

подсветки течения, разнесенной во времени Погрешности измерений: диаметра фрагментов ЗТП – $\Delta d \leq \pm 4$ мкм; скорости фрагментов ЗТП, УВ – $\Delta U \leq 10\%$; давления в газодинамическом потоке – $\Delta P \leq 19\%$; времени – $\Delta t \leq 0,2$ мкс.

Выводы

Создан комплекс для исследования микроструктуры турбулентного перемешивания. Комплекс позволяет исследовать течения с пространственным разрешением от 7 мкм и временным - от 4 нс. Получены новые результаты: из зоны ТП выбрасываются тонкие микрокумулятивные струи жидкости; после прохождения УВ по зоне ТП газов зона стремится к однородной, структура фронта УВ изменяется. Получено распределение частиц в зоне турбулентного перемешивания на контактной границе газ-жидкость.

Список литературы

1. Taylor G.I. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. I. Proc.Roy.Soc., 1950. V.A201. P.192.
2. Richtmyer R.D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. Commun.Pure Appl.Math., 1960. V.13. P.297.
3. Мешков Е.Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной. Изв.АН СССР, МЖГ, 1969, N 5. с.151-158.
4. Helmholtz H.L.F. Uber discontinuirlish Flussigkeits-Bewegungen. Monatsberichte Konigl. Preus. Akad. Wiss. Berlin. 1868. P.215.
5. Абакумов С.А., Кривonos О.Л., Невмержицкий Н.В., Руднев А.В., Сотсков Е.А., Сеньковский Е.Д., Точилина Л.В., Фролов С.В. Устройство для регистрации микронных частиц в газодинамическом потоке. Патент на полезную модель № 139204. 2014.
6. Poduvalov A.N. Software for TMZ image processing. The Proc of the 6th IWPTCM, Marseille, France, 1997, p.411

СОВМЕЩЕНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ЛАЗЕРНО-ГЕТЕРОДИННОЙ МЕТОДИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ЗВУКА В УДАРНО-СЖАТЫХ МЕТАЛЛАХ

Е.А. Козлов, Д.Г. Панкратов, Д.П. Кучко, А.К. Якунин, А.Г. Попцов, М.А. Ральников

РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Россия

На примере изучения ступенчатых образцов из аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т и высокочистого магния марки Mg95 при их ударно-волновом нагружении в диапазоне $\sigma_{xx} = 60 \dots 120$ ГПа и $20 \dots 30$ ГПа соответственно, продемонстрирована эффективность совмещения в каждом взрывном эксперименте измерений по фотоэлектрической (ФЭМ) и лазерно-гетеродинной (ЛГМ) методикам.

Совмещение методик расширило диапазон применения и повысило надёжность получаемой непротиворечивой информации по скоростям звука в ударно-сжатых конструкционных и модельных материалах.

Введение

Интерес к определению продольных c_l и объёмных c_v скоростей звука в ударно-сжатом веществе объясняется тем, что они являются определяющими величинами во многих процессах, связанных с ударными волнами (УВ) и волнами разрежения (ВР). Измерения продольной $c_l(\sigma_{xx})$ и объёмной $c_v(\sigma_{xx})$

скоростей звука в ударно-сжатых материалах позволяют получить информацию об их упруго-пластических свойствах. Более того, так как упругие модули разных фаз одного и того же материала существенно различаются, то по скачкообразному изменению зависимостей $c(\sigma_{xx})$ и $c_b(\sigma_{xx})$ можно судить об изменении фазового состава материала вдоль его ударной адиабаты и уточнять координаты пересечения ударной адиабаты с границами фазовых равновесий в p, T -плоскости [5].

Для определения c и c_b используется метод догоняющей разгрузки – регистрация моментов прихода головных характеристик волн разрежения, приводящих к изменению регистрируемых параметров течения, находящегося в контакте с исследуемым образцом для ФЭМ либо скорости контактной границы образца и оконного материала или скорости свободной поверхности образца для ЛГМ.

Цель работы – демонстрация эффективности совмещения ФЭМ и ЛГМ при проведении измерений скоростей звука ряда конструкционных и модельных материалов.

