

$$\sigma_T = K_1 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right), \quad (3)$$

дает константы $K_1 = 5.26$ МПа, $\dot{\epsilon}_0 = 1.1 \times 10^{-9} \text{ с}^{-1}$.

Зависимость (3) и константы K_1 , $\dot{\epsilon}_0$ хорошо согласуются с подобной зависимостью из [26], полученной для полиметилметакрилата, а также для поливинилхлорида и полистирена.

Из зависимости (3) следует неограниченный рост σ_T с увеличением $\dot{\epsilon}$, что противоречит физическому смыслу и некоторым опытными данным для металлов [27] и полимеров

[28]. В [27] при исследовании разрушения тонких металлических труб при взрыве ВВ установлено, что их разрушение в радиальном сечении происходит с образованием трещин сдвига и радиального отрыва. При этом увеличение скорости деформации $\dot{\epsilon}$ приводит к уменьшению размера зоны излома с радиальной трещиной отрыва вплоть до ее полного исчезновения и к проявлению чисто сдвигового механизма разрушения. Переход от отрывного к сдвиговому типу излома сопровождается увеличением конечной деформации ϵ_p . Однако при высоких значениях $\dot{\epsilon}$ отмеченная тенденция для металлов меняется кардинально [27]. Так, при $\dot{\epsilon} \approx 10^4 \text{ с}^{-1}$ величина ϵ_p имеет максимум («пик пластичности»), а при дальнейшем росте $\dot{\epsilon}$ конечная деформация ϵ_p уменьшается, достигая при $\dot{\epsilon} = 10^5 \text{ с}^{-1}$ уровня, характерного для статических испытаний.

Согласно работам [1, 29] скорость деформирования играет в металлах заметную роль в области сравнительно низких напряжений — до нескольких гигапаскалей. При $\sigma_1 > 10 \text{ ГПа}$ и $\dot{\epsilon} \geq 10^5 \text{ с}^{-1}$ это влияние становится незначительным и им можно пренебречь. Быстрое уменьшение влияния скорости деформации с повышением амплитуды напряжений σ_1 в [29] связывают с ростом температуры ударно-сжатого материала. По аналогии с жидкостью, где эффекты, обусловленные вязкостью, экспоненциально ослабевают с повышением температуры, подобной сильной зависимости эффектов деформации от температуры можно ожидать и для ударно-сжатых металлов.

Аналогичная немонотонная зависимость ϵ_p от $\dot{\epsilon}$ для полимерного материала ПМ-4 на основе нитроцеллюлозы отмечалась в [28]. Но в этом случае максимум ϵ_p достигался в диапазоне $\dot{\epsilon} = 10^2 \div 10^3 \text{ с}^{-1}$, где наблюдалось резкое возрастание прочности и предела текучести полимера. Это объясняется сменой доминирующих механизмов сопротивления материала механическим нагрузкам и типа разрушения — от вязкого (пластического) при низких значениях $\dot{\epsilon}$ к хрупкому при более высоких скоростях нагружения $\dot{\epsilon}$.

Отмеченный в [28] характер изменения предела текучести полимера обусловлен различием механизмов деформирования при низких и высоких скоростях деформации. При низких скоростях деформирование полимера происходит главным образом за счет относительного скольжения макромолекул аморфной фа-

зы и изменения их конформационного состояния, приводящего к релаксации напряжений. При более высоких скоростях деформации сопротивление материала в большей степени обусловлено жесткостью цепей полимера, связывающих элементы надмолекулярной структуры. Поскольку при малых временах нагружения релаксационные процессы не успевают развиться, жесткость этих связей почти не зависит от скорости нагружения.

Как и для других материалов, для эпоксидной смолы при высокой скорости деформации ($\dot{\epsilon} > 10^4 \text{ с}^{-1}$) и больших приложенных напряжениях рост температуры ударно-сжатого материала оказывает влияние на предел прочности. Повышение температуры снижает предел текучести и тем самым увеличивает глубину проникания. Плавление материала при ударе иллюстрирует рис. 1, из которого видно, что расплавленное вещество заполняет пространство в канале за моделью. Кроме того, повышение температуры при ударе в данных экспериментах подтверждается также расчетами. Зная ударные адиабаты материалов ударника и мишени, а также скорость ударника, можно рассчитать значения максимального давления и других параметров, в том числе повышение температуры в мишени в начальный момент по теории плоского удара [1, 30]. Ударные адиабаты материалов брали в виде линейных соотношений между волновой и массовой скоростями (1). Параметры c_b и S для стали и алюминия взяты из работы [31], для эпоксидной смолы — из [9], а для АЛОХ параметры находили как среднее между расчетом по методу идеального смешения и данными для слоистой среды [31]. Значение удельной теплоемкости эпоксидной смолы заимствовано из [10], а для Al_2O_3 определено на основе закона Дюлонга — Пти. Значения констант материалов, принятых для расчета, представлены в табл. 4. Результаты расчетов параметров за ударной волной для условий экспериментов из табл. 2 приведены в табл. 5. Как следует из расчетов, деформация металлического ударника имеет малую величину, что подтверждают фотографии на рис. 1, 2. Расчеты деформации мишени позволили оценить скорость деформации по формуле [1]

$$\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon t}{\Delta t}, \quad \Delta t = \frac{d_0}{2v_0},$$

