

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОТРАЖЕНИЯ УВ В ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

Н. А. Костюков, Ф. А. Сагдиев
(Новосибирск)

Известно, что наклонное отражение ударных волн (УВ) от границ раздела двух сред может происходить в двух различных режимах: регулярном и нерегулярном (маховском). Какой из режимов будет иметь место, зависит от угла падения УВ на отражающую поверхность, ее интенсивности и других факторов. Критическими параметрами отражения называют углы падения УВ, при которых происходит смена режима отражения, а также соответствующие этим углам давления отражения и плотности. Умение прогнозировать критические параметры представляет значительный интерес, так как при смене режима отражения качественно изменяется характер течения и достигаются экстремальные значения параметров состояния обеих сред.

В настоящее время установлено, что в монолитных и порошковых материалах экспериментальные данные по определению критических параметров отражения УВ удовлетворительно согласуются с расчетными значениями верхней границы области существования регулярных режимов отражения [1—4]. Трудность заключается в том, что эти значения могут быть вычислены лишь для сред с известным уравнением состояния. В [5] предложен приближенный метод расчета критических параметров отражения УВ в конденсированных средах. Его достоинство — возможность определения критических параметров отражения УВ на основе минимума информации — динамической сжимаемости исследуемого материала и материала отражающей преграды.

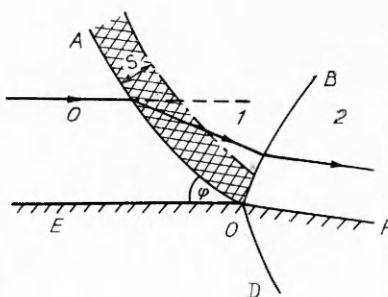
Метод разработан для материалов, допускающих модельное представление в рамках гомогенной среды. Возможность его применения к порошковым композиционным материалам (ПКМ), представляющим собой механические смеси разнородных твердых частиц, не является очевидной. Кроме того, для ПКМ ситуация осложняется тем, что ударно-волновое нагружение может привести к чрезвычайно неравномерному распределению (расслоению) компонентов: в некотором объеме ударно-сжатого образца концентрация одного из компонентов становится в несколько раз выше, чем в прилегающей области [6—8]. Таким образом, ПКМ не удовлетворяют требованию гомогенности не только в микромасштабном диапазоне (т. е. на размерах, сравнимых с характерным размером частиц), но и в макрообластях, во много раз его превышающих.

Для модельного описания ПКМ нам представляется наиболее корректным подход, основанный на гипотезе взаимопроникающих течений [9]. Однако его использование наталкивается на существенные трудности, обусловленные, прежде всего, отсутствием в настоящий момент каких-либо методов определения сил взаимодействия между частицами различных компонентов.

Несмотря на перечисленные проблемы, есть основания полагать, что применение приближенного метода [5] к ПКМ позволит получить удовлетворительные результаты. Это предположение основано на следующих выводах, вытекающих из анализа известных к настоящему времени данных по наклонному отражению УВ [1—4, 10]: 1) характерный размер задачи (толщина слоя исследуемого вещества в случае регулярного отражения или размер маховской УВ при нерегулярном отражении) много больше размера частиц, составляющих ПКМ; 2) режим отражения обусловлен параметрами потока вещества в малой окрестности точки ветвления УВ (точка *O* на рис. 1); 3) при регулярном отражении поток

Рис. 1. Схема течения вещества при регулярном режиме отражения в системе координат, связанной с точкой O .

EOF — отражающая поверхность; AO — фронт падающей УВ; BO — фронт отраженной УВ; OD — фронт УВ в преграде. $0, 1, 2$ — области невозмущенного вещества и вещества, сжатого падающей и отраженной УВ соответственно.



вещества за фронтом отраженной УВ в системе координат, связанной с точкой ветвления, является сверхзвуковым, поэтому возмущения, возникающие на отражающей поверхности за указанной точкой, не могут повлиять на характер отражения.

Кроме того, результаты экспериментального исследования структуры течения бинарных смесей твердых частиц в условиях двумерного ударно-волнового нагружения показывают [8], что расслоение ПКМ имеет инерционную природу и связано со скоростным запаздыванием частиц тяжелых компонентов при переходе потока через фронт УВ. Исходя из этого, можно утверждать, что величина относительного смещения частиц разнородных компонентов смеси зависит от различия их скоростей за фронтом УВ и временного интервала, на котором это различие существует.

