

УДК 534.2

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ АЛЮМИНИЕВОЙ ПЕНОЙ С ЗАКРЫТОЙ ПОРИСТОСТЬЮ

М. Д. Гоэл¹, Ф. Альтенхофер², В. А. Матсагар³, А. К. Гупта¹, К. Мундт²,
Ш. Марбург²

¹Исследовательский институт перспективных материалов и процессов, 462064 Бхопал, Индия
mdgoel@ampri.res.in

²Мюнхенский университет вооруженных сил Германии, 85577 Нойбиберг, Германия

³Индийский технологический институт, 110016 Дели, Индия

Рассмотрено взаимодействие ударных волн с образцами алюминиевой пены с закрытой пористостью в обычной ударной трубе. Изучалось влияние толщины образца на ослабление и/или усиление ударной волны, а также рассматривалось применение пены в сэндвич-структуре. Результаты представлены в терминах падающего и отраженного ударного давления. Проведено сравнение эффективности образцов без пены и при ее наличии. Показано, что плотность пены, толщина и расположение накладок из алюминия перед и позади пены существенно влияют на давление в отраженной ударной волне. Установлено, что алюминиевая пена с закрытой пористостью, подвергнутая действию ударной волны, может эффективно использоваться в качестве жертвенного слоя при защите конструкций от взрыва.

Ключевые слова: взрывное нагружение, металлическая пена, ударная труба, взаимодействие ударной волны с пеной.

DOI 10.15372/FGV20150314

ВВЕДЕНИЕ

Пены, используемые в различных инженерных приложениях (особенно в области защиты/смягчения от взрыва и удара), показали свою значимость в связи с характерным поведением в напряженно-деформированном состоянии. Две разновидности пен, а именно полимерные и металлические, имеют различные применения. В настоящее время полимерные пены используются для защиты человеческих жизней, что связано с их лучшими массовыми характеристиками. С другой стороны, недавние технические достижения в сфере применения металлических пен доказали их практичность

при защите промышленных сооружений и в смежных сервисных отраслях. Это способствовало проведению дальнейших исследований в области разработки металлических пен, оказавшихся наиболее эффективными при защите промышленных сооружений от действия взрыва.

Как правило, диаграмма напряжение — деформация вспененного материала демонстрирует три режима: (i) линейный участок на начальной упругой стадии, (ii) плато после достижения предела текучести, (iii) область уплотнения за счет компактирования и пластической деформации. Плато имеет решающее значение при поглощении энергии, так как деформация в этой области возрастает монотонно, без значительного увеличения напряжения. В области уплотнения требуются более высокие напряжения для того, чтобы сжать вспененный материал в исходное твердое состояние, из которого получена пена.

Ударные волны генерируются в результате процессов быстрого энерговыделения, таких как взрыв или быстрое движение поршня. Ударные волны вызывают серьезные по-

© Goel M. D.¹, Altenhöfer P.², Matsagar V. A.³, Gupta A. K.¹, Mundt C.², Marburg S.⁴, 2015.

¹CSIR-Advanced Materials and Processes Research Institute (AMPRI), Council of Scientific and Industrial Research (CSIR), 462064 Bhopal, India. ²Institute of Thermodynamics, Department of Aerospace Engineering, University of German Armed Forces Munich, 85577 Neubiberg, Germany. ³Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology (IIT) Delhi, 110016 New Delhi, India. ⁴Institute of Mechanics, Department of Aerospace Engineering, University of German Armed Forces Munich, 85577 Neubiberg, Germany.

вреждения в закрытых помещениях, комнатах, вблизи стен и в траншеях или бункерах, где происходят многочисленные отражения. В целях развития эффективной системы защиты/смягчения действия взрыва важно понять механизм взаимодействия ударных волн с материалами, используемыми для смягчения разрушительного воздействия взрыва, а также понять процесс распространения ударной волны через эти материалы [1]. Многие исследователи отмечали способность пены усиливать давление ударной волны [2]. Впервые это было обнаружено в экспериментах Гельфанда (см. [3]). Он пришел к выводу, что усиление может быть результатом переноса импульса, приобретенного в процессе полного сжатия пены. В [4] при изучении нормального отражения на деформируемых стенках обнаружено усиление давления на них. В [5] показано, что пористые среды могут использоваться для защиты окружающей среды от эффектов, вызванных ударными волнами. В [6] представлены данные о влиянии поверхностей раздела газ — пена и пена — газ на процессы отражения, усиления и затухания ударных волн. В [7] получены данные по отраженному давлению, пропусканию и затуханию воздушных ударных волн в пористых сжимаемых материалах — пенополиуретане и формованных пластиках. В работе [8] экспериментально, аналитически и численно исследовали взаимодействие одномерной ударной волны с резиной и низкопористой пеной, об усилении давления сообщается в терминах динамического коэффициента нагрузки. В [9] экспериментально и численно изучали затухание ударных волн, распространяющихся в пенополиуретановых пенах, приведены данные об импульсе и коэффициенте ослабления в зависимости от числа ячеек пены и ее структуры.