где Δt — характерное время нагружения. Для

Таблица 4
Константы материалов для расчета параметров
за ударной волной

Материал	ρ , кг/м ³	c_b , км/с	S	c_v , кал/(г·К)
Сталь	7 800	4.509	1.49	0.12
Алюминий	2 700	5.27	1.429	0.21
Эпоксидная смола	1 200	2.64	1.66	0.25
ALOX ($\alpha_1 = 0.4$)	1 665	2.714	1.572	0.1735
Al ₂ O ₃	3 969	8.14	1.28	0.0588

Таблица 5
Результаты расчетов параметров
за ударной волной

Номер эксперимента	v_0 , км/с	u_t , км/с	D_t , км/с	p_m , ГПа	ϵ_t	ϵ_p	ΔT_t , К
1	0.673	0.600	3.636	2.619	0.165	0.0157	34
2	1.120	0.849	4.050	4.130	0.210	0.0478	88
3	1.182	1.035	4.358	5.414	0.238	0.0311	151
4	0.976	0.826	4.013	5.527	0.206	0.0316	111
5	0.962	0.814	3.995	5.421	0.204	0.0311	107

условий данных экспериментов (см. табл. 2) скорости деформации лежат в диапазоне $\dot{\epsilon} = (4.6 \div 12) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, что значительно превышает скорости деформации при испытаниях на разрезном стержне Гопкинсона и позволяет исследовать ударное нагружение материала. Из табл. 5 видно, что для экспериментов 2, 3 повышение температуры близко к температуре плавления эпоксидной смолы [25]. Такое оплавление наблюдается в канале за моделью на рис. 1. Повышение температуры приводит к изменению механизма разрушения эпоксидной смолы, т. е. к переходу от хрупкого при нормальной температуре к более энергоемкому вязкому разрушению при повышенной температуре. По-видимому, таким повышением температуры и объясняется уменьшение значений σ_t (см. табл. 3). Таким образом, в данных экспериментах зафиксировано снижение предела текучести эпоксидной смолы при ударном нагружении ($\dot{\epsilon} > 10^4 \text{ с}^{-1}$) до статических значений.

Описанные изменения в поведении мате-

риала показывают, что существуют температурно-скоростные условия нагружения, при которых происходит смена доминирующих механизмов сопротивления деформированию и типов разрушения: от вязкого (пластического) при низких скоростях деформирования к хрупкому при высокоскоростном деформировании ($\dot{\epsilon} \approx 10^2 \div 10^3 \text{ с}^{-1}$) и затем к вязкому (за счет повышения температуры) при ударном нагружении ($\dot{\epsilon} > 10^4 \text{ с}^{-1}$), что приводит к снижению предела текучести материала.

Автор выражает искреннюю благодарность П. В. Козлову и С. В. Кочергину-Никитскому за помощь в измерениях, а также А. Н. Ватопедскому за помощь в изготовлении моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глушак Б. Л., Куропатенко В. Ф., Новиков С. А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука, 1992.
2. Гафаров Б. Р., Уткин А. В., Разоренов С. В., Богач А. А., Юшков Е. С. Структура фронта слабой ударной волны в высоконаполненных композитах // ПМТФ. 1999. Т. 40, № 3. С. 161–167.
3. **Высокоскоростное** взаимодействие тел / Фомин В. М., Гулидов А. И., Сапожников Г. А. и др. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
4. **Пилюгин Н. Н.** Исследование скоростей прилипания электронов к оксидам алюминия в смесях воздуха с ксеноном // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 3. С. 65–73.
5. **Chhabildas L. C., Swegle J. W.** On the dynamical response of particulate-loaded materials. 1. Pressure-shear loading of alumina particles in an epoxy matrix // J. Appl. Phys. 1982. V. 53, N 2. P. 954–956.
6. **Setchell R. E., Anderson M. U.** Shock-compression response of an alumina — filled epoxy // J. Appl. Phys. 2005. V. 97 (083518). P. 1–8.
7. **Setchell R. E.** Recent progress in understanding the shock response of ferroelectric ceramics // AIP Conference Proc. 2002. V. 620, N 1. P. 191–196.
8. **Munson D. E., Boade R. R., Schuler K. W.** Stress-wave propagation in Al₂O₃-epoxy mixtures // J. Appl. Phys. 1978. V. 49, N 9. P. 4797–4807.
9. **Munson D. E., Schuler K. W.** Steady wave analysis of wave propagation in laminates and mechanical mixtures // J. Composite Materials. 1971. V. 5. P. 286–304.
10. **Munson D. E., May R. P.** Dynamically determined high-pressure compressibilities of three epoxy resin systems // J. Appl. Phys. 1972. V. 43, N 3. P. 962–971.

