

При $d = 0,1$ мм (опыты 1, 3) в точке контакта материалы нагружаемых пластин подвергаются интенсивным пластическим сдвиговым деформациям и переходят в тонких приграничных слоях в «квазиджидкую» фазу. Формируется микрокумулятивная струя, которая заполняет зазор шириной 0,1 мм. Осуществляется относительное течение трех потоков: от материала метаемой пластины, кумулятивная струя, от материала неподвижной пластины. Иными словами, реализуются два параллельных тангенциальных разрыва. Однако они частично стабилизируют друг друга относительно возмущений с длинами волн, большими по сравнению с расстоянием между разрывами [3]. Следовательно, амплитуда возмущений уменьшается.

Таким образом, микрокумулятивная струя в тонких зазорах выполняет обратную функцию: вместо генерации возмущений на контактной границе она их частично стабилизирует.

Список литературы

1. А.А. Дерibas Физика упрочнения и сварки взрывом// Новосибирск: Наука, 1980.
2. Кузьмин Г.Е., Симонов В.А., Яковлев И.В. Зависимость параметров волн при сварке взрывом от фазы разгона метаемой пластины // ФГВ, 1976, №3.
3. Н.Г. Кикина О влиянии вязкости на неустойчивость тангенциальных разрывов в несжимаемой среде// Акуст. журнал, 1967, т.13, вып.2.

СТРУКТУРА ПОТОКА ЧАСТИЦ, ВЫБРОШЕННЫХ С ПОВЕРХНОСТИ УДАРНО-НАГРУЖЕННЫХ ОБРАЗЦОВ СВИНЦА И МЕДИ

*Н.В. Невмержицкий, Е.В. Бодров, Е.А. Сотсков, Е.Д. Сеньковский, В.Н. Князев,
Н.Б. Давыдов, К.В. Анисифоров, О.Л. Кривонос, А.С. Соколова, А.Р. Гавриш, С.В. Фролов*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Аннотация

Представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований процесса выброса частиц с поверхности ударно-нагруженных образцов меди и свинца. Выброс происходил с узкой (0,2-0,8 мм) шероховатой ($Rz\ 20$ - $Rz\ 80$) поверхности образца в низкий (0,05 атм) вакуум или в газовую смесь азота и гелия (40% и 60% по объему), находящуюся под давлением $P_t = 8$ ати. Интенсивность ударной волны в опытах со свинцом составляла $P \approx 17$ ГПа, $P \approx 34$ ГПа, $P \approx 42$ ГПа, с медью - 44 ГПа. Регистрация течения проводилась в проходящем и отраженном свете оптической микроскопической методикой при короткой двухимпульсной лазерной подсветке.

Благодаря малой оптической толщине пылевого потока в вакууме получены спектры частиц свинца примерно в 80% его высоты, отсчитываемой от фронта потока. При выбросе частиц в газовую смесь зарегистрирована ударная волна, отходящая в смесь от свободной поверхности образца и крупные частицы (порядка 20-40 мкм), находящиеся на фронте пылевого облака, которые в процессе движения могут разрушаться набегающим потоком газа. Мелкие частицы свинца (4÷10 мкм) не разрешаются. Расчетные оценки показывают, что мелкие частицы свинца в газовой смеси могут испаряться за единицы микросекунд. В экспериментах с медью, находящейся в твердом состоянии после ударно-волнового нагружения, и вакууме, и в газовой смеси наблюдаются частицы и множество отколов.