Воздействие ударных волн на конструкции исследовали в экспериментах [10–15]. Конструкции испытывали в ударной трубе либо нагружали ударными волнами, которые генерировались взрывчатыми веществами, расположенными на некотором расстоянии от конструкции. В [16] представлен теоретический анализ мягких материалов, а в [17] — данные экспериментов по их изучению. Сложное усиливающее поведение вспененного материала, который нагружался в упругой области, наблюдали Лагутов и Гвоздева (см. [3]), а Хендерсон (см. [3]) установил различные зоны усиления и ослабления и предложил концепцию зо-

ны, где пена может ослаблять давление в ударной волне, в зависимости от слабых и сильных ударных волн. В работе [18] проведено сравнение двух типов нагружения полимерной пены — взрывом и ударной волной. В [19] изучали влияние свойств сжимаемой металлической пены с открытой пористостью на усиление давления при ударном нагружении. В [20] исследовали сопротивление взрыву композитов слоистого типа, изготовленных из винилэфирового композита, армированного Е-стеклом в качестве лицевого слоя, а внутренним служил пеностирольный слой со ступенчатым изменением свойств. В этих исследованиях применялась ударная труба и был представлен метод расчета падающей и отраженной энергии, а также энергии деформации. В [21] на основе метода конечных элементов предсказан отклик полимерной пены на нагружение в ударной трубе и в полевых условиях, проведено сравнение с экспериментом.

Изучение литературы показало, что в ранних работах внимание уделяли в основном взаимодействию ударных волн с полимерными пенами и механизму ослабления и/или повышения давления при ударном сжатии, в то время как исследований по взаимодействию металлических пен (особенно алюминиевых пен с закрытыми порами) с ударными волнами в ударной трубе было проведено немного. Кроме того, механизм, ответственный за усиление или ослабление избыточного давления взрывной волны, обусловленное наличием пены, все еще требует подтверждения. Это указывает на настоящую необходимость исследования металлических пен и их взаимодействия с ударными волнами в ударной трубе. Цель настоящего исследования — изучить способность низкоплотной металлической пены вызывать затухание или усиление ударной волны. В экспериментах ударная волна воздействовала на образец низкоплотной металлической пены или на образец в виде сэндвич-структуры. Полученные результаты помогают понять эксплуатационные качества и механизмы разрушения металлической пены под действием ударной нагрузки и обеспечивают ориентир для создания лучшего проекта по защите конструкций.

1. МАТЕРИАЛ ПЕНЫ

Алюминиевая пена, используемая в настоящем исследовании, разработана на основе тех-