11. **Millett J. C. F., Bourne N. K., Deas D.** The equation of state of two alumina-filled epoxy resins // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. V. 38, Issue 6. P. 930–934.
12. **Barker L. M., Hollenbach R. E.** Lazer interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface // *J. Appl. Phys.* 1972. V. 43, N 11. P. 4669–4675.
13. **Витман Ф. Ф., Златин Н. А.** О процессе соударения деформируемых тел и его моделировании. I // *Журн. техн. физики.* 1963. Т. 33, № 8. С. 982–989.
14. **Беляков А. В., Витман Ф. Ф., Златин Н. А.** О процессе соударения деформируемых тел и его моделировании. II // Там же. *физики.* 1963. Т. 33, № 8. С. 990–995.
15. **Свифт Х. Ф.** Механика соударения со сверхвысокими скоростями // «Динамика удара». М.: Мир, 1985. С. 173–198.
16. **Титов В. М., Фадеенко Ю. И., Швецов Г. А.** Удар тела с высокой скоростью по горным породам // *Докл. АН СССР.* 1970. Т. 191, № 2. С. 288–290.
17. **Koschny D., Grun E.** Impacts into ice-silicate mixtures: Crater morphologies, volumes, depth-to-diameter ratios, and yield // *Icarus.* 2001. V. 154. P. 391–401.
18. **Burchell M. J., Brooke-Thomas W.** Hypervelocity impact experiments on solid CO₂ target // *Icarus.* 1988. V. 131. P. 210–222.
19. **Пилюгин Н. Н., Виноградов Ю. А., Ермолаев И. К.** Форма ударного кратера при высокоскоростном ударе // *Астроном. вестн.* 2001. Т. 35, № 6. С. 549–555.
20. **Пилюгин Н. Н., Ермолаев И. К., Виноградов Ю. А., Баулин Н. Н.** Экспериментальные исследования проникания твердых тел в мишень из оргстекла при ударе со скоростями 0.7–2.1 км/с // *Теплофизика высоких температур.* 2002. Т. 40, № 5. С. 732–738.
21. **Пилюгин Н. Н.** Моделирование глубины проникания металлических ударников в мишени из упруго-пластических материалов при скоростях 0.7–2.1 км/с // Сб. трудов Четвертой междунар. школы-семинара «Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем». СПб.: БГТУ, 2005. Т. 2. С. 129–140.
22. **Holsapple K. A., Housen K. R.** Scaling laws for the catastrophic collisions of asteroids // *Mem. S. A. It.* 1986. V. 57, N 1. P. 65–85.
23. **Седов Л. И.** Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1965.
24. **Хантли Г.** Анализ размерностей: Пер. с англ. М.: Мир, 1970.
25. **Физический энциклопедический словарь.** М.: Сов. энцикл., 1965. Т. 4. С. 31–34.
26. **Лор Дж. Дж., Паркер Дж. А.** Анализ влияния ультрафиолетового излучения на предел текучести полиметилметакрилата // *Ракетная техника и космонавтика.* 1965. Т. 3, № 4. С. 114–117.
27. **Грязнов Е. Ф., Бойко М. И., Желудов В. Л.** Дробление тонкостенных стальных оболочек при взрыве // Труды междунар. науч.-практич. конф. «Третьи Окуневские чтения». СПб.: БГТУ, 2003. Т. 3. С. 15–20.
28. **Зезин Ю. П.** Условия вязкохрупкого перехода при разрушении полимерных материалов // *Механика композитных материалов.* 1988. № 5. С. 779–785.
29. **Steinberg D. J., Cochran S. G., Gruinan M. W.** A constitutive model for metals applicable at high-strain rate // *J. Appl. Phys.* 1980. V. 51, N 3. P. 1498–1504.
30. **Мелош Г. Д.** Образование ударных кратеров: геологический процесс. М.: Мир, 1994.
31. **Мак-Куин Р., Марш С., Тейлор Дж., Картер У.** Уравнение состояния твердых тел по результатам исследований ударных волн // *Высокоскоростные ударные явления /* Под ред. Р. Кинслоу. М.: Мир, 1973. С. 299–427.

Поступила в редакцию 14/XI 2007 г.