

УДК 539.3+539.4

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РАЗГОНУ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН С ДИАГНОСТИКОЙ ПРОЦЕССОВ ОДНОВРЕМЕННО ДВУМЯ ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИМИ МЕТОДИКАМИ

Е. А. Козлов, С. А. Бричиков, Д. П. Кучко, А. В. Ольховский,
М. А. Ральников, О. В. Ткачѐв

РФЯЦ, ВНИИ технической физики им. Е. И. Забабахина, 456770 Снежинск, e.a.kozlov@vniitf.ru

Представлены результаты экспериментов по безоткольному и откольному (со смыканием откола) метанию стальных пластин зарядами октогенсодержащего ВВ различной исходной толщины при наличии и отсутствии воздушного зазора между шашкой ВВ и метаемой пластиной. Динамику разгона пластины одновременно регистрировали двумя независимыми лазерно-интерферометрическими методиками, построенными по разным схемам с использованием лазеров с различными длинами волн. Опыты проводили в интересах метрологической аттестации новой лазерно-гетеродинной методики по данным ранее метрологически аттестованной лазерно-интерферометрической методики по схеме Фабри — Перо.

Ключевые слова: малогабаритное взрывное нагружающее устройство, метание пластин продуктами взрыва, лазерная интерферометрия по схеме Фабри — Перо, лазерно-гетеродинная методика (НЕТ-V или PDV), метрология.

ВВЕДЕНИЕ

Суть взаимной аттестации лазерно-интерферометрических методик и приборных комплексов, построенных по схеме Фабри — Перо [1–4] и гетеродинной схеме [5–10], заключается в одновременной в каждом эксперименте диагностике взрывных или ударно-волновых явлений обеими этими методиками.

Цели работы:

— получение экспериментального материала для метрологической аттестации двух лазерно-интерферометрических методик и измерительных комплексов, построенных по схемам Фабри — Перо и лазерно-гетеродинной (или НЕТ-V, или PDV);

— получение новых данных по откольному и безоткольному метанию пластин из нержавеющей стали 12X18H10T продуктами взрыва октогенсодержащего взрывчатого вещества (ВВ) с регистрацией временных профилей скорости свободной поверхности пластин одновременно двумя лазерно-интерферометрическими методиками с целью подтвердить отсутствие систематических погрешностей в измерениях каждой методикой;

— уточнение условий безоткольного мета-

ния пластины для создания высокоэффективных взрывных метательных устройств с минимальной массой ВВ с тротиловым эквивалентом (ТЭ) до $250 \div 300$ г, способных разогнать ударник из стали 12X18H10T (толщина $1 \div 3$ мм) до скорости $2.5 \div 4.5$ км/с и надежно локализовать продукты взрыва и изучаемое вещество, например в экспериментах на протонном ускорителе, при совмещении измерений методом многоканальной многоточечной лазерной интерферометрии и методом многокадровой однокурсной протонографии [11];

— получение систематических экспериментальных данных о влиянии воздушного зазора между ВВ и пластиной на особенности ее разгона для верификации и уточнения параметров моделей описания продуктов взрыва и материала метаемой пластины.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ВЗРЫВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследовали шлифованные пластины из стали 12X18H10T диаметром 50 мм и толщиной 1, 1.5, 3 мм. Неплоскостность и непараллельность поверхностей пластин не превышала 0.03 мм.

Пластины устанавливали в стальные оправы и разгоняли через воздушный зазор, равный $\Delta = 0, 1, 2, 3$ мм, продуктами взры-

Данные о постановке взрывных экспериментов

Номер опыта	Тип ВС, размеры шашки, условия инициирования	Ударник		Величина воздушного зазора Δ , мм
		толщина, мм	плотность, г/см ³	
1	ВС1 Ø60 × 20 мм ЛФС-60 ТЭ 237 г	1.01	7.89	0.96
2		2.98	7.89	0
3		1.5	7.89	0
4		2.98	7.91	1.97
5		2.99	7.89	1.02
6		1.52	7.71	1.99
7		1.51	7.87	2.97
8	ВС2 Ø60 × 30 мм ЛФС-60 ТЭ 289 г	0.92	7.88	0
9		0.98	7.88	1.95

Примечание. ВС1 и ВС2 — октогенсодержащие взрывчатые составы с несколько большим содержанием октогена в первом из них.