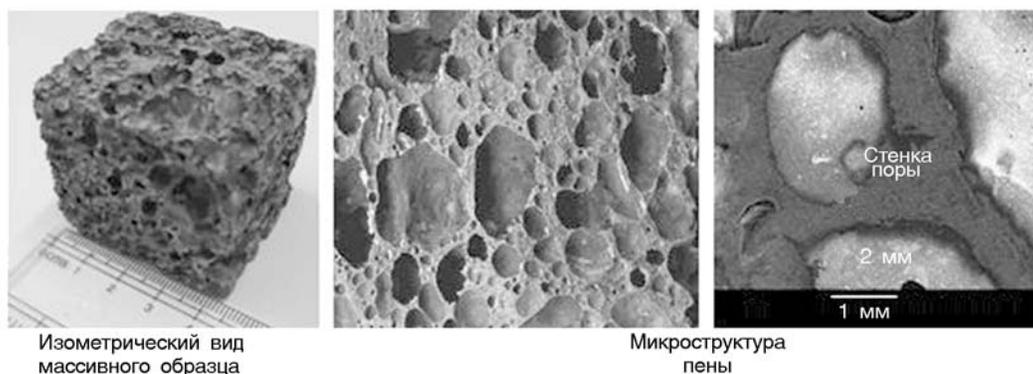


Рис. 1. Типичный образец алюминиевой пены с закрытой пористостью

ники литьевого перемешивания в Исследовательском институте перспективных материалов и процессов (AMPRI) Совета по научным и промышленным исследованиям (CSIR), Бхопал, Индия. Производство пены состояло из ряда последовательных этапов: (i) плавление сплава, (ii) диспергирование частиц гидрида кальция (CaH_2) в расплав, (iii) за счет последнего процесса реализация вспенивания в короткий срок, (iv) быстрое охлаждение в том же тигле, в котором проводилось вспенивание, с помощью нагнетаемого воздуха, (v) извлечение пены из тигля после охлаждения [22–24]. Различной относительной плотности пены достигали путем варьирования температуры вспенивания в диапазоне $675 \div 695 \text{ }^\circ\text{C}$ с интервалом $5 \text{ }^\circ\text{C}$. На рис. 1 показаны массивный образец алюминиевой пены и его микроструктура. Плотность пены определяли взвешиванием каждого образца, делением его массы на объем и осреднением данных, полученных для всех образцов. Использовали образцы пены разной длины и различного состава. Относительная плотность (ОП) пены определялась как отношение плотности вспененного материала к плотности твердого материала, из которого была изготовлена пена. Относительная плотность варьировалась в диапазоне $\text{ОП} = 0.100 \div 0.114$. Следует также отметить, что пена, рассмотренная в данном исследовании, имела закрытую структуру ячеек.

Квазистатические испытания на сжатие разработанной пены проводились методом CSIR-AMPRI с помощью универсальной испытательной машины BiSS (модель Vi-00-002, тензодатчик на 50 кН) при скорости деформирования 0.001 с^{-1} [22–24]. Из пены вырезали образцы среднего размера $40 \times 45 \text{ мм}$ в попе-

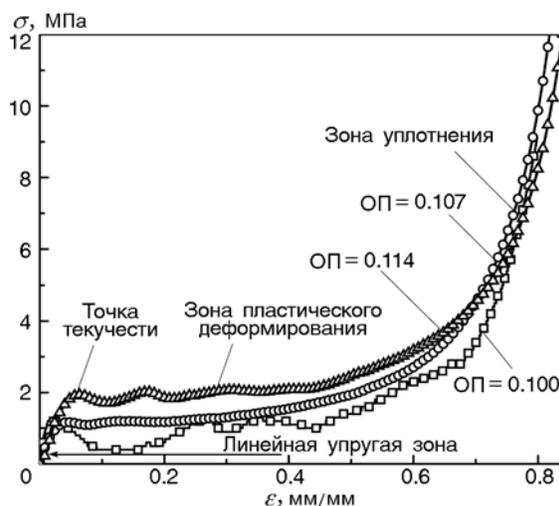


Рис. 2. Квазистатическая диаграмма напряжение — деформация при сжатии алюминиевой пены с закрытой пористостью

речном сечении, высотой 55 мм. Регистрируемые в опытах данные по нагрузке и смещению преобразовывались в кривые напряжение — деформация при помощи стандартной процедуры. Типичная кривая напряжение — деформация при сжатии алюминиевой пены с закрытой пористостью показана на рис. 2. На ней выделяются линейная упругая область, плато в области пластического деформирования, область уплотнения.

2. УДАРНАЯ ТРУБА

Все эксперименты проводили в ударной трубе. Преимущество тестирования в ударной трубе заключается не только в том, что оно дешевле взрывных испытаний в полевых условиях. Ударная труба позволяет проводить боль-

шое количество тестов в течение короткого промежутка времени по сравнению с испытаниями в полевых условиях. Она обеспечивает хорошую повторяемость данных, так как эксперименты в лаборатории проводятся в более контролируемых условиях, чем при полевых испытаниях. В связи со способностью создавать условия одноосного деформирования, генерируемая в ударных трубах волна давления может применяться при испытании материалов.

