

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В КОМБИНИРОВАННЫХ КЕРАМИКО-ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ

**Ю.Г. БЕЗЫМЯННЫЙ, А.Н. ВЫСОЦКИЙ, К.А. КОМАРОВ,
А.В. МАЗНАЯ, О.В. ТАТЬКО**

Институт проблем материаловедения им. И.Н.Францевича НАН Украины

Исследованы закономерности формирования различных акустических полей в керамико-полимерных материалах, включающих в себя слой керамики с подпорами из комбинаций различных полимерных композиций. Проведены оценки характеристик упругости и неупругости этих материалов. Показано, что адаптация акустических методов к особенностям образцов материалов и исследуемой задачи, а также использование соответствующих методик измерений позволяют синтезировать маломощное акустическое поле, отображающее процессы, происходящие в силовом поле при воздействии высокоэнергетического ударника на комбинированный керамико-полимерный материал, и выбрать параметры упругой волны, позволяющие прогнозировать бронестойкость и живучесть этого материала.

ВВЕДЕНИЕ

Перспективным направлением баллистической защиты от высокоэнергетических средств поражения является создание структуры в виде комбинированного многослойного материала, состоящего из броневой керамики и подложки из полимерных композитов [1,2]. Для эффективного противостояния воздействию высокоэнергетическим динамическим нагрузкам керамический слой должен обеспечивать бронестойкость [3], а подложка – живучесть преграды [1]. При этом на ударную стойкость защитной преграды в значительной степени влияют состав, структура, размеры и форма составляющих комбинированных материалов, последовательность слоев, адгезионные свойства на их границах и другие факторы [4]. Синтезирование таких комбинированных материалов дает возможность регулировать защитные свойства преграды за счёт комбинации слоёв материалов с разными физико-механическими характеристиками.

Бронестойкость керамики определяют её низкая плотность, высокие модуль упругости, твёрдость и скорость распространения продольной упругой волны, заданный уровень прочности и трещиностойкости [3]. Известные [3] эмпирические критерии бронестойкости керамики учитывают только часть указанных свойств материала, а рекомендации выбора оптимальной керамики по этим критериям не совпадают. Для обеспечения живучести подложка должна иметь достаточную прочность и высокий уровень диссипации энергии [5].

Единственным методом объективной оценки бронестойкости и живучести защитных преград являются баллистические испытания [1], однако их использование достаточно дорого и приводит к разрушению испытываемых образцов. Поэтому при разработке бронезащитных материалов актуальным остаётся поиск новых методов оценки бронестойкости и живучести преграды, особенно без её разрушения.

Предпосылки использования акустических методов для решения этой задачи: процесс разрушения керамики имеет волновой характер, связанный с двойным временем распространения упругой волны в толщине материала [6]; для оценки бронестойкости керамики используют скорость распространения продольной упругой волны и волновое

сопротивление материала, а также физически связанные со скоростью плотность и характеристики упругости [7]; диссипативные свойства материала, определяющие его живучесть, физически связаны с потерей в нём энергии упругой волны [7].

Для расширения имеющихся [8] возможностей и повышения эффективности, по сравнению с традиционно [9] используемыми, акустических методов при прогнозировании бронезащитных свойств многослойных конструкций необходима адаптация этих методов к особенностям объекта исследования и поставленной задаче [10]. Первым шагом в этом направлении является изучение особенностей формирования акустических полей в исследуемом материале.

Целью работы является изучение закономерностей формирования акустических полей разного характера в комбинированных многослойных керамико-полимерных материалах, предназначенных для защиты от высокоэнергетических средств поражения, и их слоях.

Изучение проводили по следующей методологии [10]: анализ объектов исследования; постановка и проведение измерительного эксперимента; анализ полученных результатов.

1. АНАЛИЗ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии рекомендациям [11] базовым для исследования выбран образец (табл.1, $i=1$) комбинированного трёхслойного керамико-полимерного материала, состоящий из наружного слоя ($j=1$) керамики на основе карбида кремния и двойного подпора из полимерных композитов на основе стеклоткани TG-660 (со стороны керамики слой ($j=2$) с эпоксидной матрицей и последующий слой ($j=3$) – с полиуретановой). Для сравнения взяты образцы ($i=2, 3$) комбинированных двухслойных керамико-полимерных материалов, состоящих из слоя той же керамики с одинарным подпором из слоя тех же полимерных композитов, а так же образец ($i=4$) комбинированного трёхслойного керамико-полимерного материала, в котором между слоями керамики и полимерного композита с эпоксидной матрицей расположен слой ($j=4$) сотовой конструкции ПСП-1-3,5-35. Так же были исследованы образцы, состоящие из двойного подпора ($i=5$) и отдельных слоёв ($i=6, 7, 8, 9$) указанных материалов, Поперечные размеры образца на порядок и более превосходят толщины слоёв. Все образцы были изготовлены в ИПМ НАН Украины им. И.Н.Францевича. Фотография образца ($i=4$) представлена на рис.1.

