

УДК 535.854

## ОДНОВРЕМЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ГЕТЕРОДИН-ИНТЕРФЕРОМЕТРА И ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПЫЛЕВОГО ПОТОКА

Д. А. Калашников<sup>1</sup>, С. В. Ерунов<sup>2</sup>, С. А. Финюшин<sup>1</sup>, А. В. Фёдоров<sup>1</sup>,  
Е. А. Чудаков<sup>2</sup>, Е. А. Разумков<sup>1</sup>, Л. В. Чернов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,  
603155 Нижний Новгород

Рассмотрена схема регистрации перемещений отражающих поверхностей методом лазерного дальномера с использованием разработанного устройства измерения задержки распространения оптического сигнала. Приведены результаты тестовых экспериментов по исследованию параметров пыления и откольного разрушения металлов при их ударно-волновом нагружении с одновременным использованием методов гетеродин-интерферометра и лазерного дальномера.

Ключевые слова: лазерный дальномер, гетеродин-интерферометр, совмещенная диагностика, ударно-индуцированное пыление, откольное разрушение.

DOI 10.15372/FGV2023.9359  
EDN FGGLYV

### ВВЕДЕНИЕ

Лазерные доплеровские измерители скорости, основанные на методе гетеродин-интерферометра (PDV) [1], позволяют в непрерывном режиме регистрировать скорость отражающих объектов, попадающих в пятно луча зондирования [2–4]. При этом величина перемещения исследуемых поверхностей рассчитывается путем интегрирования экспериментальных зависимостей скорости от времени. Однако указанный способ определения координат движущихся объектов является косвенным и зачастую бывает неприменим. Для интегрирования необходимо наличие однозначной непрерывной зависимости скорости от времени, которую в ряде случаев получить невозможно. Так, в отсутствие четко выраженной границы раздела сред из-за процессов развития неустойчивостей [5–8] и, как следствие, выброса микрокумулятивных струй, разрушения и дробления материала в волнах разрежения с последующим диспергированием, методом PDV регистрируется спектр скоростей частиц и фрагментов материала, и запись носит дискретный характер. Неопреде-

ленность в данных гетеродин-интерферометра также может быть обусловлена попаданием в поле зондирования датчика движущихся объектов по мере развития регистрируемого процесса. Для этих объектов отсутствует привязка по пространственному положению, и операция интегрирования в целях получения зависимости  $x-t$  окажется неприменимой. Кроме того, следует учитывать накопление ошибки в результате применения операции интегрирования, которая при увеличении длительности регистрируемых процессов может стать значительной. Наконец, в ряде случаев информация, полученная методом PDV, оказывается недостоверной. Как известно, гетеродин-интерферометр позволяет корректно измерять только одну компоненту скорости — вдоль оси установки датчика [9], в то время как истинное направление движения исследуемой поверхности может оставаться неизвестным или изменяться с течением времени, как это реализуется в ряде экспериментальных постановок. Обойти указанные ограничения можно с помощью метода лазерного дальномера [10, 11] посредством прямой регистрации в опыте величины перемещения отражающих поверхностей.

## 1. ЛАЗЕРНЫЙ ДАЛЬНОМЕР

Принцип измерения перемещения отражающей поверхности посредством лазерного дальномера основан на регистрации интерференционного сигнала, получаемого с помощью волоконного интерферометра Майкельсона и дисперсионного элемента, с последующим нахождением частоты биений посредством программно-математической обработки. Источником подсветки мишени является волоконный импульсный сверхширокополосный лазер. После прохождения очередным импульсом интерферометра Майкельсона, в одном из плеч которого расположен исследуемый объект, на выходе формируются два импульса, смещенные друг относительно друга по времени на величину, пропорциональную разнице оптических длин плеч интерферометра и, соответственно, расстоянию до образца. С помощью дисперсионного элемента длиной  $L$  [км] соответствующие импульсы хроматически уширяются во времени и приобретают частотную модуляцию. В результате уширения импульсов на фотодетекторе возникает интерференционный сигнал с частотой, пропорциональной сдвигу импульсов во времени. При движении отражающей поверхности изменяется оптическая длина сигнального плеча интерферометра, меняется величина сдвига импульсов друг относительно друга и, соответственно, частота интерференционного сигнала. Искомая частота

(которой соответствует максимальное значение спектральной амплитуды сигнала) находится с помощью оконного преобразования Фурье. Перемещение далее определяется по следующей формуле:

$$x = f \frac{\lambda^2 D L}{2}, \quad (1)$$

где  $f$  — частота интерференционного сигнала,  $\lambda$  — центральная длина волны зондирующего излучения,  $D$  — дисперсионная характеристика волокна (для применяемого волокна типа Corning SMF-28  $D \approx 17$  пс/нм/км).

Схема лазерного дальномера, разработанная и применяемая авторами с 2015 г. [12, 13], представлена на рис. 1.