В настоящем исследовании использовалась двухдиафрагменная ударная труба постоянного круглого сечения Института термодинамики Мюнхенского университета вооруженных сил Германии [25]. Длина камеры высокого давления этой ударной трубы равнялась 1.53 м. Ее входной торец был закрыт стальным листом размером 200 × 200 мм, толщиной 45 мм. Максимальное давление толкающего газа 10 МПа. Образцы устанавливались на шарнирах в полости концевой секции ударной трубы. Камера высокого давления отделена от камеры с рабочим газом двумя мембранами и клапанной секцией. Длина камеры с рабочим газом составляла 8.33 м. Фланцы обеих камер были одинаковыми по конструкции. Труба была изготовлена из высокопрочной стали, ее внутренний диаметр 100 мм, толщина стенки 7.5 мм. Между секцией высокого давления и измерительной секцией располагалась двухдиафрагменная секция длиной 0.03 м. Ранее эта ударная труба использовалась для динамических исследований газа; поэтому ее концевой участок был изменен, с тем чтобы разместить вспененный материал. Для этой цели была разработана оправка, которая удерживала образцы пены при тестировании. Давление в толкающем и рабочем газах варьировалось за счет применения стальных мембран с различными разрывными давлениями.

Сухой воздух закачивался в камеру высокого давления промышленным компрессором средней мощности. Для контроля давления до момента разрыва мембраны во впускной линии камеры был установлен манометр. Во всех опытах в качестве толкающего и рабочего газа применяли воздух. Ударная труба была снабжена двумя пьезоэлектрическими датчиками давления типа Kistler 603В. Сигналы датчиков усиливались электрометрическими усилителями Kistler 5011 и записывались осциллографом LeCroy 9304АМ. Частота дискретизации при

записи давления составляла 100 МГц.

3. ДИНАМИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ НАГРУЗКИ

В работе [8] дано следующее определение динамического коэффициента нагрузки:

$$\text{ДКН} = \Delta P_{5\text{layer}} / \Delta P_5,$$

где ΔP_5 — отраженное от жесткой стенки давление, которое записано датчиком, размещенным на торце трубы, $\Delta P_{5\text{layer}}$ — максимальное давление, записанное датчиком, также расположенным на торце трубы, но под слоем исследуемого материала. В данной схеме ударной трубы датчики размещали перед образцом пены: датчик 2 вблизи передней поверхности образца пены, датчик 1 на расстоянии 5 см от датчика 2. Полученное значение ДКН использовалось для оценки влияния металлической пены.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Измеренное давление в падающей ударной волне было порядка 0.35 МПа при начальной скорости ударных волн 760 м/с. Начальное давление в экспериментах воздух/воздух в секции высокого давления и в секции с рабочим газом составляло 97 бар и 900 мбар соответственно.

В таблице приведены условия испытаний. Диаметр используемых в данном исследовании образцов пены составлял $d = 85$ мм, а толщина варьировалась: $L = 50, 45$ и 40 мм. В работе исследовались также сэндвич-образцы общей толщиной 50 мм (рис. 3). Образцы соприкасались с торцевой стенкой секции ударной трубы и удерживались в таком положении специально сконструированным держателем.

Параметры образцов пены и сэндвич-структур

Образец	d , мм	L , мм	ОП
Пена	85	50	0.114, 0.107, 0.100
		45	0.114
		40	0.114
Сэндвич-структура*	85	50	0.114, 0.100

* 40 мм пены + 5 мм алюминиевых накладок с каждой стороны.



Рис. 3. Типичные образцы пены для испытаний в ударной трубе

4.1. Калибровка ударно-волновых испытаний

Был проведен контрольный тест без пены с алюминиевой жесткой стенкой на торце, для того чтобы наблюдать временные профили давления в падающей и отраженной волнах при теоретическом значении числа Маха 2.39 (рис. 4). Однако следует отметить, что измеренное число Маха было ниже, чем его теоретическое значение. Это обстоятельство приписывают существованию сопутствующих потерь при распространении ударной волны в длинной ударной трубе. Тем не менее эти профили показывают, что в случае идеально жесткой поверхности после отражения ударной волны от жесткого торца вибрация не наблюдается. Отношение отраженного давления к давлению в падающей волне составляет примерно 2.0, что характерно для металла, нагруженного в линейном диапазоне кривой напряжение —