Таким образом, образцы для исследований представляют собой слоистые конструкции ($i=1-5$) или слои этих конструкций ($i=6-9$). Все они обладают иерархической многоуровневой структурой [10]. Их свойства формируются, преимущественно, на мезоуровне. Для образцов ($i=1-5$) элементами мезоуровня являются слои ($j=1-4$), для 6 – порошинки, 7 и 8 – слои стеклоткани и наполнитель, 9 – соты. В исследованиях использована обобщённая модель этих образцов на макроуровне, в которой предполагается, что материал однородный, а его макроскопические (эффективные [10]) свойства такие же, как у реального материала. Такая модель позволяет изучать бронезащитные свойства образца в целом. Тогда бронестойкость будет связана с эффективной жёсткостью материала в заданном направлении, а живучесть – с эффективными диссипативными свойствами [16]. Эффективную плотность материала можно определить по формуле $\rho_{\text{э}}=m_i/v_i$, где m_i – масса, v_i – объём образца. Для учёта влияния мезоуровня в образцах принята модель трансверсальной изотропии [12] свойств упругости.

Таблица 1.

Образец			Слой		
№, i	Толщина, h_i , мм	К-во слоёв	№, j	Материал	Толщина, h_j , мм
1	18.9	3	1	Керамика	8
			2	Стеклопластик на эпоксидной матрице	5,5
			3	Стеклопластик на полиуретановой матрице	5,4
2	21.3	2	1	Керамика	8,0
			2	Стеклопластик на эпоксидной матрице	13,3
3	18.8	2	1	Керамика	8,0
			3	Стеклопластик на полиуретановой матрице	10,8
4	36.3	3	1	Керамика	8,0
			4	Сотовая конструкция	15,0
			2	Стеклопластик на эпоксидной матрице	13,3
5	10.9	2	2	Стеклопластик на эпоксидной матрице	5,5
			3	Стеклопластик на полиуретановой матрице	5,4
6	8,0	1	1	Керамика	8,0
7	13.3	1	2	Стеклопластик на эпоксидной матрице	13,3
8	10.8	1	3	Стеклопластик на полиуретановой матрице	10,8
9	15,0	1	4	Сотовая конструкция	15,0



Рис. 1.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Постановка акустического эксперимента связана с обоснованием методов прозвучивания объектов исследования и выбором исследуемых параметров акустического поля, обеспечивающих получение характеристик упругости и неупругости,

Формирование акустического поля в образцах целесообразно проводить таким образом, чтобы моделировать волновой процесс в результате воздействия на защитную преграду высокоэнергетического средства поражения. На рис. 2 представлены рентгеновские снимки защитной преграды с наружной (а) и внутренней (б) стороны после баллистических испытаний. Высокоэнергетическое средство поражения воздействует на поверхность наружного слоя защитной преграды, частично разрушает его (а) и создаёт ударную волну в наружном слое и подпоре [1], имеющую широкий спектр частот.

Результаты такого воздействия отражаются на внутренней поверхности защитной преграды в виде запреградной деформации (б). В малоинтенсивном акустическом поле этот процесс можно моделировать методом сквозного прозвучивания [9] импульсом продольной упругой волны от наружной до внутренней поверхности исследуемого объекта. Если проводить прозвучивание в центральной части исследуемого образца, то в эксперименте слои можно считать бесконечными, а влияние боковых поверхностей на закономерности формирования акустического поля будет отсутствовать. Для обеспечения статистически однородных результатов измерений размер озвучиваемой поверхности должен включать не менее 50 элементов мезоструктуры [13].