Вблизи точки ветвления УВ величина расслоения частиц за фронтом падающей УВ мала, так как мал временной отрезок, на котором поток вещества движется между падающим и отраженным фронтами. Рассмотрим наиболее неблагоприятный (чисто гипотетический) случай, когда при переходе через фронт УВ ускорение испытывают только частицы легкого компонента, а скорость тяжелых частиц остается неизменной. На рис. 1 траектория движения легких частиц обозначена стрелками, тяжелых — штриховой линией. Нетрудно показать, что относительное смещение частиц на величину, сравнимую с их характерным размером d , произойдет на расстоянии, удаленном от фронта УВ на $s = Dd/u$, где D — скорость распространения фронта в лабораторной системе координат, u — массовая скорость легкого компонента. Обычно в условиях ударно-волнового компактирования порошковых материалов $s \gg d$.

Приведенные аргументы позволяют надеяться, что при решении рассматриваемых задач поведение ПКМ вблизи точки ветвления УВ может быть описано с помощью модели гомогенной среды, построенной с учетом динамических сжимаемостей исходных компонентов и их массовых концентраций. Это, в свою очередь, открывает возможности для применения к ПКМ приближенного метода [5].

В настоящей работе проведено сравнение расчетных и экспериментальных значений критических параметров отражения УВ в ПКМ двух типов: смеси порошков карбида титана и никелида титана в массовом соотношении 50/50 и смеси порошков нихрома (Х20Н80) с нитридом бора 85/15. Относительные плотности ϵ смесей в исходном состоянии составляли соответственно 0,5 и 0,38 плотности монолитного состояния.

Выбор составов смесей обусловлен их практической значимостью в решении конкретных прикладных задач, а также спецификой поведения в процессе ударного сжатия. Первый состав — типичный представитель ПКМ, не испытывающих заметного расслоения в диапазоне ударно-волнового воздействия от 1 до 7 ГПа, второй — расслаивается при всех рассмотренных амплитудах УВ, о чем свидетельствуют результаты металлографических исследований сохраненных образцов.

Ударные адиабаты ПКМ рассчитывались поэтапно. На первом определялись ударные адиабаты исходных компонентов в монолитном состоянии. Учитывая, что нихром Х20Н80 — сплав типа твердого раствора [11] и, следовательно, допускает модельное представление в виде гомогенной среды, а также принимая во внимание, что дефект объема не превышает 1%, его ударная адиабата рассчитывалась с помощью термодинамиче-

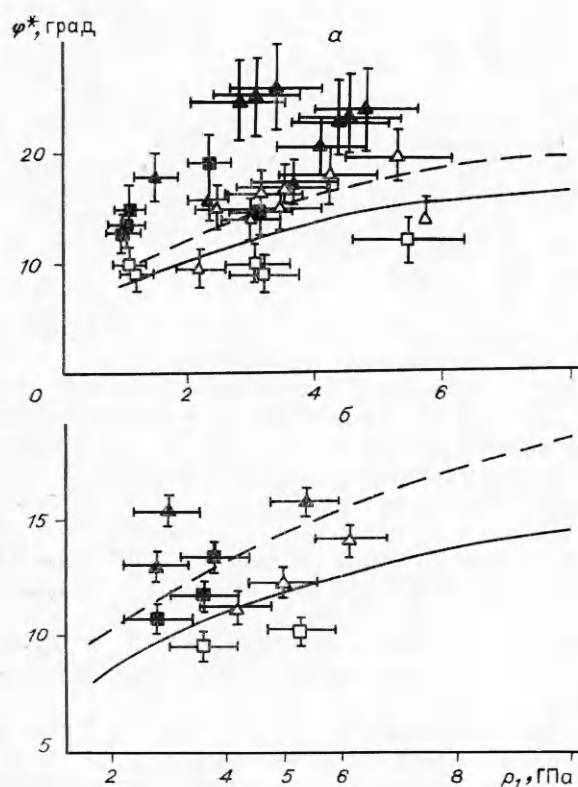


Рис. 2. Зависимости $\varphi^*(p_1)$ для смеси X20H80/BN с $\varepsilon = 0,38$ (а) и TiC/TiNi с $\varepsilon = 0,5$ (б).