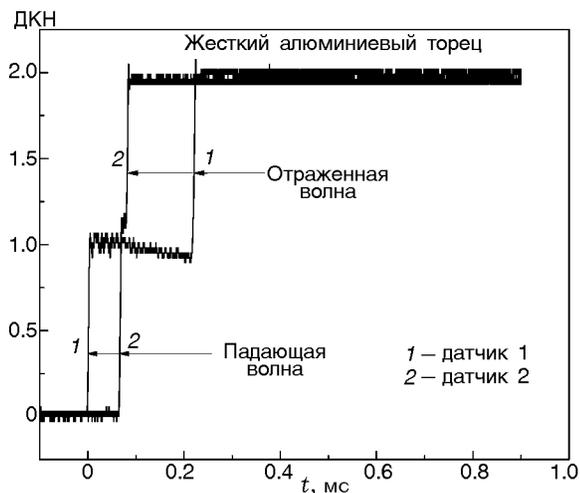


Рис. 4. Приведенные профили падающей и отраженной ударных волн в ударной трубе с жестким алюминиевым торцом

деформация [8, 26].

4.2. Ударные испытания образцов пены

На рис. 5 показаны ДКН образцов пены толщиной 50 мм, ОП = 0.100, 0.107, 0.114, размещенных в торцевой секции и подвергнутых

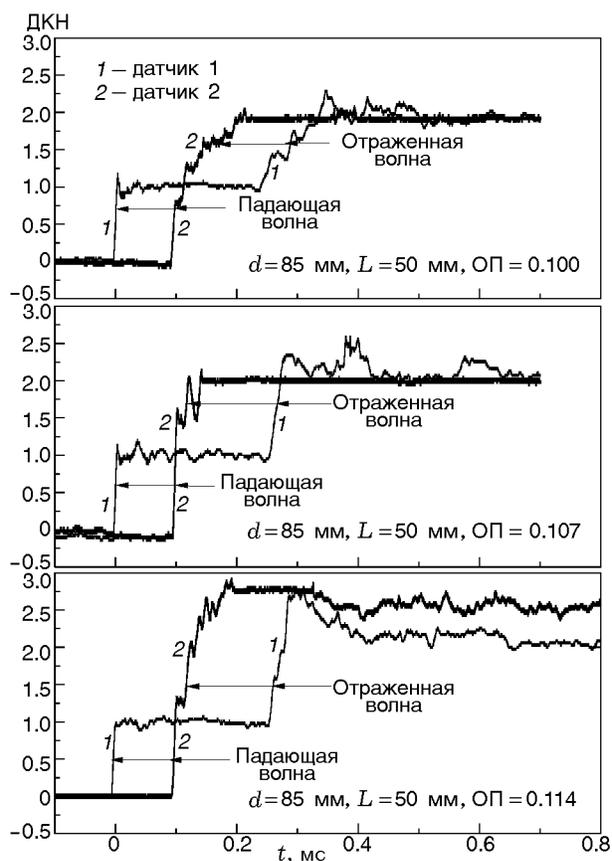


Рис. 5. Приведенные профили падающей и отраженной ударных волн в образцах алюминиевой пены толщиной 50 мм и различной относительной плотности

такому же уровню нагрузки по значениям числа Маха, как и в испытаниях базовых образцов. При взаимодействии падающей ударной волны с передней поверхностью вспененного материала возникала отраженная волна сжатия, которая распространялась в направлении, противоположном направлению падающей волны, и вызывала сжатие пены. Вибрирующий характер изменения во времени давления отражает тот факт, что в данный момент времени пена перемещалась в обратном направлении. Кроме того, на профилях наблюдается крутой подъем давления, связанный с ударной волной, который после достижения пикового значения переходит в режим затухающих вибраций из-за наличия вспененного материала. Кроме того, можно заметить, что присутствие пены приводит к повышению отраженного давления по сравнению с давлением в падающей волне: ДКН достигало значения 2.92. Это связано с тем, что давление в падающей волне находилось в упругой области пены, что вызвало повышение отраженного давления. Подобное поведение наблюдалось также в работе [18] для полимерных пен в случае, когда давление оставалось в пределах упругой области. В этом случае расчетное значение ДКН составляло 2.92, что указывало на рост давления до более высокого уровня по сравнению с экспериментом при наличии только жесткой стенки. Осмотр образца пены после испытания показал частичное ее сжатие. Это означает, что приложенное давление не может полностью сжать вспененный материал, что привело к повышению давления отражения, так как уровень давления лежал в упругой области напряжений вспененного материала. Образцы пены различной плотности вели себя примерно одинаково. Тем не менее следует отметить, что плотность пены сильно влияет на давление отражения. В экспериментах с образцами с ОП = 0.114 наблюдалось ДКН = 2.92, в то время как при понижении относительной плотности пены до 0.100 значение ДКН составляло 2.5 при неизменности всех других экспериментальных условий.