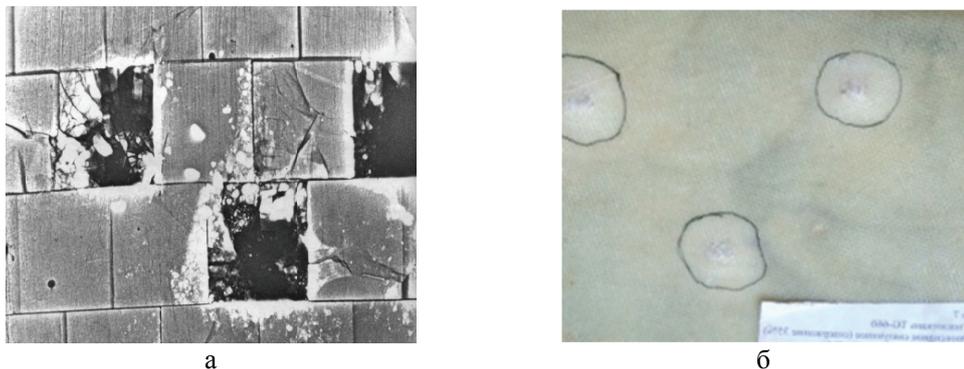


Рис. 2.

Принципы получения акустического отображения свойств материала с развитой мезоструктурой при указанном прозвучивании сформулированы нами в [14]. Там же детально рассмотрен случай использования в качестве воздействующих монохроматические колебания. В [15] для моделирования монохроматического колебания разработаны принципы использования радиоимпульса в виде синусоиды, модулированной периодическим прямоугольным импульсом. Методика использования в качестве воздействующего периодического прямоугольного (ударного [9]) импульса разработана нами в [16].

В настоящей работе в эксперименте использованы оба вида импульсного воздействия на поверхность исследуемого образца с последующим анализом параметров упругой волны, связанных с бронестойкостью и живучестью образца, на его тыльной поверхности. Применительно к нашей задаче на основании [14-16] такими параметрами являются: при воздействии радиоимпульсом – время распространения t_{ip} и уменьшение амплитуды импульса в образце $\Delta\sigma$; при воздействии ударным импульсом – время распространения импульса в образце t_{iy} и изменение времени нарастания его фронта Δt_{iy} .

Для проведения измерений использовали разработанный в ИПМ НАН Украины аппаратный комплекс для прецизионных акустических исследований, позволяющий, в частности, при импульсном прозвучивании образцов синтезировать в широких диапазонах требуемые параметры зондирующих и виды обработки принимаемых сигналов, в том числе с использованием нетрадиционных методов контроля [13].

При воздействии радиоимпульсом его длительность выбирают такой, чтобы она включала в себя не менее 7 периодов частоты заполнения, что обеспечивает узкую полосу частотного спектра излучаемого сигнала, на которую мало влияет полоса пропускания излучающего преобразователя. Это даёт возможность использовать в качестве меры потерь энергии упругой волны коэффициент затухания и применять для его измерения известные [17] методы. Частоту заполнения задают генератором синусоидальных

колебаний. Для обеспечения возможности измерения в материалах с большим коэффициентом затухания [9] использовали частоту 0,6 МГц. Время распространения t_{ip} измеряли методом радиоимпульса с дискретной задержкой, а уменьшение амплитуды импульса в образце $\Delta\sigma$ – методом калиброванного аттенюатора [17]. Эффективную скорость распространения упругой волны определяли по формуле $v_{эп} = h_i/t_{ip}$; эффективную жёсткость в направлении прозвучивания – $c_{эп} = \rho_э v_{эп}^2$ [16], а эффективный коэффициент затухания (потерь) – $\alpha_{эп} = \Delta\sigma/h_i$ [15].

При воздействии ударным импульсом формируют широкий спектр частот излучаемого сигнала, более близкий к получаемому в результате воздействия на защитную преграду высокоэнергетического средства поражения. Однако, в этом случае, возникают проблемы при использовании традиционных [13] критериев потерь энергии упругой волны [16]. В этом случае полоса частот излучаемого импульса в значительной степени определяется излучающим преобразователем. Для измерения использовали преобразователь с резонансной частотой 0,6 МГц. Время распространения импульса в образце t_{iy} и изменение времени нарастания его фронта Δt_{iy} рассчитывали по методике [16]. Эффективную скорость распространения упругой волны определяли по формуле $v_{эу} = h_i/t_{iy}$; эффективную жёсткость в заданном направлении – $c_{эу} = \rho_э v_{эу}^2$; дисперсионный параметр, служащий мерой потерь волновой энергии в материале – $1/\Delta t_{iy}$, а эффективный коэффициент потерь – $\alpha_{эу} = 1/(h_i \Delta t_{iy})$ [16].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты измерений эффективных жёсткости и коэффициента поглощения образцов, полученные при обоих видах прозвучивания, приведены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что, за исключением сотовой конструкции ($i=9$), наблюдаются общие закономерности в формировании свойств в материалах образцов, а именно: все образцы выстраиваются в одинаковые иерархические ряды по изменению своих свойств для обоих видов воздействия; убывание жёсткости приводит к увеличению коэффициента поглощения, причём при широкополосном сигнале в многослойных образцах он выше, а в однослойных – ниже, чем при узкополосном (можно объяснить влиянием границ между слоями).