Введение

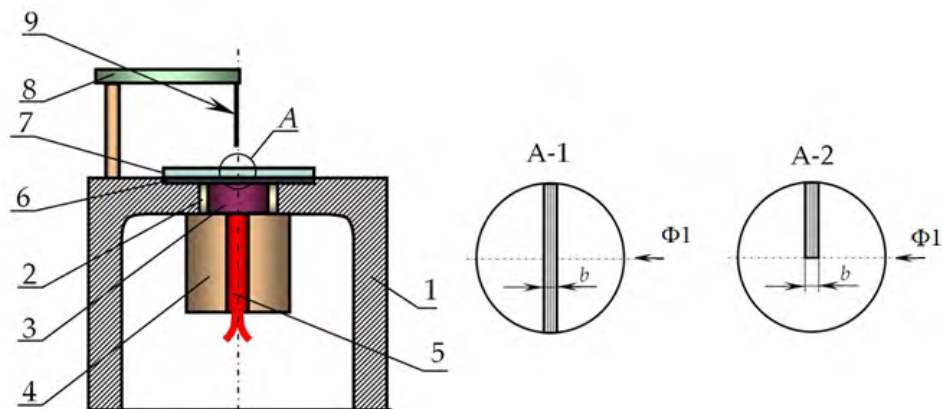
При выходе сильной ударной волны (УВ) на свободную поверхность (СП) конденсированного материала, происходит выброс частиц материала с этой поверхности. Этот процесс еще называют пылением материала. Размер частиц пыли может достигать сотен микрон, а их скорости – несколько километров в секунду. Эти частицы могут отрицательно влиять на работу инерциального термоядерного синтеза. Некоторые результаты исследований пыления представлены, в частности, в [1-3]. В настоящей работе приведены результаты экспериментальных и расчетных исследований процесса пыления в вакуум и газовую смесь азота и гелия с узкой (0,2-0,8 мм) шероховатой полоски свинцового образца марки С1 и, для сравнения, меди марки М1. Регистрация течения в экспериментах проводилась микроскопическим электронно-оптическим методом [4] при твердом состоянии свинца ($P \approx 17$ ГПа) и жидком ($P \approx 34$ ГПа и $P \approx 42$ ГПа); при твердом состоянии меди ($P \approx 44$ ГПа). Работа является продолжением исследований, изложенных авторами в [5].

Техника экспериментов

Экспериментальное устройство, в котором устанавливали образец свинца и взрывчатое вещество, представлено на рисунке 1. Использовали образцы свинца $\varnothing 36$ мм толщиной $h = 1$ мм, меди с $h = 1,42$ мм. Передняя (свободная) поверхность образца имела шероховатость $Ra \leq 0,1$ (зеркало), задняя поверхность – $Ra \leq 5$. На передней поверхности образца (на СП) на специальном станке-манипуляторе была нанесена узкая ($b = 0,2-0,8$ мм) шероховатая полоска. Она состояла из периодических двумерных возмущений (в виде трех канавок). В одних опытах полоска пересекала весь образец, в других – доходила лишь до центра (рисунок 1, варианты А-1, А-2). Это сделано специально для того, чтобы исследовать пыление с шероховатой и с зеркальной поверхности в одном эксперименте. Полная амплитуда возмущений на полоске $\Delta = Rz$ варьировалась от ≈ 20 мкм до ≈ 80 мкм, длина волны λ – от ≈ 80 мкм до ≈ 300 мкм. На заднюю поверхность образца свинца устанавливали стальную подложку толщиной $l = 0,5$ мм (образцы меди были без подложки). На подложку крепили твердое взрывчатое вещество (ВВ). К верхнему торцу устройства крепили репер. В качестве репера использовали оптоволоконно. Экспериментальное устройство помещали в герметичную камеру с четырьмя оптически прозрачными окнами.