4.3. Ударные испытания сэндвич-образцов

На рис. 6 показаны ДКН образцов в виде сэндвич-структуры при плотности пены 0.100 и 0.114. Образцы подвергали такому же нагружению, как и в предыдущем случае. Из рисунка видно, что изменение плотности привело к

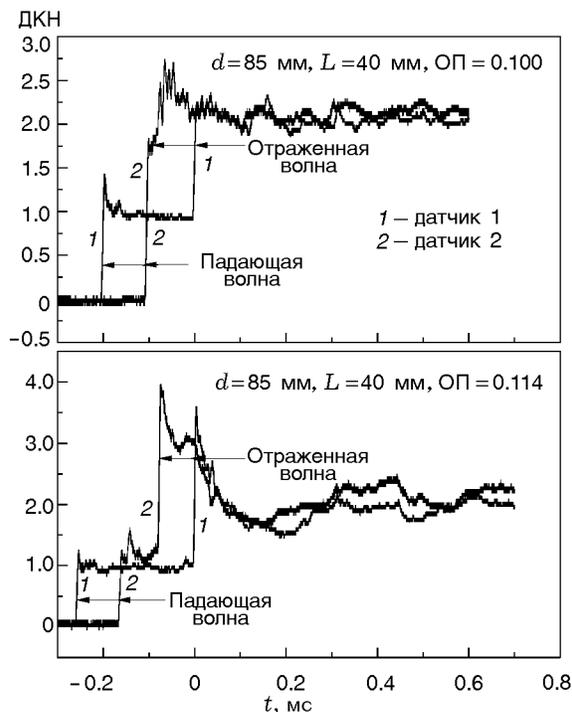


Рис. 6. Приведенные профили падающей и отраженной ударных волн в сэндвич-образцах с прослойкой пены различной относительной плотности

повышению давления примерно до 3.4, но в конечном итоге это вызвало и более быстрое затухание вибраций, что вернуло давление почти к первоначальному в падающей волне. После испытания проверка сэндвич-образца показала, что степень сжатия пены в нем была выше, чем в образце пены без алюминиевых накладок. Это связано с большим импульсом, переданным образцу пены, вследствие различия плотностей внешних и внутренних слоев многослойной структуры. Похожий эффект наблюдался и при другой плотности пены в сэндвич-образце. Следует отметить, что при использовании металлической пены во взрывных приложениях важно разработать конструкцию только для той области нагрузки, которая находится в зоне плато напряжений вспененного материала, поскольку поведение пены при разных уровнях взрывной нагрузки в целом различается.

Следует также отметить, что профили давления (представленные в терминах ДКН) падающей ударной волны, записанные датчиком 1, различаются на рис. 5 и 6. Это можно объяснить чувствительностью датчиков давле-

ния к вибрации ударной трубы во время испытания. Чтобы подтвердить этот факт, в настоящей работе проведено несколько опытов, в которых наблюдалось аналогичное явление. Кроме того, образцы пены во всех экспериментах опирались на шарниры. Образцы сжимались в падающей ударной волне, и в то же самое время они разрыхлялись по периметру, что приводило к колебаниям в результате многократных отражений внутри и вблизи пены. Такое поведение образцов пены отражается в записях волновых профилей. Кроме того, следует отметить, что профили давления, записанные ближайшим к образцу датчиком, значительно отличаются от профилей, записанных дистальным датчиком, что связывают с перегрузкой по чувствительности.

4.4. Ударные испытания образцов пены переменной толщины

На рис. 7 показаны профили давления (представленные в терминах ДКН) в образцах пены толщиной 40 и 45 мм с ОП = 0.114. Профили демонстрируют сильное влияние толщи-