Материалы, образцы, индикаторы и условия их взрывного нагружения

В данной работе исследовались: нержавеющая сталь 12Х18Н10Т и магний марки Мг95. В качестве индикаторов использовались хлороформ (CHCl_3) и карбогал (C_8F_{16}). При проведении расчётных оценок параметров состояний изучаемых процессов были использованы следующие D, u -соотношения:

- для стали 12Х18Н10Т ($\rho_0 = 7,89 \text{ г/см}^3$) – $D = 4,56 + 1,501u$, $u < 3 \text{ км/с}$ [11];
- для магния Мг95 ($\rho_0 = 1,74 \text{ г/см}^3$) – $D = 4,54 + 1,238u$, $u < 7,4 \text{ км/с}$ [12];
- для хлороформа CHCl_3 ($\rho_0 = 1,483 \text{ г/см}^3$) – $D = 1,317 + 1,572u$, $0,8 < u < 2,9 \text{ км/с}$ [13];
- для карбогала C_8F_{16} ($\rho_0 = 1,858 \text{ г/см}^3$) – $D = 0,9 + 2u - 0,0622u^2$, $0 < u < 3 \text{ км/с}$ [14].

Образцы представляли собой диски, имеющие четыре ступени секторной формы, рисунок 1. Толщина ступеней h выбиралась по результатам проведённых до взрывных экспериментов расчётно-теоретических оценок изучаемых процессов. При выборе высоты ступеней обеспечивалось исключение влияния на результаты измерений волн боковой разгрузки с торцов образца, а также кумулятивных струй, являющихся следствием ступенчатой формы образца.

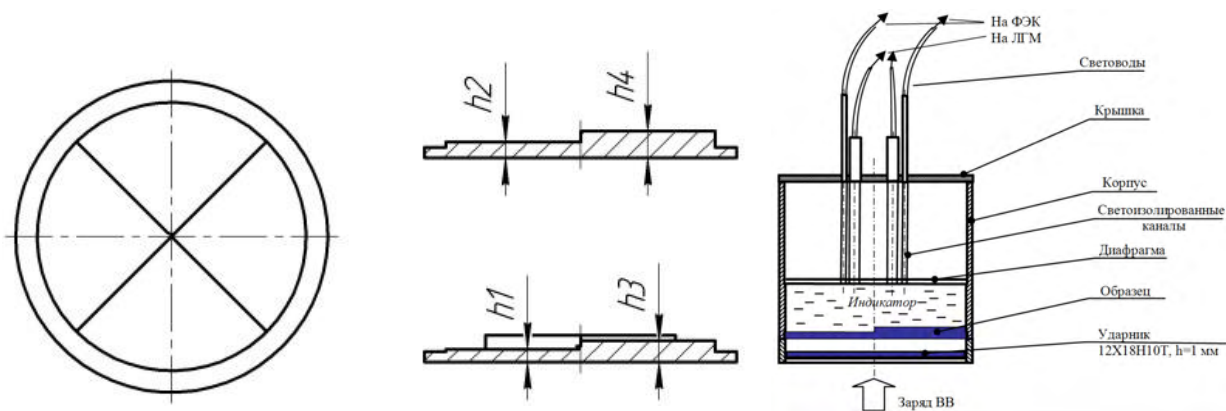


Рисунок 1. Конструкция 4х-ступенчатого образца и эскиз экспериментального узла (не в масштабе)

Взрывное нагружение образцов осуществлялось с использованием малогабаритных нагружающих устройств (МНУ) с зарядами ВВ $\varnothing 60$ мм и энерговыделением до 300 г ТНТ. Плоский фронт детонационной волны на выходе МНУ формировался при помощи взрывной линзы. Основные параметры использованных в работе зарядов показаны в таблице 1. На рисунке 1 показан эскиз экспериментального узла (не в масштабе). В таблице 2 приведены расчетные параметры состояний, реализуемых в опытах.