ской модели, предложенной в [12]. Никелид титана — интерметаллическое соединение с дефектом объема 4 % [13], его ударная адиабата заимствована из [14]. Ударная адиабата монолитного нитрида бора строилась по известной адиабате пористого (94 % плотности монолита) вещества [15] с использованием слоистой модели [16]. Ударная адиабата карбида титана экспериментально определена в [17].

Данные, полученные на первом этапе, использовались в расчетах второго этапа, цель которого — построение ударных адиабат исследуемых

ПКМ в монолитном состоянии. Для этого применялся метод аддитивности удельных объемов составляющих компонентов [18]. Частицы компонентов смесей имели следующие размеры: нитрид бора — $1 \div 10$ мкм, карбид титана, нихром и никелид титана — $10 \div 60$ мкм, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к нижней границе размера неоднородностей композита.

Необходимо отметить, что согласно результатам анализа, проведенного в [19, 20], сжатие каждого из компонентов смеси происходит не вдоль ударной адиабаты для данного материала и, следовательно, идея метода аддитивности не вполне обоснованна. Однако многочисленные экспериментальные данные [21—24], а также результаты, полученные на основе теории взаимопроникающих течений [20], показывают хорошую работоспособность метода не только для смесей с близкими, но и со значительно различающимися адиабатами.

На третьем, заключительном этапе на основе слоистой модели пористой среды [16] и данных, полученных на втором этапе, строились ударные адиабаты исследуемых ПКМ в пористом состоянии. Выбор данной модели обусловлен ее относительной простотой, удовлетворительным совпадением расчета с экспериментом, а также тем обстоятельством, что в дальнейшем полученные адиабаты использовались лишь для определения давления и плотности ударно-сжатого материала и не применялись для нахождения его температуры.

Критические параметры отражения УВ в исследуемых ПКМ рассчитывались на основе приближенного метода [5]. Результаты расчетов критического угла падения φ^* в зависимости от интенсивности падающей УВ p_1 представлены на рис. 2. Сплошными линиями обозначены зависимости, относящиеся к отражению УВ от абсолютно жесткой преграды, штриховыми — от стальной преграды. На рис. 3 показаны расчетные значения критических давлений p_2^* и плотностей ρ_2^* (отнесенные к соответствующим параметрам падающей УВ) в зависимости от интенсивности падающей УВ. Следует отметить, что при отражении слабых УВ возможно увеличение давления в композите более чем на порядок.

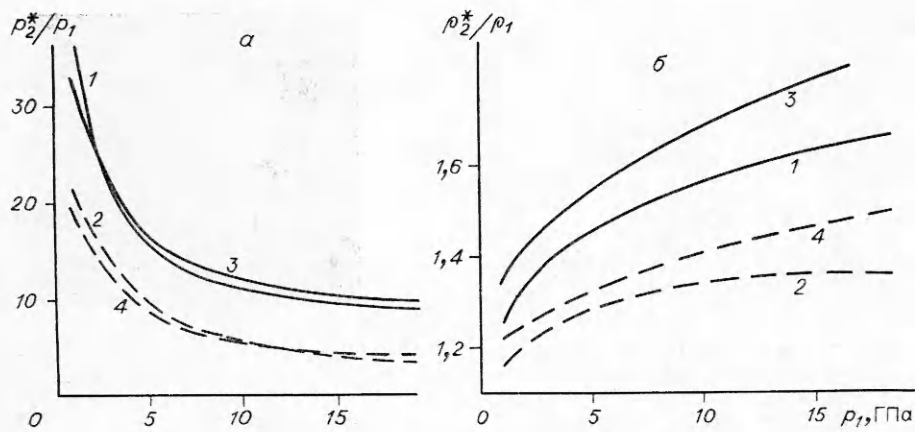


Рис. 3. Зависимости $p_2^*(p_1)$ (а) и $\rho_2^*(p_1)$ (б).
1, 2 — X20H80/BN; 3, 4 — TiC/TiNi.

Цель экспериментальных исследований — определение режима отражения УВ при различных углах падения на поверхность преграды. Использовались два метода регистрации ударно-волновых конфигураций в исследуемом веществе: импульсное рентгенографирование и оптическая регистрация свечения, возникающего при выходе УВ на свободную поверхность. Метод импульсного рентгенографирования применялся для определения режимов отражения УВ при их симметричном столкновении. Возникающее при этом течение в силу симметрии задачи эквивалентно отражению одной УВ от абсолютно жесткой преграды, расположенной в плоскости симметрии. Подробное описание метода приведено в [2].