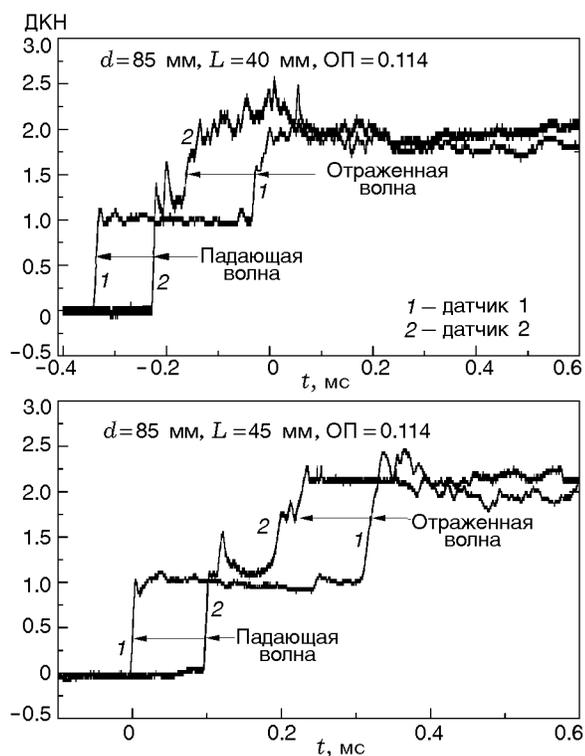


Рис. 7. Приведенные профили падающей и отраженной ударных волн в образцах пены разной толщины

ны образца на ДКН.

В данной работе использовалась пена трех плотностей. В высокоплотной пене падающая ударная волна имеет меньшую проникающую способность и подвижность газа внутри пены меньше. Однако в настоящем исследовании поры пены (закрытые поры) сминались до состояния в зоне уплотнения. Это приводило к режиму затухающей и уменьшающейся по амплитуде отраженной ударной волны, что наблюдалось в сэндвич-структуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследовалось взаимодействие с ударной волной образцов алюминиевой пены с закрытыми порами. Образцы различались плотностью и длиной. Результаты исследования в ударной трубе показали, что плотность пены, толщина и расположение накладок перед и позади пены оказывают значительное влияние на профили давления в отраженных волнах. Можно сделать вывод, что при использовании металлической пены во взрывных приложениях важно разместить и спроектировать конструкцию только для того диапазона нагрузок, в котором взрывная нагрузка находится вблизи плато напряжений вспененного материала, потому что поведение пены при различных уровнях взрывной нагрузки в целом отличается. Использование образцов пены в сэндвич-структурах повышало скорость убывания вибрации по сравнению с образцами, приготовленными из одной пены, что указывает на эффективность составных образцов. Обнаружено, что динамический коэффициент нагрузки увеличивается с 2.0 для абсолютно жесткого материала до 2.92 для пены относительной плотностью 0.114 и до 3.4 для сэндвич-структуры. В случае сэндвич-структуры наблюдается очень быстрый спад давления, что является положительным фактором при разработке системы защиты от взрыва в виде жертвенного слоя.

Ведущий автор (М. Д. Гоэл) выражает благодарность проф. К. Хорнунгу и В. Халманседеру (Отделение аэрокосмической техники Мюнхенского университета Бундесвера, Мюнхенский университет вооруженных сил Германии), за помощь и поддержку в завершении изложенных экспериментальных исследований, а также Германскую службу академических обменов (Deutscher Akademischer Austausch Dienst) за докторскую стипендию,