ва шашки размером Ø60 × 20 или Ø60 × 30 мм из октогенсодержащего взрывчатого состава (ВС). Шашку инициировали взрывным генератором плоской волны ЛФС-60 — взрывной линзой диаметром 60 мм с пенопластовой проставкой плотностью 0.60 ÷ 0.69 г/см³ и тарелью из ТГ 5/5 массой 95 г. Общий тротиловый эквивалент малогабаритных взрывных нагружающих устройств не превышал соответственно 250 и 300 г ТНТ.

При проведении экспериментов варьировали воздушный зазор и исходную толщину метаемой пластины. Данные о постановке опытов указаны в таблице.

Условия нагружения выбирали таким образом, чтобы в большей части экспериментов реализовать режим безоткольного метания стальной пластины, а в отдельных опытах — режим откольного метания со смыканием откола в процессе разгона.

Взрывные эксперименты с безоткольным метанием пластины осуществлены в интересах разработки экономичных малогабаритных взрывных нагружающих устройств для изучения динамических свойств материалов в локализирующих взрыв гермоконтейнерах при проведении исследований на протонном ускорителе У-70 Института физики высоких энер-

гий в Протвино. Контрольные взрывные эксперименты по откольному метанию пластин со смыканием отколов выполнены для уточнения условий и критериев отколообразования и калибровки расчетов по метанию пластин через воздушный зазор или смягчающую прокладку.

МЕТОДИКИ РЕГИСТРАЦИИ

В каждом эксперименте динамику разгона стальной пластины регистрировали двумя лазерно-интерферометрическими методиками, построенными по схеме Фабри — Перо [1–4] и гетеродинной [5–10] схеме (рис. 1, 2). В первой из них использовали импульсный рубиновый лазер с мощностью излучения 30 ÷ 100 Вт, длиной волны $\lambda = 694.3$ нм и спектральной шириной линии $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-3}$, во второй — непрерывный волоконный лазер с мощностью излучения 2 Вт, спектральной шириной 10 ÷ 15 кГц при $\lambda = 1550$ нм [8, 9].

Оптическая схема регистрации на базе интерферометров Фабри — Перо изображена на рис. 1. Опорное излучение, генерируемое лазером (1), подводится по оптоволокну (2) к из-

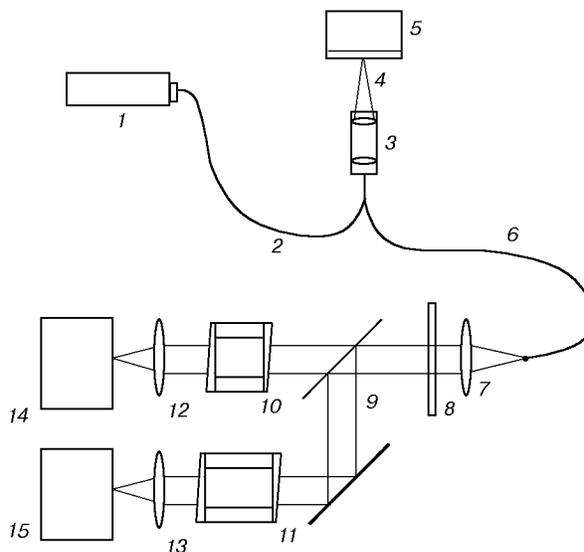


Рис. 1. Схема регистрации по методике ЛИМ-ФП:

1 — импульсный лазер, $\lambda = 694.3$ нм, 2, 6 — волоконно-оптический световод, 3 — оптическая головка, 4 — образец, 5 — заряд ВВ, 7 — линза, 8 — светофильтр, 9 — система зеркал, 10 — интерферометр Фабри — Перо с базой 25 мм, 11 — интерферометр Фабри — Перо с базой 50 или 80 мм, 12, 13 — линзы, 14, 15 — электронно-оптические регистраторы с ПЗС-матрицами

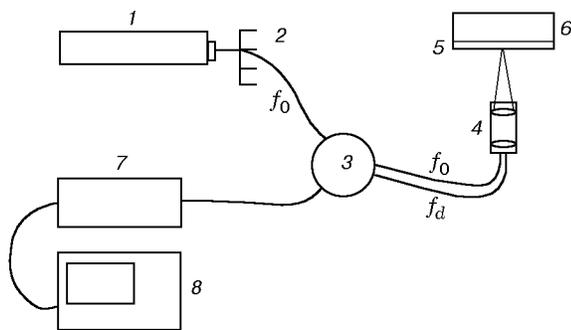


Рис. 2. Оптическая схема одного канала регистрации лазерно-гетеродинной методики ЛИМ-НЕТ-V:

1 — волоконный лазер, $\lambda = 1550$ нм, 2 — разветвитель 1×4 , 3 — оптический циркулятор, 4 — оптическая головка с линзами, 5 — образец, 6 — заряд ВВ, 7 — фотодетектор, 8 — осциллограф

мерительному узлу. При помощи линз в составе оптической головки (3) формируется сфокусированный зондирующий луч, выходящий на зеркальную или матированную поверхность образца (4), приводимого в движение продуктами взрыва ВВ (5). Отраженный свет, попадающий на линзы, фокусируется и вводится в оптоволокно (6). На выходе из оптоволокна линзой (7) формируется пучок света диаметром 20 мм, который проходит через узкополосный светофильтр (8). Лазерное излучение делится системой зеркал (9) на два канала регистрации с эталонами Фабри — Перо, имеющими разные базы. Первый канал с базой 25 мм (10) характеризуется высоким временным разрешением, второй канал регистрации с базой 50 или 80 мм (11) — высоким амплитудным разрешением.

Каждая из полученных интерференционных картин фокусируется при помощи линз (12, 13) на щель электронно-оптического регистратора (14, 15). Далее осуществляется непрерывная во времени развертка участка интерферограммы, ограниченного щелью электронно-оптического регистратора. Изображение, формируемое на экране регистратора, фиксируется ПЗС-камерой и передается на компьютер с последующим сохранением в виде файла растрового изображения.

По изменению во времени радиусов интерференционных колец определяется скорость движения поверхности, отражающей лазерное излучение. Типичные временные развертки, полученные в опытах, представлены на рис. 3.

В лазерно-гетеродинной методике, опти-

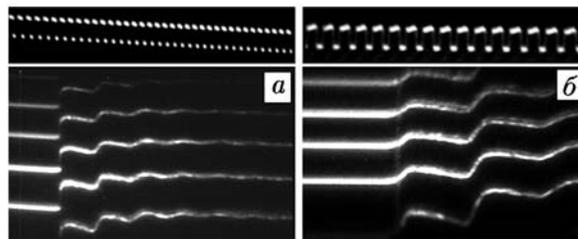


Рис. 3. Обзорный (а) и нониусный (б) каналы регистрации в методике ЛИМ-ФП разгона стальной пластины толщиной 3 мм продуктами взрыва шашки ВВ1 (ЛФС-60, $\varnothing 60 \times 20$ мм) при наличии воздушного зазора между ними 2 мм:

а — эталон Фабри — Перо с базой 25 мм, развертка 9 мкс, б — эталон Фабри — Перо с базой 50 мм, развертка 4 мкс

ческая схема одного канала которой показана на рис. 2, излучение волоконного лазера (1) равномерно делится на четыре измерительных канала посредством оптического разветвителя (2). Проходя через циркулятор (3), излучение фокусируется оптической головкой (4) на исследуемом образце (5), отражается от движущейся поверхности и также через циркулятор передается по оптоволокну на высокоскоростной детектор (7). На выходе детектора возникает электрический сигнал на разностной частоте $|f_0 - f_d|$, который регистрируется широкополосным осциллографом (8). Для перевода сигнала из амплитудно-временного представления в частотно-временное используется быстрое преобразование Фурье [5–10]. Результатом первичной обработки экспериментальных данных с помощью быстрого преобразования Фурье являются спектрограммы — рас-

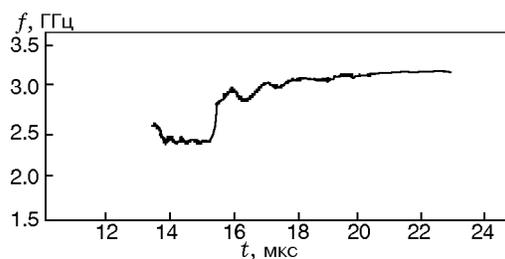


Рис. 4. Спектрограмма опыта 2 по откольному разгону (со смыканием откола) стальной пластины толщиной 3 мм продуктами взрыва ВВ1 (ЛФС-60, шашка $\varnothing 60 \times 20$ мм) в отсутствие воздушного зазора между шашкой и пластиной