Таблица 1. Основные параметры МНУ

№	Тип ВВ	Толщина а ВВ, мм	Материал ударника	h_{yA} , мм	W_{yA} , км/с	База полёта, мм
1	Смесь тротил-гексоген	-	12X18H10T	1	2,31	6
2	Смесь тротил-гексоген	5	12X18H10T	1	2,59	6
3	Смесь тротил-гексоген	10	12X18H10T	1	2,84	6
4	Состав на основе октогена	10	12X18H10T	1	3,12	6
5	Состав на основе октогена	15	12X18H10T	1	3,47	7
6	Состав на основе октогена	25	12X18H10T	1	3,96	9

Таблица 2. Расчётные параметры состояний

№ МНУ	2	4	5	6	1	3
Ударник	12X18H10T					
ρ_0 , г/см ³	7,89					
W_{yA} , км/с	2,59	3,12	3,47	3,96	2,31	2,84
Образец	12X18H10T				Mг95	
ρ_0 , г/см ³	7,89				1,73	
$D_{обр}$, км/с	6,50	6,90	7,16	7,53	6,77	7,27
$u_{обр}$, км/с	1,29	1,56	1,74	1,98	1,80	2,20
$\sigma_{xx\text{обр}}$, ГПа	66,4	84,9	98,0	117,7	21,3	27,8
Q , г/см ³	9,85	10,19	10,41	10,70	2,36	2,48
c_l , км/с	7,80	8,16	8,39	8,69	7,52	7,85
Индикатор	C ₈ F ₁₆				CHCl ₃	
ρ_0 , г/см ³	1,86				1,483	
$D_{инд}$, км/с	4,87	5,54	5,97	6,55	4,76	5,43
$u_{инд}$, км/с	2,13	2,52	2,77	3,13	2,19	2,61
$P_{инд}$, ГПа	19,2	25,9	30,8	38,1	15,5	21,0

* - для оценок c_l в стали 12X18H10T использовалась зависимость вида $c_l = 1,047Q - 2,515$ [3];
для оценок c_l в Mг95 использовались результаты работы [15].

Результаты экспериментов

В рамках работы было проведено 6 опытов по регистрации процессов совмещённой методикой ФЭМ-ЛГМ как непосредственно на фронте УВ в индикаторной жидкости, так и за фронтом УВ в случае, если жидкость сохраняет полную или частичную прозрачность в ударных волнах низкой или умеренной интенсивности. То есть, в области слабых ударных сжатий, где получение информации по методике ФЭМ проблематично, необходимые данные будут получены при помощи ЛГМ. В области умеренных и сильных ударных волн обе методики регистрируют динамику распространения ударной волны по индикаторному веществу и момент догона фронта ударной волны первыми характеристиками вееров упругой и пластической разгрузки. Именно такая совмещённая диагностика должна позволить преодолеть существующие противоречия в измерениях скоростей звука в некоторых конструкционных и модельных материалах, отмечавшиеся, например, в работах [4, 16].

Осциллограммы, полученные в опытах, с регистрацией процессов при помощи ФЭМ, а также примеры спектрограмм, полученных в четырёх каналах ЛГМ для каждого опыта, показаны на рисунках 2 и 3.

Из осциллограмм ФЭМ видно, что ожидаемые явления в исследуемых образцах зафиксированы. Разметка осциллограмм выполнена для первого опыта. На остальных осциллограммах описываемые явления аналогичны. Отсчёт времени – от момента подачи напряжения на электродетонатор.

Из спектрограмм, полученных по ЛГМ видно, что во всех опытах удалось зарегистрировать профили скорости либо границы раздела образец-индикатор, рисунок (а, в), либо скорости фронта УВ в индикаторе, рисунок 3(б), либо одновременно и то и другое, рисунок 2(б, г), рисунок 3(а). Отсчёт времени спектрограмм ЛГМ – также от момента подачи напряжения на электродетонатор.