В случае нерегулярного режима отражения на снимках фиксировалась маховская УВ (рис. 4, а). При углах столкновения, близких к критическому значению, размер маховской УВ уменьшался и она становилась трудноразличимой на снимках. В таких экспериментах для уточнения режима отражения в исследуемом материале размещались цилиндрические мишени ϕ , изготовленные из стали или латуни. При нерегулярных режимах на мишенях оставались отпечатки в виде углубления (рис. 4, б). Возникновение отпечатка обусловлено наличием высокоскоростного потока за фронтом маховской УВ.

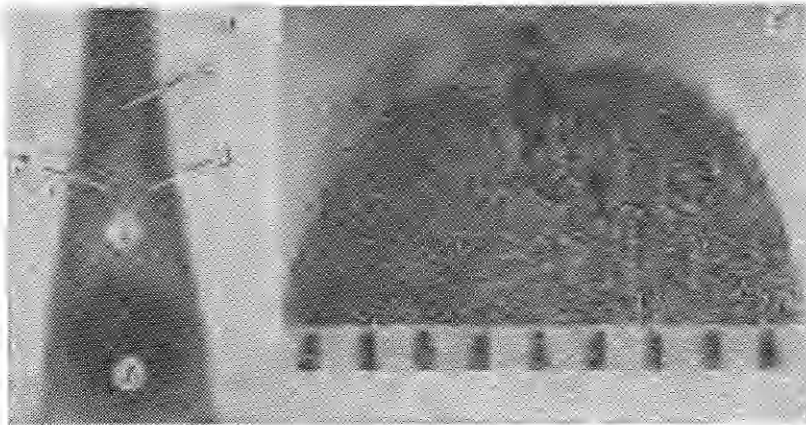


Рис. 4. Рентгеновская фотография нерегулярного режима отражения УВ (а) и фотография мишени после взаимодействия с маховской УВ (б).
1 — мишень; 2 — невозмущенное вещество; 3 — фронты падающих УВ; 4 — фронт маховской УВ.

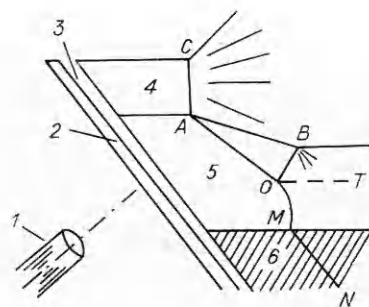


Рис. 5. Схема экспериментов по оптической регистрации режимов отражения УВ от стальной преграды. 1 — СФР; 2 — пластина из плексигласа; 3 — зазор, заполненный аргоном; 4 — заряд ВВ; 5 — исследуемое вещество; 6 — стальная преграда.

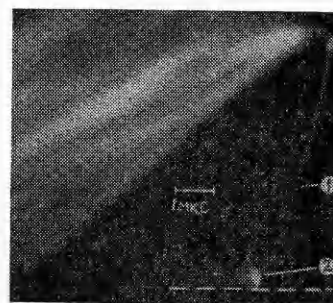


Рис. 6. Фотохронограмма нерегулярного режима УВ. 1, 2 — области свечений, вызванных падающей и маховской УВ соответственно.

Ударно-волновые параметры рассчитывались с помощью законов сохранения на фронте УВ по измеренным в эксперименте углам падения УВ на преграду и отклонения потока во фронте УВ, а также скорости распространения точки ветвления УВ по поверхности преграды.

Метод оптической регистрации применялся для определения режимов отражения УВ от стальной преграды. Схема экспериментов приведена на рис. 5. На массивной стальной плите размещался слой исследуемого вещества, на поверхности которого располагался заряд взрывчатого вещества. Заряд инициировали с одного из торцов так, чтобы скользящая детонационная волна генерировала в исследуемом веществе косую УВ. С противоположного торца вещество и преграда прикрывались алюминиевой фольгой (на рисунке не обозначена) и пластиной из плексигласа. Между плексигласом и фольгой оставался зазор, который заполнялся аргоном.

Когда ударно-волновая конфигурация выходила на торец экспериментальной сборки, возникало кратковременное высвечивание аргона, находящегося в зазоре. Прекращение свечения вызывалось диспергированием плексигласа в УВ. Свечение регистрировали на СФР в режиме фоторазвертки при скорости движения луча по пленке $3 \cdot 10^3$ м/с. Фотохронограмма позволяет выявить профиль УВ и по известной скорости детонации заряда ВВ вычислить скорость распространения УВ, ее амплитуду и угол падения на поверхность преграды. На рис. 6 приведена фотохронограмма нерегулярного режима отражения. Направление развертки слева направо, штриховой линией обозначено положение отражающей поверхности.