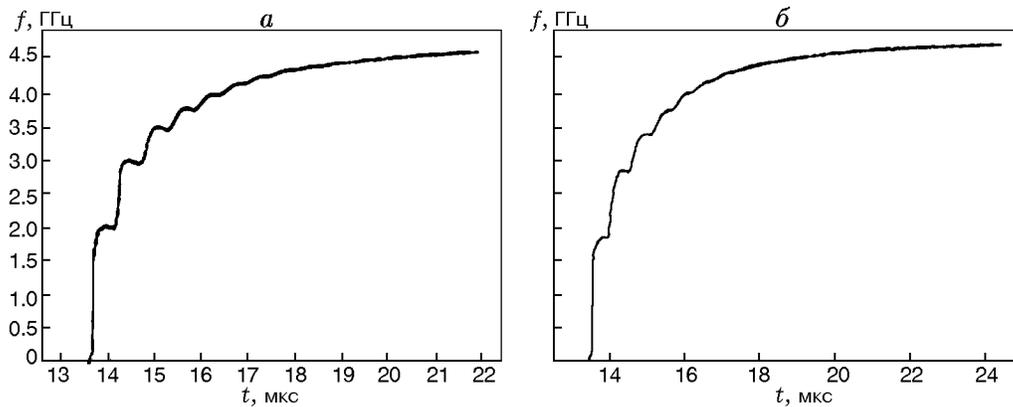


Рис. 5. Спектрограммы опытов 6 и 7 по безоткольному разгону стальной пластины толщиной 1.5 мм продуктами взрыва ВС1 (ЛФС-60, шашка $\varnothing 60 \times 20$ мм) через воздушный зазор между шашкой и пластиной, равный 2 (а) или 3 мм (б)

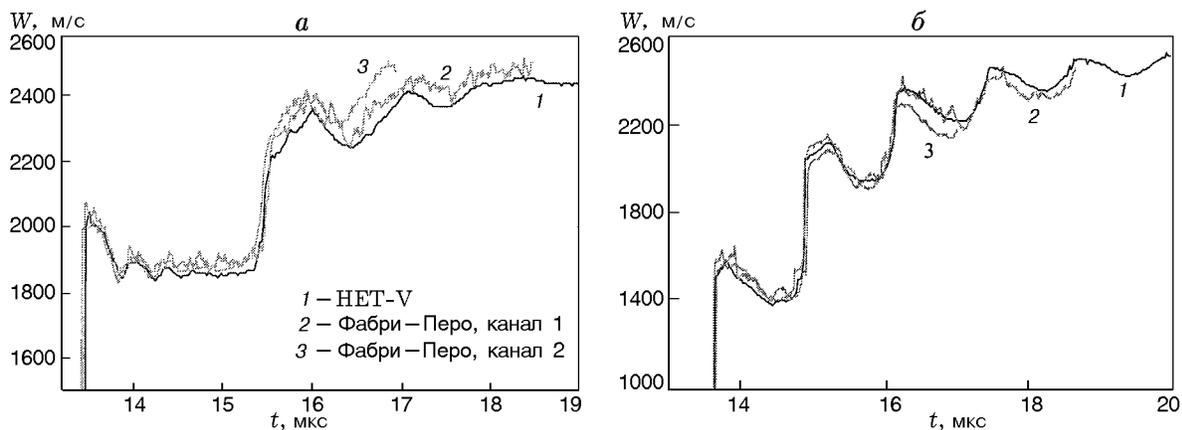


Рис. 6. Временные профили скорости разгона стальной пластины толщиной 3 мм взрывным нагружающим устройством ($TЭ = 237$ г ТНТ) в отсутствие воздушного зазора между ними (а, опыт 2) и при наличии воздушного зазора 2 мм (б, опыт 4)

пределение спектральной плотности во времени. На рис. 4 представлена типичная спектрограмма опыта с откольным (опыт 2), а на рис. 5 — с безоткольным метанием пластины (опыты 6 и 7). При дальнейшей обработке из спектрограммы по известной зависимости восстанавливаются профили скорости и перемещения свободной поверхности метаемой пластины (рис. 6, 7).