Наибольшую жёсткость имеет керамический образец. Однако, его поглощающие способности практически равны нулю. Жёсткость остальных материалов меньше на порядок и более. Для комбинированных керамико-полимерных материалов она одного порядка и отличается не более, чем в два раза. Коэффициент поглощения керамико-полимерного материала с двойным подпором в разы превышает таковой каждого из остальных исследованных комбинированных материалов. Образец из стеклопластика на полиуретановой матрице имеет многократно больший коэффициент, чем на эпоксидной. Однако, использование двойного подпора увеличивает его в 2 раза.

Анализ результатов, приведенных на рис. 3, позволяет сопоставить отдельные слои и различные многослойные материалы по степени живучести и бронестойкости в соответствии с предложенными критериями. Так, полученная по критерию жёсткости, высокая бронестойкость керамики на основе карбида кремния хорошо согласуется с рекомендациями [3] для этого материала. Наличие подпора, как и должно быть [1], снижает бронестойкость (по критерию жёсткости на порядок и более) защитной преграды, но придаёт ей живучесть. Возникает возможность выбора лучшего многослойного материала по критерию бронестойкость-живучесть. В соответствии с нашими результатами – это многослойный материал с двойным подпором, как и

рекомендовано [11].

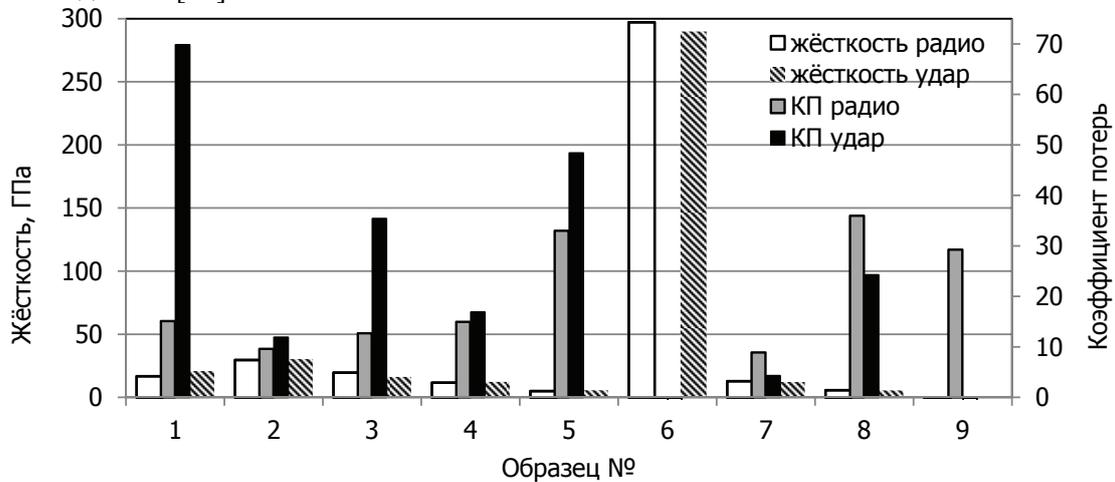


Рис.3.

Исследование фрагментации керамики в результате воздействия ударников с одинаковой кинетической энергией на комбинированные керамико-полимерные материалы с разными слоями подпора, находившимися непосредственно за керамическим слоем, показали, что наибольшую бронестойкость имеет комбинированный материал с подпором из стеклопластика с эпоксидной матрицей, а наименьшую – с сотовой конструкцией, что совпадает с результатами акустического эксперимента (см. рис. 3).

Таким образом, полученные результаты хорошо согласуются с известными литературными данными и результатами баллистических испытаний.