В качестве источника зондирующего излучения используется импульсный фемтосекундный волоконный лазер с длиной волны излучения  $\lambda = 1550$  нм и средней выходной мощностью 200 мВт. Лазерный импульс на выходе из апертуры попадает в волоконный интерферометр Майкельсона, в котором разделяется на два пучка с помощью волоконного делителя. Один из пучков используется как опорный, а второй, сигнальный, направляется через волоконную линию (патчкорд, циркулятор, коллиматор) непосредственно на мишень, отражается от нее и вновь с помощью того же коллиматора собирается и попадает обратно в интерферометр. Отраженный сигнал

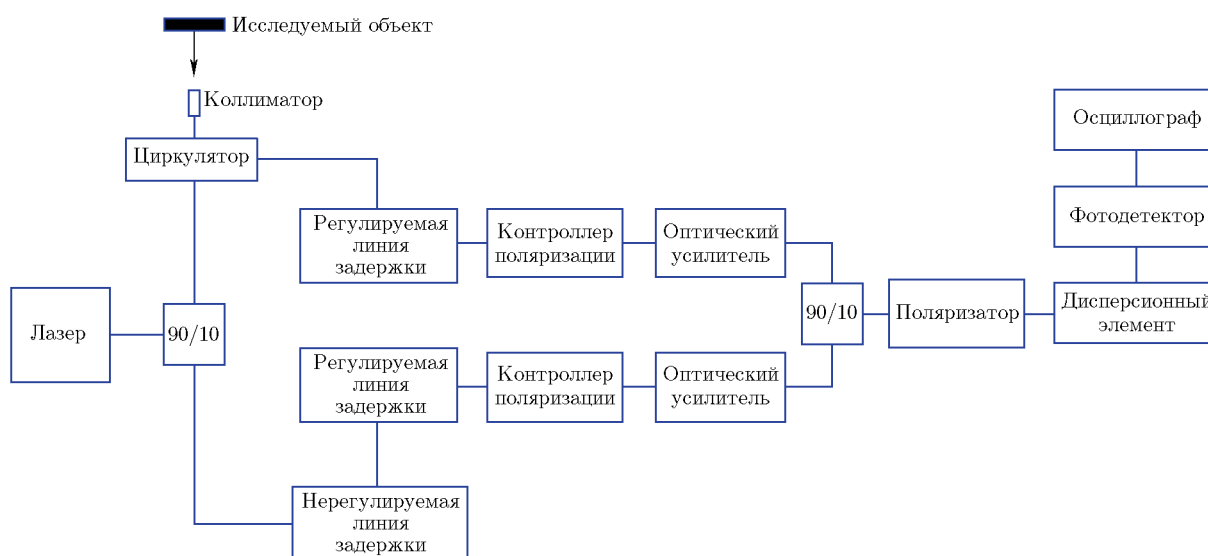


Рис. 1. Принципиальная схема лазерного дальномера

усиливается с помощью эрбиевого усилителя и суммируется с опорным сигналом. Далее, проходя через дисперсионный элемент (бухта волокна Corning SMF-28 длиной 25 км), излучение передается на фотодетектор, где интерференционный оптический сигнал преобразуется в электрический, который затем регистрируется с помощью широкополосного осциллографа. Максимальная база регистрации с помощью данной оптической схемы лазерного дальнометра составляет 22 мм. Погрешность измерений относительных перемещений не превышает  $\pm 1.62\%$ .

Разработанный алгоритм обработки данных лазерного дальнометра выполняет преобразование Фурье на окнах конечной длительности, последовательно формируемых из массива зарегистрированных мгновенных значений сигнала в интервале времени, выбираемом пользователем в рамках диапазона регистрации. Влияние нелинейности дисперсии третьего порядка на данные лазерного дальнометра [14] компенсируется с помощью следующего программного решения. Для корректной обработки данных необходимо найти лишь положение максимума распределения, соответствующего интервалу частот, несущему наибольшую энергию сигнала. Это реализуется посредством использования оконных функций для отсекаания низкоэнергетических хвостов сигнала. Для этого выборки сигнала умножаются поэлементно на оконную функцию гауссовской формы. Форму оконной функции, а соответственно и область сигнала, вносящего вклад в спектральное распределение мощности, оператор изменяет за счет вариации непосредственно коэффициента оконной функции.

Наиболее трудоемкой и затратной по времени операцией при выполнении измерений по представленной выше схеме является предварительная настройка лазерного дальнометра. Задача заключается в обеспечении условий формирования устойчивого интерференционного сигнала и сводится к необходимости выравнивания длин сигнального и опорного плеч интерферометра с точностью до половины максимальной базы регистрации, а следовательно, к потребности в прецизионных измерениях длины соответствующих оптических трактов. В самом доступном варианте она решается с использованием штриховых мер длины и оптических рефлектометров путем итерационного подбора, однако при этом процесс может за-

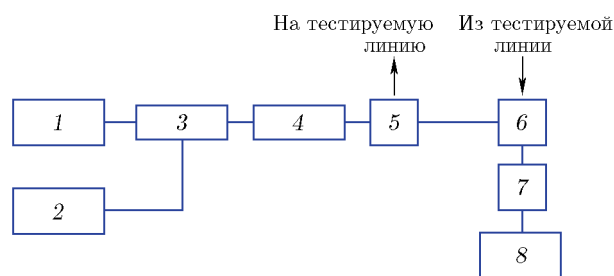


Рис. 2. Схема устройства измерения задержки распространения оптического сигнала:

1, 2 — лазеры; 3 — волоконный затвор 1, соединенный с лазером; 4 — волоконный затвор 2, соединенный с волоконным затвором 1; 5, 6 — делитель 90/10; 7 — высокочастотный фотодетектор; 8 — широкополосный осциллограф

нимать значительное время. Альтернативным способом является применение специализированных систем рефлектометрии с точностью измерений до сотен микрон [15], однако подобные приборы труднодоступны ввиду их высокой стоимости и ограниченного числа производителей. С учетом этого авторами разработано и запатентовано устройство измерения задержки распространения оптического сигнала [16], которое за счет программного корреляционного анализа двух наборов данных, полученных с помощью пары фемтосекундных лазеров с различным периодом повторения импульсов, позволяет проводить прецизионные измерения временной задержки распространения оптического сигнала в волоконных линиях протяженностью более 2000 м и получать значения их длины с точностью до 0.02 м. Общая схема работы устройства представлена на рис. 2.

Излучение двух импульсных фемтосекундных инфракрасных сверхширокополосных лазеров, различающихся периодом повторения импульсов, поочередно подается на два последовательно подключенных волоконных затвора для формирования короткого цуга импульсов. С помощью двух оптических делителей 90/10 осуществляется перенаправление зондирующего излучения в тестируемую волоконную линию, а также прием излучения из нее. Данные регистрируются широкополосным осциллографом и высокочастотным фотодетектором. После этого выполняется математическая обработка регистрограмм. К двум массивам данных, соответствующим каждой из пары лазерных установок, применяется операция автокорреляции. Далее два результирующих набо-

ра значений поэлементно умножаются друг на друга, и по максимуму итоговой функции определяются искомые характеристики волоконной линии. Использование описанного устройства позволяет значительно упростить и сократить по времени предварительную настройку схемы лазерного дальномера.

## 2. ПОСТАНОВКА И РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Совмещенная диагностика с помощью методов гетеродин-интерферометра и лазерного дальномера использовалась в серии опытов по регистрации параметров пыления и откольно-го разрушения образцов из стали, меди и свинца в условиях ударно-волнового нагружения. Нагружение лайнеров  $\varnothing 90 \times 2$  мм осуществлялось с помощью шашек из пластифицированного тэна  $\varnothing 15 \times 2$  мм и пластифицированного октогена  $\varnothing 15 \times 10$  мм. На расстоянии 34 мм от свободной поверхности размещался измерительный приемник с двумя коллиматорами, установленными на радиусе 5 мм от центра сборки. По одному из коллиматоров регистрировалось перемещение свободной поверхности образца (лазерный дальномер), по второму — скорость ее движения (метод PDV).

Предварительно для приведенной постановки экспериментов было выполнено двумерное численное моделирование. В расчетах уравнение состояния (УРС) металлов задавалось в форме Ми — Грюнайзена с постоянным параметром Грюнайзена [17, 18]. В табл. 1 представлены параметры выбранных моделей:  $\rho_0$  — начальная плотность материала,  $c_0$  — объемная скорость звука,  $s_1$  — коэффициент в линейном соотношении  $DU$ ,  $\Gamma$  — коэффициент Ми — Грюнайзена.

При моделировании использовались данные близких пластифицированных составов тэна (ХТХ8003) и октогена (LX-10-1). Соответствующие параметры моделей приведены

Таблица 1

Параметры УРС «Shock»

Образец	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$c_0$ , км/с	$s_1$	$\Gamma$
Нержавеющая сталь	7.86	4.61	1.73	1.67
Медь	8.9	3.958	1.497	2
Свинец	11.34	2.006	1.429	2.74

в табл. 2:  $\rho_0$  — начальная плотность материала;  $A, B, \omega, R_1, R_2$  — набор эмпирических констант для уравнения состояния JWL [19, 20];  $D_{CJ}$  — скорость детонации в точке Чепмена — Жуге;  $E_{CJ}$  — внутренняя энергия в точке Чепмена — Жуге;  $P_{CJ}$  — давление в точке Чепмена — Жуге. Инициирование заряда тэна электродетонатором задавалось равномерным пятном по радиусу 2.5 мм.

Полученные расчетные диаграммы разрушения образцов радиусом  $R$  из стали, меди и свинца показаны на рис. 3–5. Представленные данные соответствуют состоянию лайнеров в указанные моменты времени. Здесь и далее время для расчетных данных отсчитывается от момента выхода ударной волны на свободную поверхность образца.