Способы обработки первичных данных, полученных по лазерно-гетеродинной методике, подробно описаны в [5–7, 10, 12, 13]. Там же, в частности в [12], проведено сравнение двух методик обработки первичных данных. Показано, что быстрое преобразование Фурье хуже справляется с малыми по амплитуде резкими изменениями скорости, сглаживая профили, в отличие от вейвлет-преобразования с адаптив-

ным по времени и по частоте шагом, позволяющего получать более точные результаты. Кроме того, нами используется еще один алгоритм обработки первичных сигналов, основанный на преобразовании Гильберта — Хуанга [12, 13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 6 представлено изменение во времени скорости разгона 3-миллиметровой стальной пластины в откольном режиме (со смыканием откола) без воздушного зазора, а также в безоткольном режиме через воздушный зазор величиной 2 мм. Сравнение результатов лазерно-гетеродинной регистрации (кривая 1) и измерений по методике Фабри — Перо (кривые 2 и 3), проведенных в каждом из экспериментов, свидетельствует об их хорошем со-

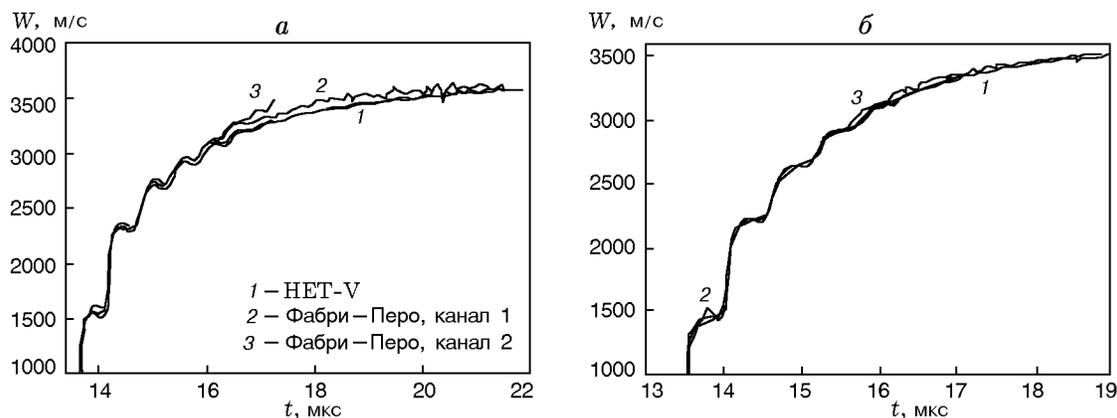


Рис. 7. Временные профили скорости разгона стальной пластины толщиной 1.5 мм взрывным нагружающим устройством ($TЭ = 237$ г ТНТ) через воздушный зазор 2 мм (а, опыт 6) и 3 мм (б, опыт 7)

гласии. Это подтверждает достоверность полученных экспериментальных данных и отсутствие систематических погрешностей в каждой из использованных независимых методик.

При разгоне пластины толщиной 3 мм без воздушного зазора с взрывным устройством, использованным в опыте 2 на временных профилях скорости движения свободной поверхности (рис. 6,а) виден сигнал, характерный для образования откола в пластине [4, 8, 14].

Отметим, что максимум скорости на первом скачке составляет $W_1^{\max} = 2.04$ км/с. Первый минимум скорости $W_1^{\min} = 1.84$ км/с. Спад скорости $\Delta W = 0.20$ км/с. Такому торможению пластины за счет прочности на растяжение соответствует откольная прочность, оцененная в гидродинамическом и упругопластическом приближениях соответственно равной $\sigma_{xxspall_1} = 3.72$ ГПа и $\sigma_{xxspall_2} = 4.04$ ГПа. Период реверберации продольной волны по отделившемуся отколу — $\bar{t} = 0.28$ мкс. Отколовшийся слой толщиной $h_{spall} = C_l t / 2 = 0.81$ мм (C_l — продольная скорость звука) движется со средней скоростью 1.86 км/с в течение примерно 1.8 мкс. Затем его догоняет основная часть пластины, откол смыкается. Во всех остальных опытах, представленных в таблице, осуществлен режим безоткольного метания пластин. Отметим, что ударник из хрупких материалов может потерять сплошность, стать рыхлым не только под воздействием растягивающих, но и сдвиговых напряжений. Для пластин из таких материалов при рассматриваемых режимах нагружения целесообразно дополнительно провести экспери-

менты с лазерно-интерферометрической диагностикой динамики их разгона через окно, например, из LiF, установленное в конце базы разгона, с регистрацией как фазы разгона и последующего движения с постоянной скоростью, так и стадии торможения разрушенной пластины на окне из LiF. Либо можно измерить профиль продольного напряжения в окне или оптически непрозрачной преграде по методике многоканальных манганиновых датчиков.

На рис. 7 представлены данные по динамике безоткольного разгона пластины из стали 12X18H10T толщиной 1.5 мм тем же взрывным устройством через воздушный зазор величиной 2 и 3 мм. Как следует из рисунка, реализуется режим безоткольного метания с набором скорости до 3.5 км/с к моменту времени 19 мкс, отсчитываемому от момента подачи высокого напряжения на электродетонатор, или после разгона пластины в течение 5.5 мкс после начала ее движения.