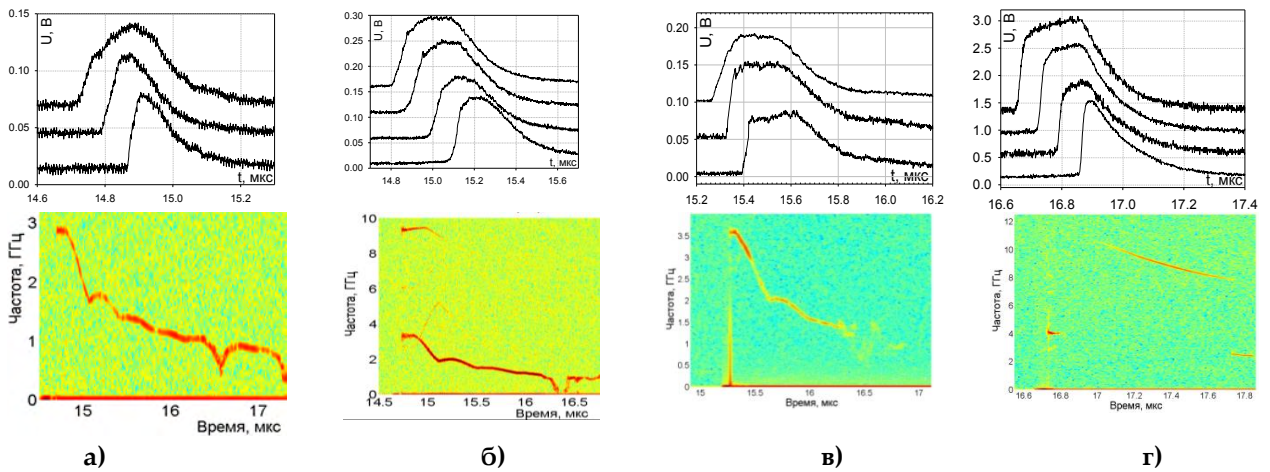
Из данных, представленных на рисунках 2 и 3 непосредственно следует, что в области низких нагрузок карбогал работает скорее как оконный материал, сохраняя прозрачность в ближнем ИК-диапазоне. ЛГМ регистрирует изменение во времени скорости движения границы раздела образец-индикатор сквозь слой ударно-сжатого карбогала. В то же время свечение фронта УВ в нём в спектральном диапазоне $0,30 \div 0,65$ мкм достаточно нестабильно, о чём свидетельствует качество осциллограмм, полученных при помощи ФЭМ. По мере увеличения интенсивности ударно-волнового нагружения образца ЛГМ начинает фиксировать и отражение доплеровского сигнала от фронта УВ в самом карбогале. Стабильность интенсивности свечения ударно-сжатого карбогала в диапазоне $0,30 \div 0,65$ мкм улучшается, но, тем не менее, карбогал в значительной мере всё ещё сохраняет прозрачность, о чём свидетельствует регистрация лазерно-гетеродинной методикой движения не только фронта УВ в карбогале, но и границы раздела изучаемого образца и карбогала.

Использование карбогала в качестве индикаторной жидкости в нижнем диапазоне давлений имеет недостаток, а именно – большую инерционность карбогала по сравнению с хлороформом. Об этом свидетельствует большее время нарастания переднего фронта сигнала при сопоставимых уровнях ударной нагрузки.

Для хлороформа (рисунок 3) характерна быстрая потеря прозрачности при небольшом увеличении амплитуды нагружающего импульса. В реализованном диапазоне давлений хлороформ уже является практически непрозрачным, поэтому зарегистрировать весь профиль скорости движения границы раздела образец-индикатор не удалось. Возможно, это удастся сделать, уменьшив амплитуду импульса нагрузки, то есть, используя ударники, летящие с меньшей скоростью, чем использовались в данной работе. Но, даже не регистрируя в полной мере скорости движения границы раздела «изучаемое вещество-индикатор», ЛГМ регистрирует непрерывно во времени скорость движения фронта сильной ударной волны в хлороформе.