Для увеличения разрешающей способности метода торец экспериментальной сборки располагали наклонно к отражающей поверхности преграды и в эксперименте ориентировали перпендикулярно оси СФР. Из геометрических соображений ясно, что проекция фронта маховской УВ на торец сборки обратно пропорциональна синусу угла между отражающей поверхностью и торцом. В настоящих экспериментах угол составлял $30-20^\circ$, что позволяло получить увеличение проекции фронта маховской УВ в 2—3 раза.

Результаты экспериментов приведены на рис. 2. Регулярные режимы отражения УВ обозначены светлыми точками, нерегулярные — темными. Прямоугольники относятся к отражению от абсолютно жесткой преграды, треугольники — от стальной. Значения критических углов φ^* заключены между двумя ближайшими углами падения, для которых уверенно регистрируются регулярный и нерегулярный режимы отражения. Если принять, что величина φ^* равна среднему арифметическому этих двух углов, то расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превысит 25 %.

При углах падения, близких к критическому, размер маховской УВ настолько мал, что возникают значительные трудности в ее регистрации. Это дает основание полагать, что в пределах указанного диапазона величина φ^* лежит ближе к границе, отвечающей регулярному отражению. Учитывая этот факт, а также принимая во внимание, что абсолютные значения φ^* невелики, можно считать соответствие между расчетными и экспериментальными данными удовлетворительным.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает, что приближенный метод [5] позволяет удовлетворительно предсказывать значения критических углов отражения УВ в ПКМ как в случае отсутствия эффекта расслоения, так и при его наличии. Для смесей первого типа результат не является неожиданным, так как они допускают модельное представление в односкоростном приближении и, кроме того, позволяют пренебречь эффектами, связанными с их гетерогенной структурой, поскольку характерный размер задачи много больше размера неоднородностей среды.

В случае расслаивающихся смесей результат не столь очевиден. Он в значительной мере обусловлен инерционной природой расслоения ПКМ при ударном нагружении и сверхзвуковым характером течения за фронтом отраженной УВ. Первое позволяет пренебречь эффектом расслоения в окрестности точки ветвления УВ, второе исключает влияние на режим отражения возмущений, возникающих в результате торможения расслоившегося потока о поверхность преграды далеко за точкой ветвления.

Значения ρ_2^* и p_2^* экспериментально не регистрировались. Учитывая, что в исследованном диапазоне параметров нагружения зависимость $\rho_2(\varphi)$ носит пропорциональный характер, можно ожидать, что точность определения ρ_2^* и φ^* одинакова. Точность вычисления p_2^* определяется точностью построения адиабаты двукратного сжатия. Важно отметить, что в случае расслаивающихся ПКМ расчетные значения ρ_2^* и p_2^* имеют смысл лишь в окрестности точки ветвления. Радиус окрестности зависит от величины скоростной неравновесности разнородных частиц за фронтом УВ и величины сил межчастичного взаимодействия, но не меньше s .

Еще один важный момент — допущение об отсутствии химических реакций между компонентами, т. е. предполагается, что ПКМ сохраняет постоянный состав при многократном ударном нагружении. В случае реагирующих систем это предположение может привести к существенным ошибкам в определении критических параметров отражения, о чем свидетельствуют результаты исследований по наклонному отражению детонационных волн в смесевом аммиачно-селитренном ВВ [25].