Еще более высокие значения установившейся скорости движения пластины удается достичь при безоткольном разгоне стальной пластины толщиной 1 мм продуктами взрыва шашки из октогенсодержащего ВС2 ($\varnothing 60 \times 30$ мм), инициированной ЛФС-60 (рис. 8).

Одномерный расчет по программе ВОЛНА, проведенный Д. М. Шалковским [15], описывает экспериментальный волновой профиль, показанный на рис. 8, при использовании в расчете воздушного зазора величиной 0.15 мм между шашкой октогенсодержащего ВС2 и метаемой стальной пластиной. На рис. 9 пред-

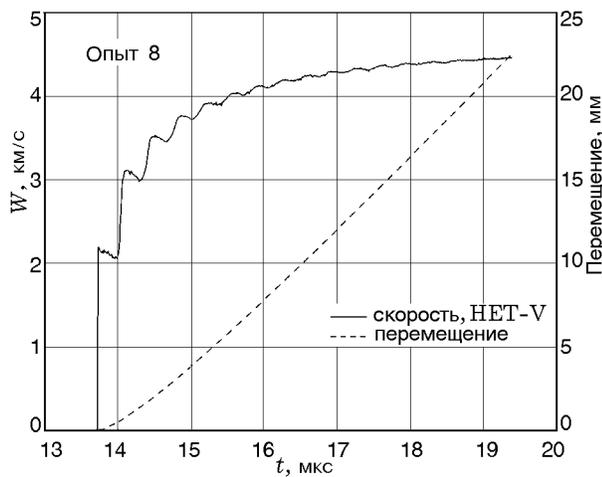


Рис. 8. Изменение во времени скорости свободной поверхности стальной пластины толщиной 0.92 мм при ее разгоне продуктами взрыва ВС2 (ТЭ = 289 г ТНТ)

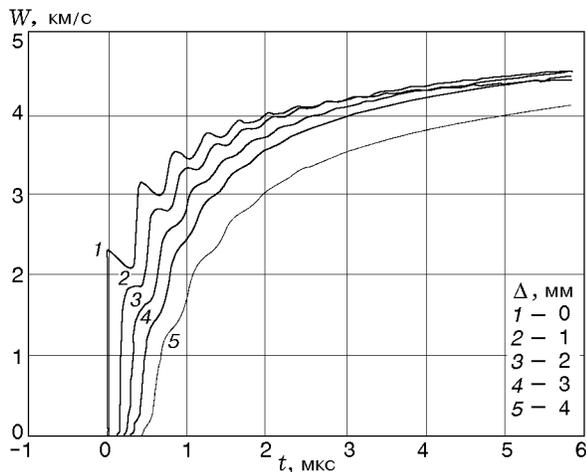


Рис. 9. Результаты расчета динамики разгона стальной пластины толщиной 1 мм (без алюминиевой фольги толщиной 0.2 мм) шашкой ВС2 (ЛФС-60, Ø60 × 30 мм) при различных воздушных зазорах между ними

ставлены результаты расчетов [15], проведенных Д. М. Шалковским и Н. С. Жилиевой аналогичным способом, по влиянию величины воздушного зазора на динамику разгона стальной пластины. Из данных рис. 9 следует, что введение между шашкой ВС и метаемой пластиной небольшого воздушного зазора, равного $\Delta = 1 \div 3$ мм, или $3 \div 10$ % от длины основного заряда ВС, обеспечивает более плавный безоткольный разгон метаемой пластины с достижением примерно одного уровня установившейся ско-

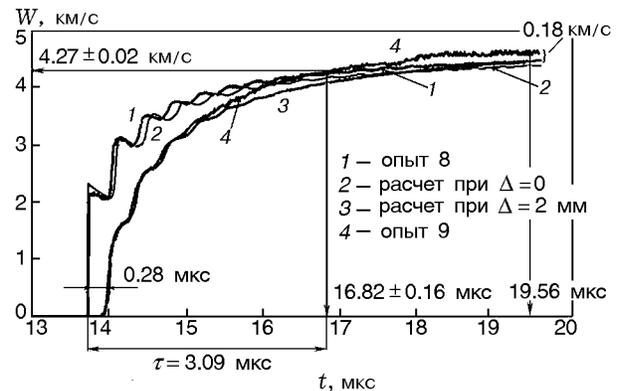


Рис. 10. Влияние наличия воздушного зазора $\Delta = 1.95$ мм между шашкой ВС2 и стальной пластиной толщиной 0.98 мм на динамику ее разгона продуктами взрыва шашки (Ø60 × 30 мм), инициированной генератором ЛФС-60 (ТЭ = 289 г ТНТ)

рости. При больших значениях воздушного зазора следует ожидать снижения уровня подлетной скорости. На рис. 10 показаны экспериментальные и расчетные зависимости изменения во времени скорости движения стальной пластины при отсутствии и наличии воздушного зазора шириной 2 мм.