Качественная обработка осциллограмм и спектрограмм

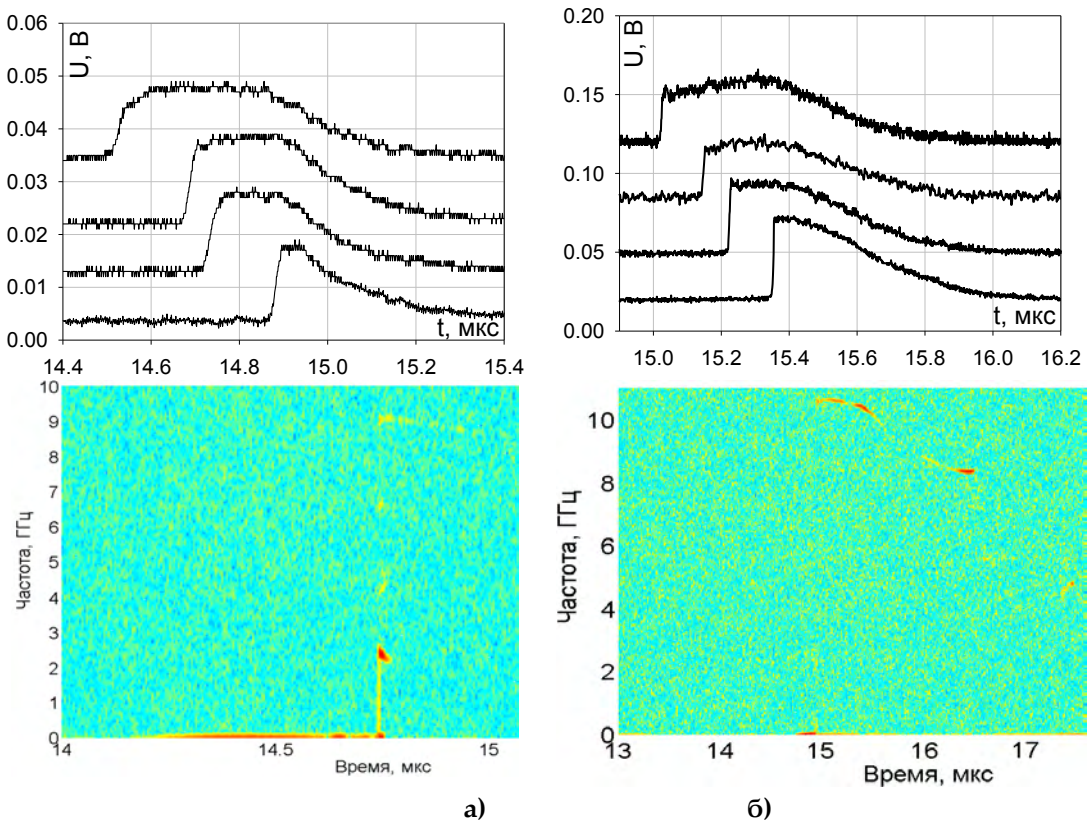
ФЭМ Результаты экспериментально-расчётного определения скоростей звука в ударно-сжатой стали 12X18H10T и магнии Mg95 представлены в таблицах 3 и 4. Графическое отображение полученных результатов показано на рисунке 6. Там же показаны результаты измерений ЛГМ и результат аппроксимации данных по скоростям звука в стали 12X18H10T, полученных во РФЯЦ-ВНИИТФ при помощи ФЭМ в диапазоне напряжений $50 \div 200$ ГПа [3]. Зависимость скорости звука в стали от плотности была описана единой зависимостью вида $c_l = 1,047\rho - 2,515$ (закон Бёрча [17]) и затем пересчитана в зависимость скорости звука от продольного напряжения в образце $c_l(\sigma_{xx})$. Для магния на графике изображены результаты ранее проведённых в РФЯЦ-ВНИИТФ экспериментов, полученные при помощи двух методик – методики манганиновых датчиков (ММД) и ФЭМ.



а) опыт 115/1344 (К97); б) опыт 114/1344 (К96); в) опыт 141/1344 (К127); г) опыт 147/1344 (К137).

Рисунок 2. Осциллограммы ФЭМ и спектрограммы ЛГМ, полученные в опытах.
 Материал образца – сталь 12Х18Н10Т, индикатор – карбогал С8F16

Погрешность измерений скорости звука при помощи ФЭМ составляет $\pm 1,5\%$ при «симметричном» ударе (опыты на стали) и $\pm 3\%$ при «несимметричном» (опыты на Mg95).



а) опыт 125/1344 (К118); б) опыт 124/1344 (К117).

Рисунок 3. Осциллограммы ФЭМ и спектрограммы ЛГМ, полученные в опытах.
 Материал образца – магний Mg95, индикатор – хлороформ CHCl3.

ЛГМ Восстановленные по спектрограммам профили скорости представлены на рисунках 4 и 5. Результаты экспериментально-расчётного определения скоростей звука в ударно-сжатой стали 12X18H10T и магнии Mg95 показаны в таблицах 5 и 6.