Как следует из приведенных расчетных диаграмм, отражение ударной волны от свободной поверхности металлических образцов обуславливает множественный откол в материале, при этом, так как диаметр шашек взрывчатого вещества мал по сравнению с диаметром исследуемого лайнера (см. рис. 3), откольные явления начинают развиваться лишь в его центральной области. Таким образом, разгруженные периферийные участки образца препятствуют полному отрыву материала, растягивая и тормозя центральную область. После окончательного отрыва первого откольного слоя центральная часть образца испытывает ускорение, в то же время периферийные области лайнера резко замедляются. При этом на

Таблица 2

Параметры УРС JWL

ВВ	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$A$ , ГПа	$B$ , ГПа	$\omega$	$R_1$	$R_2$	$D_{CJ}$ , км/с	$E_{CJ}$ , Дж/мм <sup>3</sup>	$P_{CJ}$ , ГПа
LX-10-1	1.865	880.7	18.36	0.38	4.62	1.32	8.82	10.4	37.5
ХТХ-8003	1.54	2 714	17.93	0.35	7	1.6	7.35	6.6	17

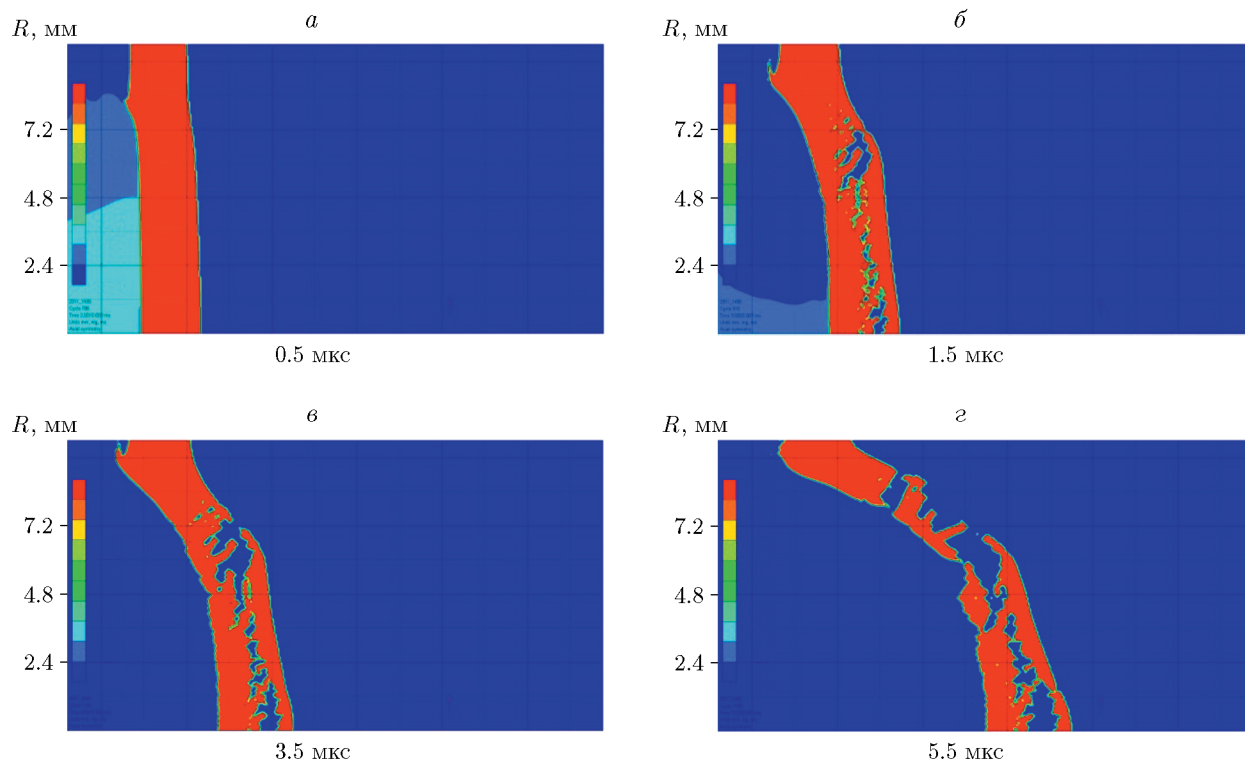


Рис. 3. Расчетное моделирование процесса разрушения образца из стали

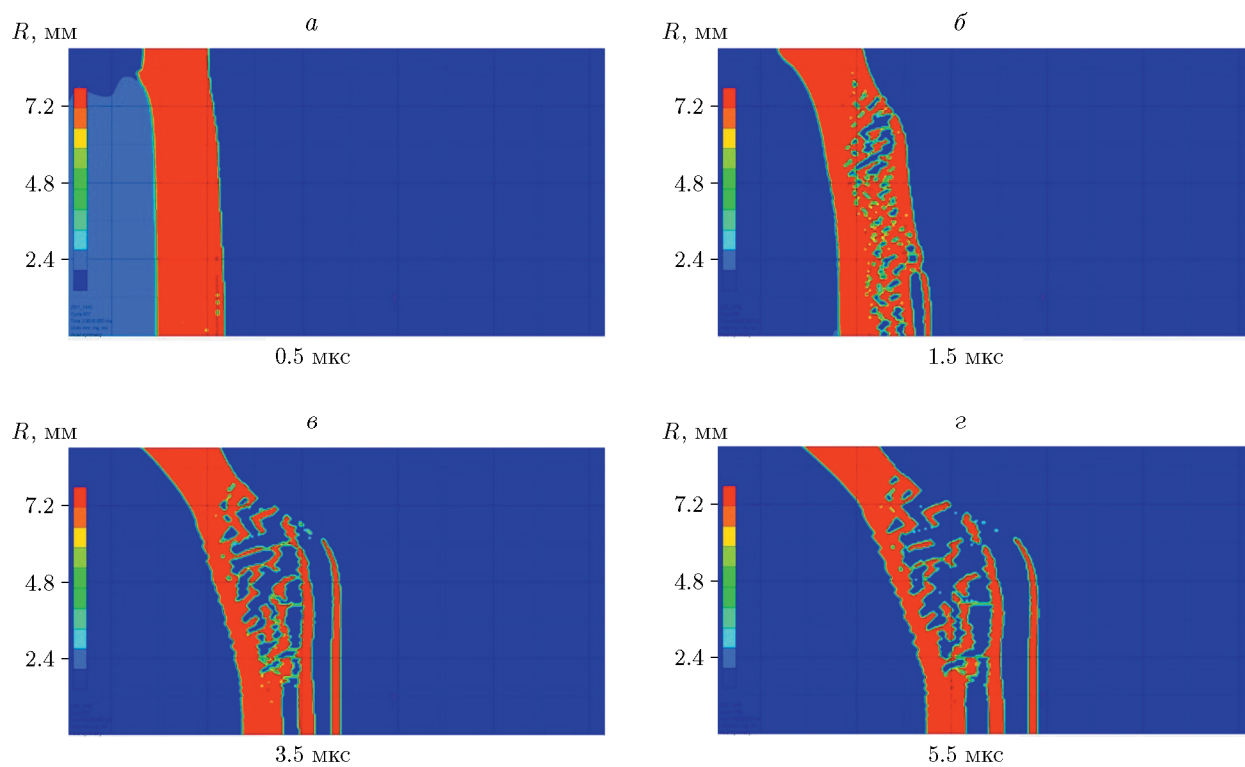


Рис. 4. Расчетное моделирование процесса разрушения образца из меди

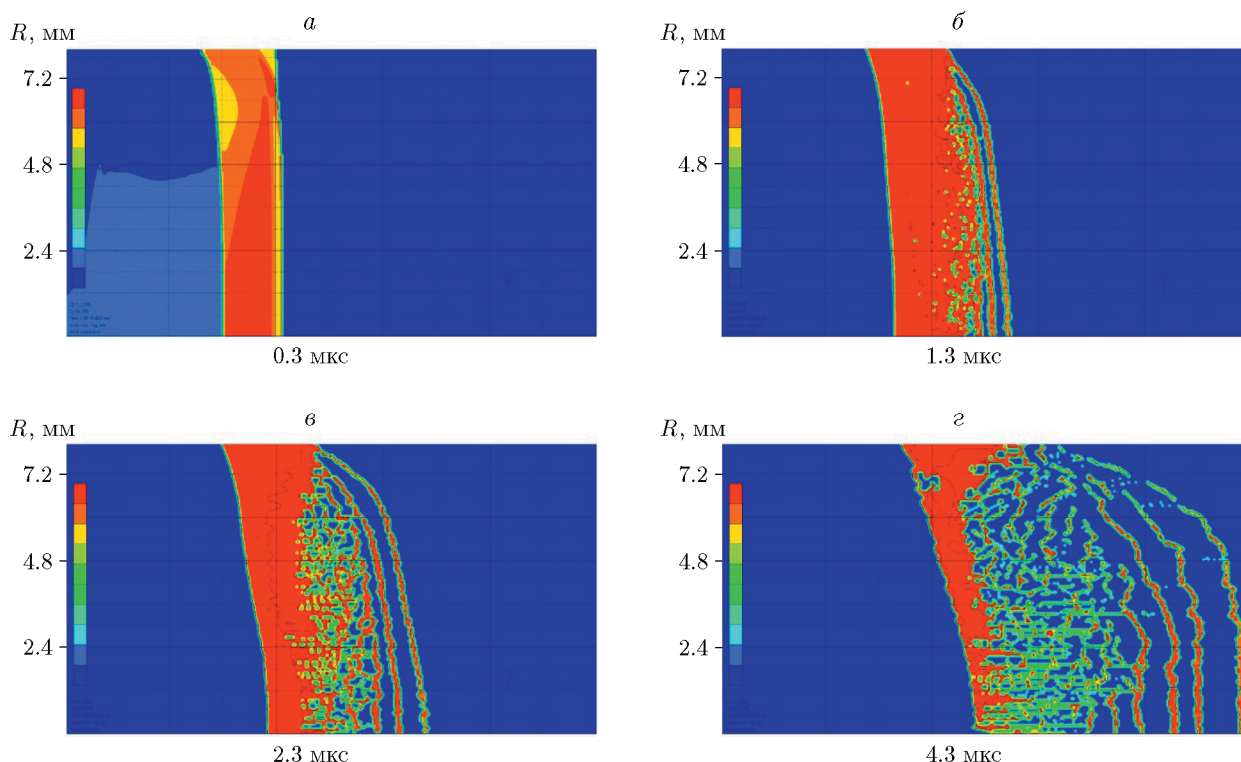


Рис. 5. Расчетное моделирование процесса разрушения образца из свинца

границе образовавшегося таким образом разрыва формируется множество фрагментов разрушенного материала. Оптические датчики в экспериментах ориентированы в область, близкую к указанному разрыву, что с учетом изложенного выше позволяет регистрировать большое количество объектов, движущихся с различной скоростью.