Детали постановки и результаты одно- и двумерных численных расчетов по моделированию экспериментов с лазерно-интерферометрической диагностикой по метанию стальных пластин нормальной детонацией октогенсодержащих слоев различной исходной толщины, инициированных ЛФС-60, представлены в работе [15]. При моделировании использовались описание поведения продуктов взрыва в равновесном состоянии по уравнению состояния типа [16] и кинетическая модель детонации применяемых составов, изложенная в [17].

Из данных рис. 10 видно, что расчет хорошо описывает эксперимент на начальной фазе разгона пластины как при $\Delta = 0$ ($W_2(\tau)$), так и при $\Delta = 2$ мм ($W_3(\tau)$). Однако для больших времен полета расчет отличается от эксперимента, в частности, в эксперименте зафиксировано пересечение кривых $W_1(t)$ и $W_4(t)$ при времени разгона $t \approx 16.82 \pm 0.16$ мкс или $\tau \approx 3.09$ мкс. Скорость пластины в точке пересечения кривых $W_1(t)$ и $W_4(t)$ равна 4.27 ± 0.02 км/с. Использование воздушного зазора позволяет гарантированно исключить образование откольного разрушения в пластине,

обуславливает более мягкую динамику ее ускорения на начальном этапе разгона, меньший разогрев и устойчивый разгон до большей на 0.18 км/с скорости при использовании того же нагружающего устройства. То есть отличие установившихся скоростей пластины может достигать примерно 4 % при их метании аналогичными зарядами одного и того же взрывчатого состава при отсутствии и наличии воздушного зазора между шашкой ВС и метаемой пластиной.

ВЫВОДЫ

Проведены эксперименты по откольному и безоткольному разгону пластин из нержавеющей стали 12X18H10T продуктами взрыва октогенсодержащего взрывчатого состава. Профили скорости свободной поверхности пластин регистрировали одновременно по двум лазерно-интерферометрическим методикам. Систематических различий и погрешностей в результатах измерений каждой из независимых методик не обнаружено, что свидетельствует о достоверности проведенных измерений и работоспособности созданных лазерно-интерферометрических комплексов.

Уточнены условия безоткольного метания стальных пластин для создания высокоэффективных экономичных взрывных метательных устройств с массой ВВ, эквивалентной по выделению энергии 250 ÷ 300 г ТНТ, способных разгонять пластины из стали 12X18H10T толщиной 1 ÷ 3 мм до скорости 2.5 ÷ 4.5 км/с и надежно локализовать продукты взрыва и изучаемое вещество.

Новые экспериментальные данные по влиянию величины воздушного зазора на динамику разгона пластин будут способствовать совершенствованию методик численных расчетов систем с зазорами.