Таблица 3. Продольная скорость звука в стали 12X18H10T по данным ФЭМ измерений

№ опыта	Нагружающее устройство				Образец из 12X18H10T		
	№ МНУ	Габариты заряда	Ударник	$W_{уд}$, км/с	σ_{xx} расчёт, ГПа	c_l расчёт, км/с	c_l эксп, км/с
115/1344	2	Ø60×5	12X18H10T	2,59	66,4	7,80	7,90±0,12
114/1344	4	Ø60×10		3,12	84,9	8,16	8,06±0,12
141/1344	5	Ø60×15		3,47	98,0	8,39	8,22±0,13
147/1344	6	Ø60×25		3,96	117,7	8,69	8,78±0,13

Таблица 4. Продольная скорость звука в магнии Mg95 по данным ФЭМ измерений

№ опыта	Нагружающее устройство				Образец из Mg95		
	№ МНУ	Габариты заряда	Ударник	$W_{уд}$, км/с	σ_{xx} расчёт, ГПа	c_l расчёт, км/с	c_l эксп, км/с
125/1344	1	-	12X18H10T	2,31	21,2	7,52	7,81±0,23
124/1344	3	Ø60×10		2,84	27,7	7,85	7,90±0,23

Графическое отображение полученных результатов показано на рисунке 6. Погрешность измерений c_l при помощи ЛГМ составляет $\pm 1,6\%$ при «симметричном» ударе (опыты на стали) и $\pm 2,8\%$ при «несимметричном» (опыты на Mg95). Результаты измерений c_l в ударно-сжатых стали 12X18H10T (в диапазоне 66-118 ГПа) и высокочистом Mg (в диапазоне 21-28 ГПа) по двум взаимодополняемым методикам хорошо согласуются между собой. Точность измерений скоростей звука в ударно-сжатых исследованных материалах близки, у ЛГМ несколько выше, но главное преимущество – это её работоспособность в более широком диапазоне давлений и температур ударного сжатия.

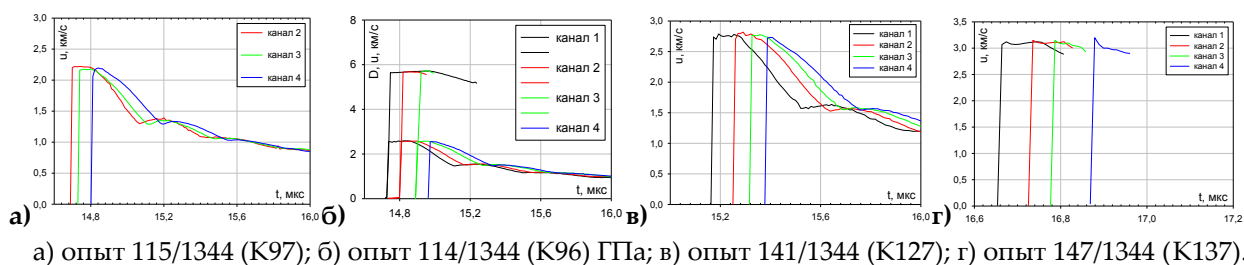


Рисунок 4. Профили скорости, восстановленные из спектрограмм ЛГМ. Материал образца – сталь 12X18H10T, индикатор – карбонил CoF₆.

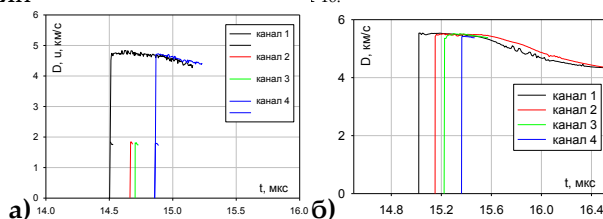


Рисунок 5. Профили скорости, восстановленные из спектрограмм ЛГМ. Материал образца – магний Mg95, индикатор – хлороформ CHCl₃

Таблица 5. Продольная скорость звука в стали 12X18H10T по данным измерений ЛГМ.

№ опыта	Нагружающее устройство			Образец из 12X18H10T			
	№ МНУ	Габариты заряда	Материал и толщина ударника	$W_{уд}$, км/с	σ_{xx} расчёт, ГПа	C_l расчёт, км/с	C_l эксп, км/с
115/1344	2	Ø60×5	12X18H10T $h_{уд} = 1$ мм	2,59	66,4	7,80	7,93±0,13
114/1344	4	Ø60×10		3,12	84,9	8,16	8,25±0,14
141/1344	5	Ø60×15		3,47	98,0	8,39	8,46±0,14
147/1344	6	Ø60×25		3,96	117,7	8,69	8,82±0,15

Таблица 6. Продольная скорость звука в магнии Mg95 по данным измерений ЛГМ.