Для моделирования откольного течения использовался критерий мгновенного разрушения, в соответствии с которым откольное разрушение происходит при достижении известных критических значений растягивающего напряжения [21].

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проведено три эксперимента с образцами из стали 20 (толщина 2 мм, шероховатость поверхности  $R_z$  10), меди М1 (толщина 2 мм, шероховатость поверхности  $R_z$  10) и свинца С1 (толщина 2 мм, шероховатость поверхности  $R_a$  0.63).

#### 3.1. Стальной образец

В эксперименте со стальным образцом  $\varnothing 90 \times 2$  мм на спектрограмме перемещения (рис. 6) наблюдается движение свободной поверхности с соответствующей средней скоростью  $W \approx 1.12$  км/с (давление нагружения  $P = 23.6$  ГПа, скорость детонации  $D = 5.4$  км/с).

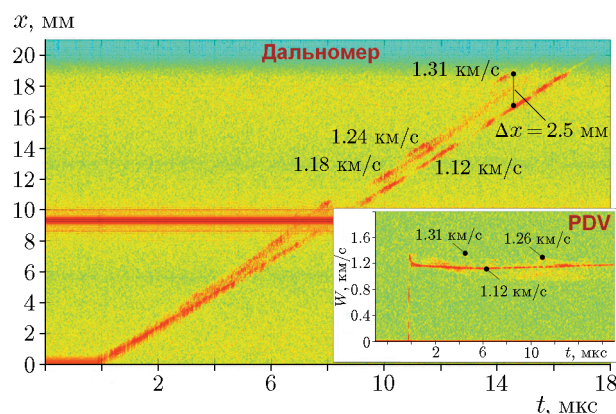


Рис. 6. Результаты опыта со стальным образцом



Также с помощью лазерного дальномера регистрируется несколько треков (линия подобных сигналов) со скоростью  $W \approx 1.12 \div 1.31$  км/с. По всей видимости, эти треки соответствуют движению отдельных фрагментов материала, максимальное удаление которых от свободной поверхности достигает  $\Delta x \approx 2.5$  мм. Длительность регистрации с помощью лазерного дальномера составила порядка 16 мкс, смещение свободной поверхности на момент обрыва записи достигает 18.5 мм.

На спектрограмме скорости (рис. 6, врезка) методом PDV зарегистрированы откольный импульс и движение откольного слоя со скоростью  $W = 1.12$  км/с, а также движение нескольких фрагментов образца со скоростью  $1.26 \div 1.31$  км/с. Отмечается хорошее согласие данных, полученных двумя методами. Толщина откольного слоя и откольная прочность стали, рассчитанные по известным соотношениям, составили 0.6 мм и 2.43 ГПа соответственно.

### 3.2. Медный образец

Спектрограммы перемещения и скорости, зарегистрированные в опыте с медным образцом (рис. 7), представляют собой сложную картину, обусловленную отражением лазерного излучения от значительного числа движущихся фрагментов. В работе [22] описан высокоскоростной процесс проникания медных шариков через отверстие меньшего размера в стальной пластине, в частности, показано, что при этом происходят растяжение и пластическая деформация медной струи с ее последующим разрывом и образованием фрагментов материала. Можно предположить, что в настоящей работе реализовался аналогичный механизм формиро-

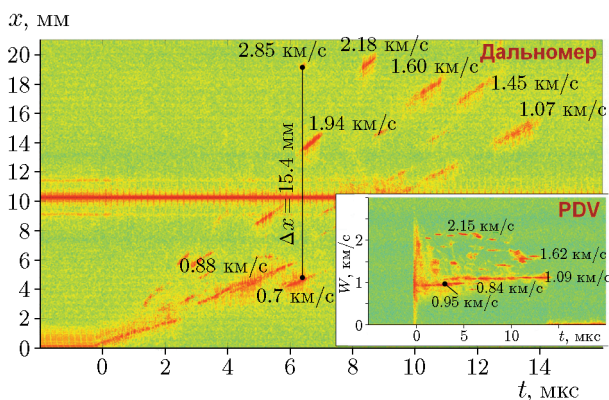


Рис. 7. Результаты опыта с медным образцом

вания медных фрагментов вследствие пластической деформации канавок на шероховатой поверхности исследуемого образца ( $R_z 10$ ).