полученную для завершения изложенных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Phan K. C., Stollery J. L.** On the effects of shock wave reflection in a confined space // Proc. 15th Intern. Symp. Shock Waves Shock Tubes, Berkeley, California, USA, 1985, July 28–August 2. — P. 139–145.
2. **Skews B. W., Levy A., Levi-Hevroni D.** Shock wave propagation in porous media // Handbook on Shock Waves / G. Ben-Dor, O. Igra, T. Elperin (Eds). — Boston, MA: Acad. Press, 2000.
3. **Handbook on Shock Waves** / G. Ben-Dor, O. Igra, T. Elperin (Eds). — Boston, MA: Acad. Press, 2001.
4. **Monti R.** Normal reflection on deformable walls // Meccanica. — 1970. — V. 5, N 4. — P. 285–296.
5. **Borisov A. A., Gel'fand B. E., Kudinov V. M., Palamarchuk B. I., Stepanov V. V., Timofeev E. I., Khomik S. V.** Shock waves in water foams // Acta Astronaut. — 1978. — V. 5, N 11–12. — P. 1027–1033.
6. **Гельфанд Б. Е., Губанов А. В., Тимофеев Е. И.** Особенности распространения ударных волн в пенах // Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 17, № 4. — С. 129–136.
7. **Гвоздева Л. Г., Фаресов Ю. М., Фокеев В. П.** Взаимодействие воздушных ударных волн с пористыми сжимаемыми материалами // ПМТФ. — 1985. — Т. 26, № 3. — С. 111–115.
8. **Yasuhara M., Kitagawa K., Sakashita S., Tsuzaki Y., Watanabe S.** One-dimensional shock wave interaction with rubber and low-porosity foam // Shock Waves. — 1995. — V. 5, N 1–2. — P. 25–32.
9. **Kitagawa K., Yasuhara M., Takayama K.** Attenuation of shock waves propagating in polyurethane foams // Shock Waves. — 2006. — V. 15, N 6. — P. 437–445.
10. **Idczak W., Rymarz Cz., Sychala A.** Large deflection of a rigid visco-plastic impulsively loaded circular plate // J. Tech. Phys. — 1980. — V. 21. — P. 473–487.
11. **Idczak W., Rymarz Cz., Sychala A.** Studies on shock wave loaded clamped circular plates // J. Tech. Phys. — 1981. — V. 22. — P. 175–184.
12. **Renard J., Penetier O.** Nonlinear dynamic response of plates submitted to an explosion-numerical and experimental study // Structural Dynamics: Proc. 3th Eur. Conf. on Structural Dynamics: EURO DYN'96. — Rotterdam, Netherlands, 1996. — P. 689–694.
13. **Tekalur S. A., Shukla A., Shivakumar K.** Blast resistance of polyurea based layered composite materials // Compos. Struct. — 2008. — V. 84, N 3. — P. 271–281.
14. **Tekalur S. A., Shivakumar K., Shukla A.** Mechanical behavior and damage evolution in e-glass vinyl ester and carbon composites subjected to static and blast loads // Comp. B: Eng. — 2008. — V. 39, N 1. — P. 57–65.
15. **Tekalur S. A., Bogdanovich A. E., Shukla A.** Shock loading response of sandwich panels with 3-d woven e-glass composite skins and stitched foam core // Compos. Sci. Technol. — 2009. — V. 69, N 6. — P. 736–753.
16. **Baer M. R.** A numerical study of shock wave reflections on low density foam // Shock Waves. — 1992. — V. 2, N 2. — P. 121–124.
17. **Skews B. W.** The reflected pressure field in the interaction of weak shock waves with a compressible foam // Shock Waves. — 1991. — V. 1, N 3. — P. 205–211.
18. **Ouellet S., Frost D., Bouamoul A.** Using a shock tube to predict the response of polymeric foam to a blast loading // J. Phys. IV. France. — 2006. — T. 134. — P. 783–787.
19. **Seitz M. W., Skews B. W.** Effect of compressible foam properties on pressure amplification during shock wave impact // Shock Waves. — 2006. — V. 15, N 3–4. — P. 177–197.
20. **Wang E., Gardner N., Shukla A.** The blast resistance of sandwich composites with stepwise graded cores // Intern. J. Solids Struct. — 2009. — V. 46, N 18–19. — P. 3492–3502.
21. **Bouamoul A.** Using finite element methods to predict the response of polymeric foams to both shock tube and free-field loadings // 25th Intern. Symp. on Ballistics, Beijing, China, 2010, May 17–21.
22. **Mondal D. P., Goel M. D., Das S.** Effect of strain rate and relative density on compressive deformation behavior of closed cell aluminum-fly ash composite foam // Mater. Des. — 2009. — V. 30. — P. 1268–1274.
23. **Mondal D. P., Goel M. D., Das S.** Compressive deformation and energy absorption characteristics of closed cell aluminum-fly ash particle composite foam // Mater. Sci. Eng. — 2009. — V. 507, N 1–2. — P. 102–109.
24. **Mondal D. P., Das S.** Effect of thickening agent and foaming agent on the micro-architecture and deformation response of closed cell aluminum foam // Mater. Werk. — 2010. — V. 41, N 5. — P. 276–282.
25. **Altenhöfer P., Mundt C.** Comparison of 1D-simulations with measurements on a double-diaphragm shock tube // 8th Eur. Fluid Mech. Conf., Bad Reichenhall, Germany, 2010, September 13–16.
26. **Smith P. D., Hetherington J. G.** Blast and Ballistic Loading of Structures. — Butterworth-Heinemann Ltd, UK, 1994.

Поступила в редакцию 1/XI 2013 г.,
в окончательном варианте — 14/VII 2014 г.