№ опыта	Нагружающее устройство			Образец из Mg95			
	№ МНУ	Габариты заряда	Материал и толщина ударника	$W_{уд}$, км/с	σ_{xx} расчёт, ГПа	C_l расчёт, км/с	C_l эксп, км/с
125/1344	1	-	12X18H10T	2,31	21,2	7,52	7,90±0,22
124/1344	3	Ø60×10	$h_{уд} = 1$ мм	2,84	27,7	7,85	7,98±0,22

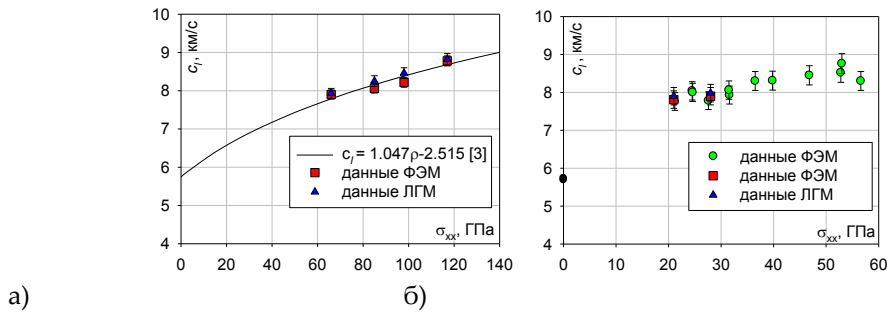


Рисунок 6. Сравнение результатов по скоростям звука, полученных при помощи ФЭМ и ЛГМ: а) – сталь 12X18H10T; б) – магний Mg95

Выводы

1. Продемонстрированы целесообразность и эффективность совмещения двух независимых взаимно-дополняющих друг друга методик ФЭМ и ЛГМ для расширения диапазона работоспособности, повышения надежности и точности измерений скоростей звука в ударно-сжатых конструкционных и модельных материалах.
2. Проведено 6 взрывных экспериментов с регистрацией волновых процессов при помощи совмещенной методики ФЭМ-ЛГМ. Показано, что в области относительно низких напряжений ЛГМ позволяет регистрировать как скорость границы раздела «изучаемое вещество-индикатор», так и скорость фронта УВ, распространяющейся по индикатору. В области более высоких напряжений и, соответственно, давлений в индикаторе ЛГМ регистрирует скорость фронта УВ в индикаторе, что является полным аналогом измерений, проводимых по ФЭМ, но с несколько лучшей точностью.
3. Выполнено экспериментально-расчётное определение продольных скоростей звука для эталонного конструкционного материала – стали 12X18H10T и для модельного материала – магния марки Mg95. Проведено сравнение результатов, полученных в каждом эксперименте двумя независимыми методиками, как между собой, так и с ранее полученными. Показано их хорошее взаимное согласие.
4. Реализация предложенного подхода обеспечивает не только существенное улучшение статистической представительности получаемых в каждом эксперименте результатов, но и должна позволить снять противоречия, длительное время существующие в ряде важных конструкционных материалов.