На спектрограмме перемещения регистрируется движение множества отдельных фрагментов ( $W = 0.7 \div 2.85$  км/с). Длительность записи лазерного дальномера в опыте составила  $\approx 14$  мкс, максимальное зарегистрированное смещение достигает 20 мм. Из графического материала, показанного на рис. 7, следует, что данные лазерного дальномера позволяют оценивать расстояние между отдельными движущимися фрагментами разрушенного материала в различные моменты времени. Так, например, в данном опыте предельное смещение выбрасываемых частиц меди относительно свободной поверхности составило  $\Delta x \approx 15.4$  мм. На врезке с PDV-спектрограммой максимальная скорость фрагментов достигает  $W \approx 2.15$  км/с, на отдельных участках записи также регистрируется множество треков скорости со значениями  $W = 0.84 \div 2.15$  км/с.

### 3.3. Свинцовый образец

На спектрограммах скорости и перемещения, полученных в опыте со свинцовым образцом (рис. 8), в течение 16 мкс регистрируются исключительно спектр скоростей и спектр перемещений пылевого потока соответственно. Треки скоростей частиц, а также скорость свободной поверхности образца отсутствуют. Это может быть связано с тем, что при давлениях нагружения, реализовавшихся в опыте, свинец после ударно-волнового нагружения практически полностью теряет свою прочность и плавится на волне разгрузки, что приводит к ин-

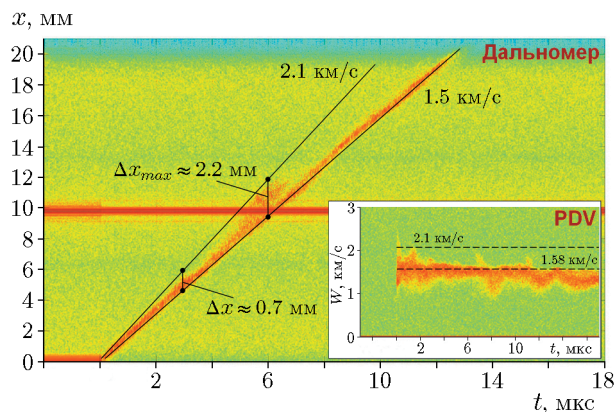


Рис. 8. Результаты опыта со свинцовым образцом

тенсивному выбросу жидких частиц с его поверхности. Данный поток частиц препятствует прониканию лазерного излучения и не позволяет регистрировать скорости нижележащих слоев, в том числе скорость свободной поверхности. Тем не менее информация, полученная с помощью лазерного дальномера, включает в себя полностью записанную  $x$ - $t$ -диаграмму движения фронта пылевого потока. Средняя скорость частиц в потоке составила  $\approx 1.5$  км/с, максимальная — порядка 2.1 км/с. Предельная просвеченная толщина пылевого слоя достигает 2.2 мм.

### ВЫВОДЫ

В работе рассмотрена схема регистрации перемещений отражающих поверхностей с использованием лазерного дальномера. Описано разработанное и запатентованное устройство измерения задержки распространения оптического сигнала, которое позволяет оперативно выполнять предварительную настройку интерферометра перемещений. Представлены данные двумерного численного моделирования и результаты тестовых экспериментов по одновременной лазерной диагностике скорости и перемещения свободной поверхности и пылевых потоков при ударно-волновом нагружении образцов из стали, меди и свинца. Продемонстрирована эффективность комбинированных измерений, показана согласованность данных, полученных с помощью двух методов.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках программы по созданию молодежных лабораторий (научная тема № FSWE-2024-0004 «Газодинамика и физика взрыва»).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Strand O. T., Goosman D. R., Martinez C., Whitworth T. L., Kuhlow W. W. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques // *Rev. Sci. Instrum.* — 2006. — V. 77. — 083108. — DOI: 10.1063/1.2336749.
2. Fedorov A. V., Mikhailov A. L., Finyushin S. A., Kalashnikov D. A., Chudakov E. A., Butusov E. I., Gnutov I. S. Registration of multiple spalls and structures of ejected particle clouds // *J. Dyn. Behavior Mater.* — 2017. — V. 3, N 2. — P. 203–207. — DOI: 10.1007/s40870-017-0108-4.
3. Федоров А. В., Гнутов И. С., Яговкин А. О. Определение размеров частиц, выброшенных с ударно-нагруженных поверхностей при их торможении в газовой среде // *ЖЭТФ.* — 2018. — Т. 153, № 1. — С. 92–99. — DOI: 10.7868/s004445101801008x. — EDN: YLWMDQ.
4. Андрияш А. В., Дьячков С. А., Жаховский В. В., Калашников Д. А., Кондратьев А. Н., Куратов С. Е., Михайлов А. Л., Rogozkin D. B., Федоров А. В., Финюшин С. А., Чудаков Е. А. Доплеровские гетеродинные измерения и моделирование выброса частиц с поверхности ударно-нагруженных образцов // *ЖЭТФ.* — 2020. — Т. 157, № 3. — С. 406–427. — DOI: 10.31857/S0044451020030037. — EDN: OMRATG.
5. Richtmyer R. D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids // *Commun. Pure Appl. Math.* — 1960. — V. 13, N 2. — P. 297–319. — DOI: 10.1002/cpa.3160130207.
6. Мешков Е. Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной // *Изв. АН СССР. МЖГ.* — 1969. — № 5. — С. 151–158.
7. Helmholtz H. L. F. Uber discontinuirlsh Flussigkeits-Bewegungen. *Monatsberichte Konigl // Preus. Akad. Wiss. Berlin.* — 1868. — P. 215–228.
8. Maskaly G. R., Stevens G. D., La Lone B. M., Turley W. D., Staska M. D., Najjar F. M., Hartsfield T. M. Non-Richtmyer–Meshkov instability ejecta production based on shallow bubble collapse // *J. Appl. Phys.* — 2023. — V. 133. — 025901. — DOI: 10.1063/5.0132256.
9. Briggs M. E., Moro E. A., Shinas M. A., McGrane S., Knierim D. Optical distance measurements to recover the material approach missed by optical velocimetry // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2014. — V. 500, N 14. — 142005. — DOI: 10.1088/1742-6596/500/14/142005.
10. Xia H., Zhang C. Ultrafast and Doppler-free femtosecond optical ranging based on dispersive frequency-modulated interferometry // *Opt. Express.* — 2010. — V. 18, N 5. — P. 4118–4129. — DOI: 10.1364/oe.18.004118.
11. La Lone B. M., Marshall B. R., Miller E. K., Stevens G. D., Turley W. D., Veaser L. R. Simultaneous broadband laser ranging and photonic Doppler velocimetry for dynamic compression experiments // *Rev. Sci. Instrum.* — 2015. — V. 86, N 2. — 023112. — DOI: 10.1063/1.4908306.