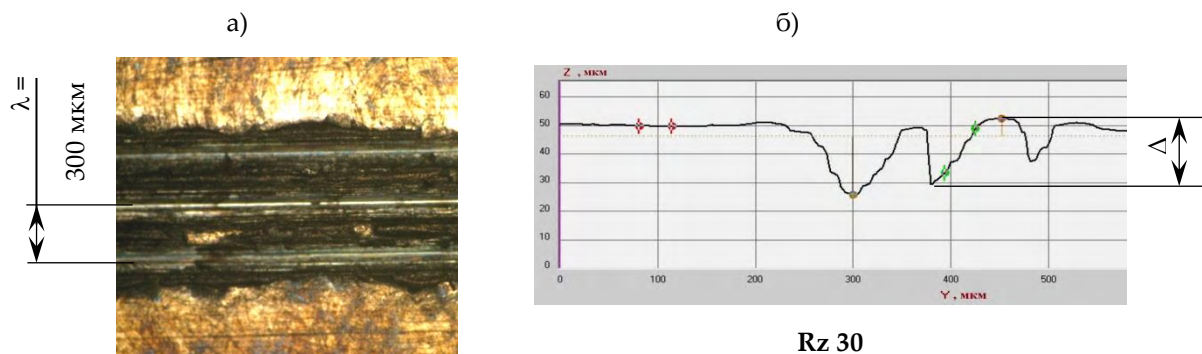
Интенсивность ударной волны изменяли вариацией массы ВВ. Давление во фронте УВ и скорость СП определяли при помощи двумерных численных расчетов.

На рисунке 2 представлена характерная фотография образца и профилограмма шероховатой поверхности. Профилограмма получена при помощи лазерного профилометра.



1 – корпус ; 2 – втулка ; 3 – ВВ; 4 – розетка; 5 – детонатор; 6 – подложка ; 7 – свинец;
8 – подставка репера; 9 – репер; Φ1 – направление регистрации

Рисунок 1. Схема экспериментального устройства



а) фотография поверхности образца; б) характерная профилограмма поверхности образца

Рисунок 2. Свободная поверхность свинца

Для подсветки течения применяли трехимпульсный лазер с длиной волны излучения 532 нм. Регистрацию процесса пыления проводили CCD видеокамерами через систему с коэффициентом оптического увеличения $k = 15-30$ раз при короткой (менее 7 нс) лазерной подсветке в проходящем и отраженном свете. Размер пикселя CCD видеокамеры составлял ≈ 7 мкм. В проходящем свете, из-за срезания части параллельного светового потока апертурой окуляра, реализовывался шлирен-метод (теневого метод). Он обладает чувствительностью к малому перепаду плотностей, и разрешает, например поток тепла от руки человека. В отраженном свете этот метод не реализуется.

Разрешение системы регистрации определялось по видеокадрам оптического эталона (миры ГОИ № 1). При $k = 30$ система разрешает частицы размером от 4 мкм и выше, глубина резкости $\approx 0,2$ мм. Фокус оптической системы настраивали на репер, установленный по центру ширины полоски. В опыте регистрировали одно или три изображения процесса пыления. В докладе представлено по одному изображению из опыта.

Результаты экспериментов

В таблице 1 представлены некоторые условия проведенных экспериментов (* – опыты с медными образцами). Согласно расчетным данным при $P = 17$ ГПа после прохождения УВ свинец находился в твердом состоянии, при $P = 34$ ГПа и выше – в жидком [6].