Авторы выражают признательность Т. М. Платовой и Р. А. Кректулевой за полезные советы по определению динамической сжимаемости нихрома, И. В. Мочалову за участие в численных расчетах и А. С. Старостиной за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтшулер Л. В., Кормер С. В. и др. ЖЭТФ, 1961, 41, 511, 1382.
2. Костюков Н. А. ПМТФ, 1977, 3, 124.
3. James R. M., Moore P. W. J., Lambourn B. D. // 6th Symp. (Intern.) on Detonation.— California, 1976.
4. Костюков Н. А. // Динамика сплошной среды.— Новосибирск, 1977.— Вып. 29.— С. 54.
5. Костюков Н. А. ФГВ, 1987, 23, 5, 72.
6. Дерibas А. А., Нестеренко В. Ф., Ставер А. М. // Обработка металлов взрывом: Тр. III Междунар. симп.— Марианске Лазне, 1976.
7. Соболев В. В. Письма в ЖТФ, 1984, 10, 8, 459.
8. Костюков Н. А. ПМТФ, 1988, 3.
9. Рахматулин Х. А. ПММ, 1956, 20, 2, 184.
10. Баженова Г. В., Гвоздева Л. Г. и др. // Нестационарные взаимодействия ударных и детонационных волн в газах.— М.: Наука, 1986.
11. Мальцев М. В., Барсукова Т. А., Борин Ф. А. // Металлография цветных металлов и сплавов.— М.: Металлургиздат, 1980.

12. Кректулева Р. А., Платова Т. М. // Детонация: Материалы II Всесоюз. совещания по детонации.— Черногоровка, 1981.
13. Корнилов И. И., Белоусов О. К., Качур Е. В. // Никелид титана и другие сплавы с эффектом «памяти» формы.— М.: Наука, 1977.
14. Matsumoto H., Kondo K., Doni S. J. Mater. Sci., 1987, 22.
15. Compendium of shock wave data. Univ. of California, UCRL-50108, 1, Sec. A-2, 1967.
16. Thovenin J. // 4th Symp. (Intern.) on Detonation.— White Oak, 1965.
17. Капель Г. П., Питюнин А. Н. ФГВ, 1984, 20, 4, 85.
18. Дремин А. П., Карпунин И. А. ПМТФ, 1960, 3, 184.
19. Николаевский В. Н. ПМТФ, 1969, 3, 82.
20. Богачев Г. А. Изв. АН СССР. МЖГ, 1976, 4, 113.
21. Алексеев Ю. Ф., Альтшулер Л. В., Крупникова В. П. ПМТФ, 1971, 4, 152.
22. Афанасенков А. Н., Богомолов В. М., Воскобойников И. М. ПМТФ, 1969, 4, 137.
23. Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф., Демченко И. Г. ПМТФ, 1986, 4, 91.
24. Маккуин Р., Марш С. и др. // Высокоскоростные ударные явления.— М.: Мир, 1973.
25. Дерибас А. А., Костюков Н. А., Ставер А. М. ФГВ, 1975, 11, 3, 456.

Поступила в редакцию 2/II 1988

УДК 539.63

СКОРОСТИ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В АЛЮМИНИИ

А. Ю. Долгобородов, И. М. Воскобойников
(Москва)

Для изучения прочностных свойств веществ при высоких давлениях и описания затухания ударных волн (УВ) большой интерес представляют исследования структуры волн разрежения и определение скоростей волновых возмущений в ударно-сжатых материалах. Принято считать (см., например, [1]), что в сплошном твердом веществе волна разгрузки расщепляется на упругую и пластическую, причем фронт волны распространяется с продольной скоростью звука c_l , зависящей от упругих свойств материала, а параметры состояния в основном изменяются в пластической волне, скорость которой определяется только объемной сжимаемостью вещества. Поскольку имеющиеся сведения о прочностных свойствах материалов и уравнении состояния конденсированных сред различного состава, о строении и начальной структуре при динамических давлениях в десятки и более гигапаскалей недостаточны для развития надежных прогнозирующих схем, то актуально проведение экспериментальных исследований скоростей волновых возмущений за ударными фронтами для наиболее типичных объектов.

Для определения скоростей волн разрежения в ударно-сжатых материалах применялись разнообразные методики: от оптической регистрации моментов прихода в некоторую точку сечения образца боковой волны разгрузки и измерения скоростей откольных пластин с торцевых поверхностей образцов разной толщины до помещения в образец тех или иных датчиков (манганиновых, электромагнитных и др. [2—5]). Использование датчиков часто ограничивает временное разрешение регистрации и объекты исследования (затруднительно применение электромагнитных датчиков в проводящих средах или манганиновых датчиков в тех же средах без изолирующих прокладок) и эффективно только при плоских ударных фронтах на значительной площади сечения образца. В этом отношении более перспективны оптические методы, среди которых выделим основанные на регистрации отражения света от контактной границы исследуемого образца с прозрачной средой (различные интерференционные методики) и регистрирующие яркости собственного свечения ударных фронтов в индикаторных средах, контактирующих с торцом исследуемого образца.