12. Калашников Д. А., Финюшин С. А., Федоров А. В., Чудаков Е. А., Гнутов И. С., Шмелев И. В., Разумков Е. А. Исследование свойств ударно-нагруженных металлов с помощью одновременной лазерной диагностики скорости и перемещения зондируемой поверхности // Материалы IX Междунар. конф. «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике». — 2020. — С. 183–194.
13. Финюшин С. А., Федоров А. В., Шмелев И. В., Чудаков Е. А., Калашников Д. А., Гнутов И. С., Разумков Е. А. Регистрация параметров ударно-индуцированного пылевого потока с помощью одновременного использования методов гетеродин-интерферометра и лазерного дальномера // Забобахинские научные чтения: сб. материалов XV Междунар. конф., 2021. — Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2021. — С. 35–43.
14. Kostinski N., Rhodes M. A., Catenacci J., Howard M., La Lone B. M., Younk P., Lodes A., Bennett C. V., Harding P. J. Broadband laser ranging: Signal analysis and interpretation // Proc. SPIE Photonics West. — 2017. — 10089. — DOI: 10.1117/12.2255679.
15. Burk M. Quality Assurance «LUNA» Tool for Many Point Experiments // PDV Workshop Material, 2014.
16. Пат. № RU2775380. Устройство измерения задержки распространения оптического сигнала в среде / Финюшин С. А., Федоров А. В., Чудаков Е. А., Калашников Д. А., Разумков Е. А., Шмелев И. В. — Заявл. 15.09.2021; опубл. 30.06.2022, Бюл. № 19.
17. Yuan X., Wang W., Cao X., Zhang T., Xie R., Liu R. Numerical study on the interfacial behavior of Mg/Al plate in explosive/impact welding // Sci. Eng. Compos. Mater. — 2017. — V. 24, N 4. — P. 581–590. — DOI: 10.1515/secm-2015-0316.
18. Sun Z., Shi C., Shi H., Li F., Gao L., Wang G. Comparative study of energy distribution and interface morphology in parallel and double vertical explosive welding by numerical simulations and experiments // Mater. Design. — 2020. — V. 195, N 3. — 109027. — DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109027.
19. Валько В. В., Образ О. П., Гасилов В. А., Соловьева В. С., Савенко Н. О. Уравнения состояния продуктов детонации взрывчатых веществ. — М., 2021. — (Препр. / РАН. ИПП им. М. В. Келдыша; № 051). — DOI: 10.20948/prepr-2021-51.
20. Xie J. W., Wang H. F., Zheng Y. F., Geng B. Q., Ge C. Simulation study on the jet formation and penetration capability of hypervelocity double-layer liner shaped charges // J. Phys.: Conf. Ser. — 2020. — V. 1507. — 082022. — DOI: 10.1088/1742-6596/500/14/142005.
21. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортков В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. — М.: Янус-К, 1996.
22. Gray, III, G. T., Cerreta E., Yablinsky C. A., Addessio L. B., Henrie B. L., Sencer B. H., Burkett M., Maudlin P. J., Maloy S. A., Trujillo C. P., Lopez M. F. Influence of shock prestraining and grain size on the dynamic-tensile-extrusion response of copper: Experiments and simulation // AIP Conf. Proc. — 2006. — V. 845, N 1. — P. 725–728. — DOI: 10.1063/1.2263424.

*Поступила в редакцию 29.05.2023.  
После доработки 06.09.2023.  
Принята к публикации 08.11.2023.*