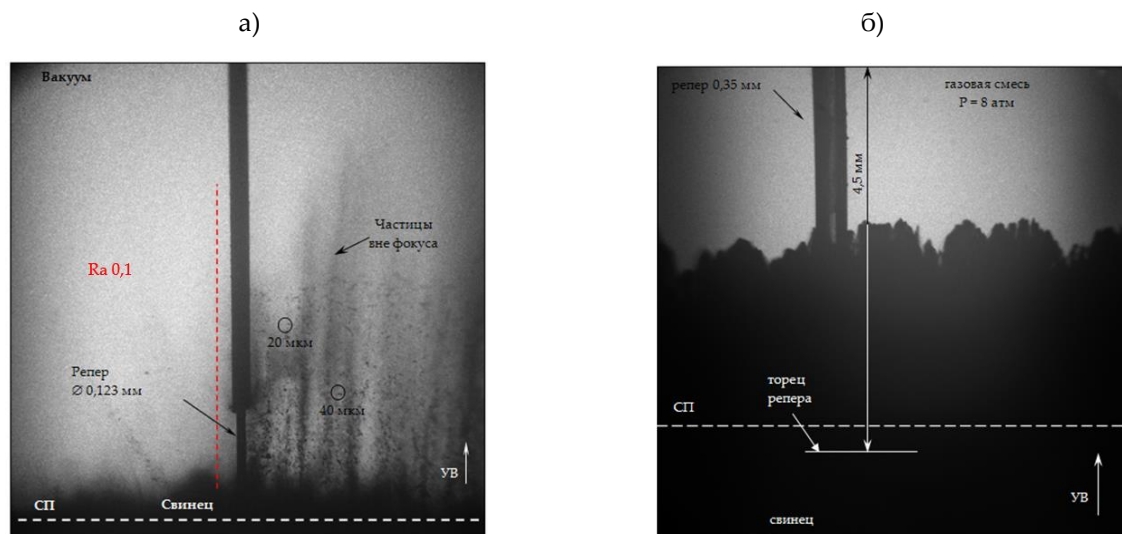
На рисунках 3а-6а приведены характерные видеокадры процесса выброса частиц со свободной поверхности свинца, на рисунках 6б, 7б – меди.

Таблица 1

№ оп.	Газ	Давл. в УВ, ГПа	b, мм	Rz, мкм	λ , мкм	Рег-ция	№ оп.	Газ	Давл. в УВ, ГПа	b, мм	Rz, мкм	λ , мкм	Рег-ция
1	Вак.	17	0,4	40	150	Прох.	11	Вак.	34	0,2	20	80	Прох.
2	Вак.	17	0,35	80	100	Отр.	7	Вак.	34	0,25	25	80	Прох.
3	Газ. с.	34	0,3	30	100	Прох.	13	Вак.	42	0,3	30	100	Прох.
4	Газ. с.	34	0,3	20	100	Прох.	16	Газ. с.	17	0,4	80	100	Отр.
5	Вак.	34	0,4	30	130	Прох.	18	Газ. с.	17	0,35	30	100	Отр.

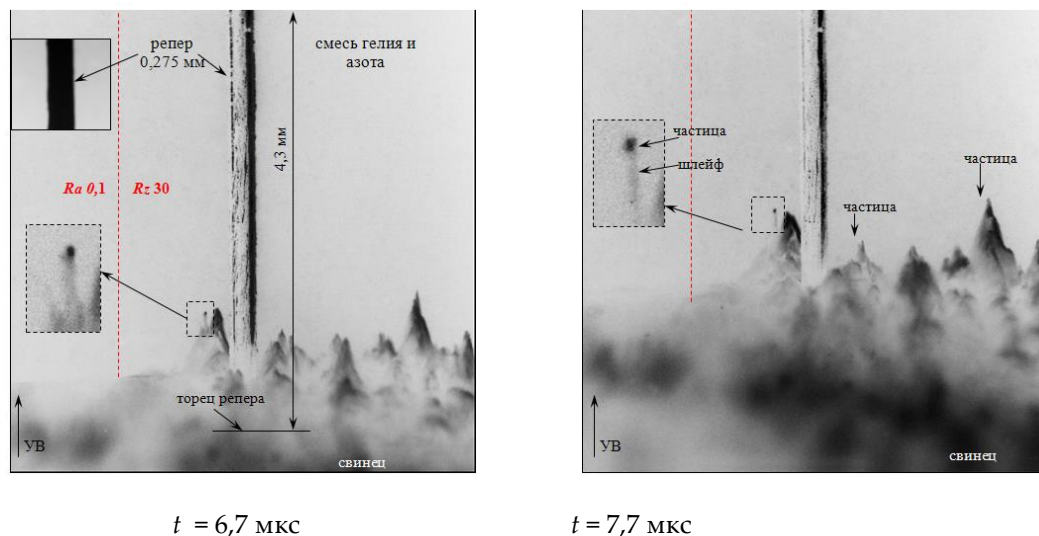
Продолжение таблицы 1.