ЛИТЕРАТУРА

1. McMillan C. F., Goosman D. R., Parker N. L., Steinmetz L. L., Chau H. H., Huen T., Whiphey R. K., Perry S. J. Velocimetry of fast surfaces using Fabry — Perot interferometry // *Rev. Sci. Instrum.* — 1988. — V. 59, N 1. — P. 1–20.
2. Crifchley A. Optical velocimetry in hydrodynamics: a «bright» future // *The Sci. and Technol. J. of AWE (DISCOVERY)*. — 2008. — N 16. — P. 10–17.
3. Laharrague P., Durand M., Le Bihan A. System of velocity measurement of a projectile using a Fabry — Perot interferometer // *Rev. Sci. Instrum.* — 1977. — N 3. — P. 74.
4. Козлов Е. А., Бричков С. А., Боярников Д. С., Кучко Д. П., Дегтярев А. А. Особенности динамики схождения стальных оболочек при их взрывном нагружении по результатам лазерно-интерферометрических измерений // *Физика металлов и металловедение*. — 2011. — Т. 112, № 4. — С. 412–428.
5. Strand O. T., Goosman D. R., Martinez C., Whitworth T. L. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques // *Rev. Sci. Instrum.* — 2006. — V. 77. — 083108.
6. Holtkamp D. Survey of optical velocimetry experiments — application of PDV, a heterodyne velocimeter // *Proc. Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation, Santa Fe, New Mexico, USA, 2006*.
7. Bénier J., Mercier P., Dubreuil E., Veaux J., Frugier P. A. New heterodyne velocimeter and shock physics // *Proc. 9th Intern. Conf. on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading (DYMAT 2009), Brussels, Belgium, 2009*. — P. 289–294.
8. Козлов Е. А., Бричков С. А., Кучко Д. П., Ральников М. А., Ольховский А. В., Жилиева Н. С., Брезгина Л. П., Повышев В. Н. Локальные сдвиговые и откольные повреждения стальных оболочек при квазисферическом взрывном нагружении // *Международ. конф. «Ударные волны в конденсированном веществе», Киев, Украина: сб. докл.* — Интерпресс ЛТД, 2012. — С. 158–163.
9. Козлов Е. А., Таржанов В. И., Теличко И. В., Бричков С. А., Боярников Д. С., Кучко Д. П., Ольховский А. В., Ральников М. А., Ногин В. Н., Петровцев А. В., Шалковский Д. М., Добромыслов А. В., Талуц Н. И. Фазовые, структурные превращения и особенности откольных разрушений пластин и оболочек из закаленной стали 30ХГСА и стали 12X18H10T при взрывном нагружении // *XI Забабахинские научные чтения*. — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2012.
10. Liu S., Wang D., Li T., Chen G., Li Z., Peng Q. Analysis of photonic Doppler velocimetry data based on the continuous wavelet transform // *Rev. Sci. Instrum.* — 2011. — V. 82. — 023103.
11. Антипов Ю. М., Афонин А. Г., Василевский А. В., Гусев И. А., Демянчук В. И., Зятьков О. В., Игнашин Н. А., Каршев Ю. Г., Ларионов А. В., Максимов А. В., Матюшин А. А., Минченко А. В., Михеев М. С., Миргородский В. А., Пелешко В. Н., Рудько В. Д., Терехов В. И., Тюрин Н. Е., Федотов Ю. С., Трутнев Ю. А., Бурцев В. В., Волков А. А., Иванов И. А.,

- Картанов С. А., Куропаткин Ю. П., Михайлов А. Л., Михайлюков К. Л., Орешков О. В., Руднев А. В., Спириев Г. М., Сырунин М. А., Таценко М. В., Ткаченко И. А., Храмов И. В. Радиографическая установка ускорителя протонов с энергией 70 ГэВ ГИЦ ИФВЭ // Приборы и техника эксперимента. — 2010. — № 3. — С. 5–12.
12. Huang N. E., Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shih H. H., Zheng Q., Yen Nai-Chyuan, Tung C. C., Liu H. H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proc. Roy. Soc., London. — 1998. — V. A454. — P. 903–995.
 13. Huang N. E., Wu Z., Long S. R., Arnold K. C., Chen X., Blank K. On instantaneous frequency // Adv. in Adaptive Data Anal. — 2009. — V. 1, N 2. — P. 177–229.
 14. Kanel G. I. Spall fracture: methodological aspects, mechanisms and governing factors // Intern. J. Fract. — 2010. — V. 163. — P. 173–191.
 15. Козлов Е. А., Бричков С. А., Кучко Д. П., Ральников М. А., Ольховский А. В., Ногин В. Н., Петровцев А. В., Шалковский Д. М., Варфоломеев Д. А., Жиляева Н. С. Экспериментально-расчетное исследование безоткольного и откольного со смыванием метания пластин из 12Х18Н10Т толщиной 1; 1,5; 2 и 3 мм продуктами взрыва малогабаритных устройств с тротильным эквивалентом до 250 г ТНТ // XII Забабахинские научные чтения. Снежинск, 2–6 июня 2014. — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2014.
 16. Куропатенко В. Ф. Уравнение состояния продуктов детонации плотных ВВ // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 25, № 6. — С. 112–117.
 17. Grebenkin K. F., Taranik M. V., Zherebtsov A. L. Computer modeling of scale effects at heterogeneous HE detonation // Proc. XIII Intern. Symp. on Detonation, Norfolk, Virginia, USA, July, 23–28, 2006. — P. 496–505.

Поступила в редакцию 31/X 2013 г.