ВЫВОДЫ

В результате адаптации импульсного метода измерения скорости распространения упругой волны к особенностям исследуемых изделий и задаче исследования выявлены закономерности формирования различных акустических полей в комбинированных керамико-полимерных материалах и их слоях.

Использование этих закономерностей позволило сопоставить между собой эффективность использования защитных преград разного состава и дать рекомендации по их комплектации слоями материалов с различными свойствами.

Полученный результат может быть положен в основу прогнозирования с помощью неразрушающих акустических методов защитных свойств комбинированных керамико-полимерных материалов по критериям живучести и бронестойкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования* / В.А.Григорян, И.Ф.Кобылкин, В.М.Маринин, Е.Н.Чистяков / Под ред. В. А. Григоряна. – М.: Изд. РадиоСофт, 2008. – 406с.
2. *Нешпор А.В., Вишняков Л.Р., Мазная А.В. Ударопрочные слоистые материалы на основе керамических и полимерных композиционных слоев // Технологические системы. – 2009. – № 4. – С.34–39.*

3. Гнесин Г.Г. Броневые керамические материалы // Неорганическое материаловедение: Энциклопед. изд.: В 2 т. / Под ред. Г.Г.Гнесина, В.В.Скорохода.–Т.2.: Материалы и технологии. – Кн. 1 – К.: Наук. думка, 2008. – С. 171–174.
4. Вишняков Л.Р., Мазна О.В., Нешпор В.О. та ін. Вплив конструктивно-технологічних факторів на ефективність бронееlementів на основі кераміки // Проблемы прочности. – 2004. – № 5-6. – С. 128–135.
5. Вишняков Л.Р., Нешпор О.В., Мазна О.В., Сінайський Б.М. Ударна стійкість при швидкісних ударних навантаженнях склопластиків із епоксидною матрицею // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2010. – №1. – С. 66–71.
6. Гаршин А.П., Гропянов В.М., Зайцев Г.П., Семёнов С.С. Керамика для машиностроения. – М.: Научтехиздат, 2003. – 380 с.
7. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И.П.Голяминой–М.: Сов.энц., 1979. – 400 с.
8. Безьямный Ю.Г. Особенности использования акустических методов при контроле качества слоистых материалов // Порошковая металлургия. – 1999. –№5/6. – С.24-29.
9. Неразрушающий контроль: [Справочник]: В 7 томах / Под общ.ред. В. В. Клюева. Том 3: И.Н.Ермолов, Ю.В.Ланге. Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
10. Безьямный Ю.Г. Акустическое отображение материалов с развитой мезоструктурой // Акустичний вісник. – 2006. –Том 9. – № 2. – С.3–16.
11. Вишняков Л.Р., Мазна О.В., Нешпор О.В., Чижаньков Э.Ю. Патент Украины №108668 МПК F41H1/02, F41H5/04.– Броньова панель, опубл. 25.05.2015.– Бюл. № 10.
12. Шутлов В.А. Основы физики ультразвука: Учеб. пособие. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980.– 280 с.
13. Безьямный Ю.Г. Особенности акустических измерений при импульсном зондировании материалов, изготавливаемых методами порошковой металлургии // Современные проблемы физического материаловедения: Сб. науч. тр. Института проблем материаловедения им. И.Н.Францевича НАН Украины. Сер. "Физико-химические основы технологии порошковых материалов" – К., 2005. – С. 190–201.
14. Безьямный Ю.Г. Акустичний контроль матеріалів з розвинутою мезоструктурою // Фізико-хімічна механіка матеріалів.– 2007.– № 4.– С. 53–65.
15. Безьямный Ю.Г., Козирацкий Е.А., Талько О.В. Акустическое отображение внутреннего строения и свойств композиционных материалов и его компьютерная интерпретация // Электронное строение и свойства тугоплавких соединений, сплавов и металлов.– Киев: ИПМ НАН Украины, 2004.– С.111–122.
16. Безьямный Ю.Г., Мазная А.В., Высоцкий А.Н., Комаров К.А., Талько О.В. Особенности использования неразрушающих акустических методов для прогнозирования защитных свойств комбинированных керамико-полимерных материалов // Электроэнергетика та перетворювальна техніка. Вісник НТУ «ХП».– 2017. – №4(1226). – С.8-13.
17. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. – М.: Мир, 1972.– 308 с.