Список литературы

1. R.G.McQueen, J.W.Hopson, L.N.Fritz, Optical Technique for Determining Rarefaction Wave Velocities at Very High Pressures // *Rev. Sci. Instr.*, 1982, V.53, №2, P.245-250.
2. E.A.Kozlov, V.I.Tarzhanov, D.G.Pankratov, A.K.Yakunin, V.M.Yelkin, V.N.Mikhaylov, Application of Optical Analyzer Technique for Measurements of Sound Velocities in Shock-Compressed Al-Mn Alloy for Calibration of Recent Elastic-Viscous-Plastic Models. *Int. Conf. on High Energy Density Physics ZABABAKHIN SCIENTIFIC TALKS – 2005, Snezhinsk, Russia, 5-10 September 2005, Melville, New York, 2006, AIP Conference Proceedings, Vol.849, pp.406-410.*
3. Е.А.Козлов, Д.Г.Панкратов, О.В.Ткачѐв, А.К.Якунин, Измерение скоростей звука в аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т в диапазоне напряжений до 200 ГПа, Международная конференция «Ударные волны в конденсированном веществе» (SWCM-2012), 16-21 сентября 2012, Киев, Украина, стр.263-265.
4. E.A.Kozlov, D.G.Pankratov, O.V.Tkachyov, A.K.Yakunin, Sound Velocities and Shear Strength of Shocked U within 10-250 GPa, 19th European Conference on Fracture – Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety, 26-31 august 2012, Kazan, Russia, Book of Abstracts, p. 146, CD ROM, Paper №603, 6 pages.
5. R.G.McQueen, J.M.Brown, Phase Transitions, Grüneisen Parameter, and Elasticity for Shocked Iron between 77 GPa and 400 GPa // *J. of Geoph. Res.*, 1986, V.91, №B7, P. 7485-7494.
6. O.T.Strand, D.R.Goosman, C.Martinez, T.L.Whitworth, W.W.Kuhlow, A Novel System for High-Speed Velocimetry Using Heterodyne Techniques, *Rev. Sci. Instrum.* 77, 083108 (2006).
7. M.D.Bowden, M.P.Maisey, The development of a heterodyne velocimeter system for use in submicrosecond time regimes, *Proc. of SPIE Vol. 6662, 66620B* (2007);
8. J.Bénier, P.Mercier, E.Dubreuil, J.Veaux and P.A.Frugier, New heterodyne velocimeter and shock physics, *ДУМАТ 2009*, pp.289-294;
9. Shouxian Liu, Detian Wang, Tao Li, Guanghua Chen, Zeren Li, and Qixian Peng, Analysis of photonic Doppler velocimetry data based on the continuous wavelet transform, *Rev. Sci. Instrum.* 82, 023103 (2011).
10. Е.А.Козлов, С.А.Бричков, Д.П.Кучко, М.А.Ральников, А.В.Ольховский, О.В.Ткачѐв, Результаты взрывных экспериментов по разгону стальных пластин с одновременной диагностикой процессов двумя лазерно-интерферометрическими методиками, ФГВ, 2014 (в печати).
11. E.A.Kozlov. Shock Adiabatic Features, Phase Transition Macrokinetics, and Spall Fracture of Iron in Different Phase States. *High Pressure Research*. 1992, Vol.10, P.541-582.
12. Р.Ф.Трунин, Л.Ф.Гударенко, М.В.Жерноклетов, Г.В.Симаков. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ // Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001, 446 с.
13. М.Ф.Гоголя, И.М.Воскобойников, Излучение ударно-сжатых галогенопроизводных метана // ФГВ, 1988, т.24, №6, с.127-134.
14. Л.Ф.Гударенко, М.В.Жерноклетов, С.И.Киршанов, А.Е.Ковалѐв, В.Г.Куделькин, Т.С.Лебедева, А.И.Ломайкин, М.А.Мочалов, Г.В.Симаков, А.Н.Шуйкин, И.М.Воскобойников. Экспериментальные исследования свойств ударно-сжатого карбогала. Уравнение состояния карбогала и оргстекла. ФГВ, 2004, т.40, №3, с.104-116.
15. G.V.Sin'ko and N.A.Smirnov, *Ab initio* calculations for the elastic properties of magnesium under pressure // *Phys. Rev. B*, V.80, 2009, с.104113.
16. В.М.Елькин, В.Н.Михайлов, Т.Ю.Михайлова, Полуэмпирические модели модуля сдвига в широком диапазоне температур и давлений ударного сжатия, ФММ, 2011, т.112, №6, с.563-576
17. J.W.Shaner, R.S.Hixson, D.A.Boness, Birch's Law for Fluid Metals // In: *Shock Waves in Condensed Matter – 1987*, Elsevier Science Publisher, B.V., p.135-138.
18. Е.А.Козлов, Д.Г.Панкратов, А.К.Якунин, А.Г.Попцов Измерение скоростей звука в ударно-сжатом магниевом сплаве МА-14, XV международная конференция Харитоновские научные чтения, 18-22 марта 2012, Саров, Россия.