№ оп.	Газ	Давл. в УВ, ГПа	b, мм	Rz, мкм	λ, мкм	Рег-ция	№ оп.	Газ	Давл. в УВ, ГПа	b, мм	Rz, мкм	λ, мкм	Рег-ция
6	Вак.	34	0,8	50	300	Прох.	21	Газ. с.	42	0,35	30	100	Прох.
8	Вак.	34	0,2	30	140	Прох.	22*	Газ. с.	44	0,35	30	120	Отр.
9	Газ. с.	34	0,3	20	100	Прох.	23	Газ. с.	42	0,35	30	100	Отр.
10	Газ. с.	17	0,6	80	300	Прох.	25*	Вак.	44	0,55	45	170	Прох.
26	Вак.	42	0,4	40	100	Прох.	28	Вак.	42	0,3	30	100	Прох.



а) вакуум, $t = 7,38$ мкс (опыт № 1, $Rz 40$, $\lambda = 150$ мкм); б) газовая смесь, $t = 7,58$ мкс (опыт № 10, $Rz 80$, $\lambda = 300$ мкм)

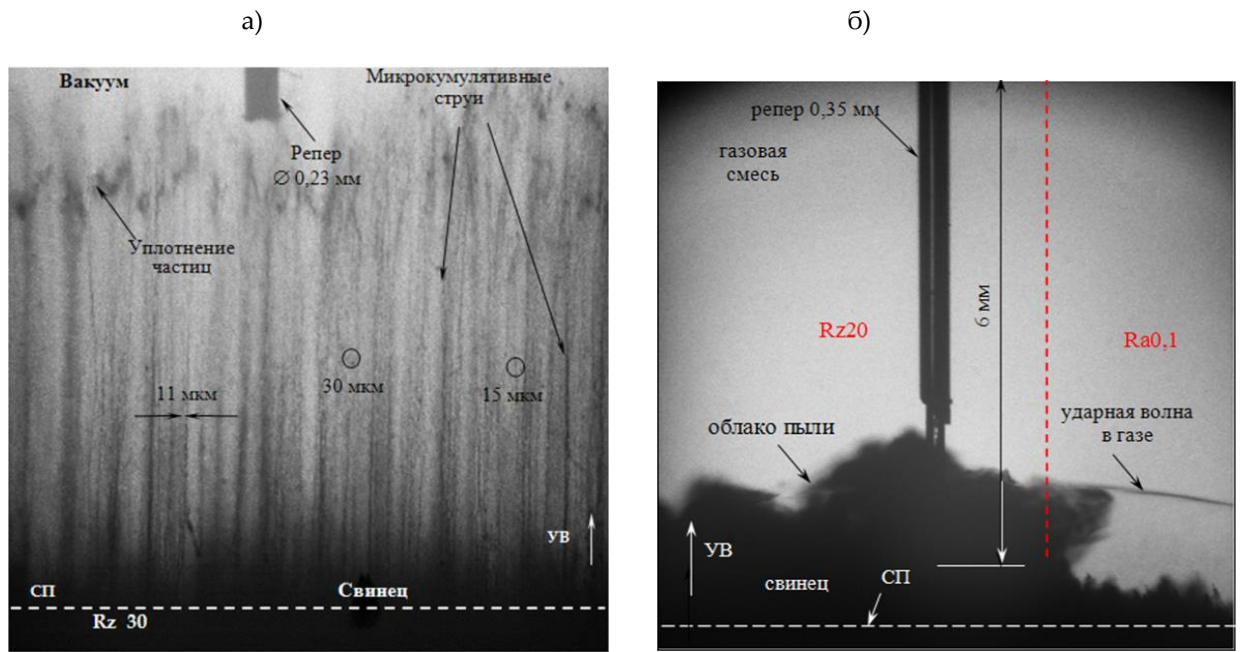
Рисунок 3. Видеокадры выброса частиц с поверхности свинца ($P_{УВ} = 17$ ГПа)



$t = 6,7$ мкс

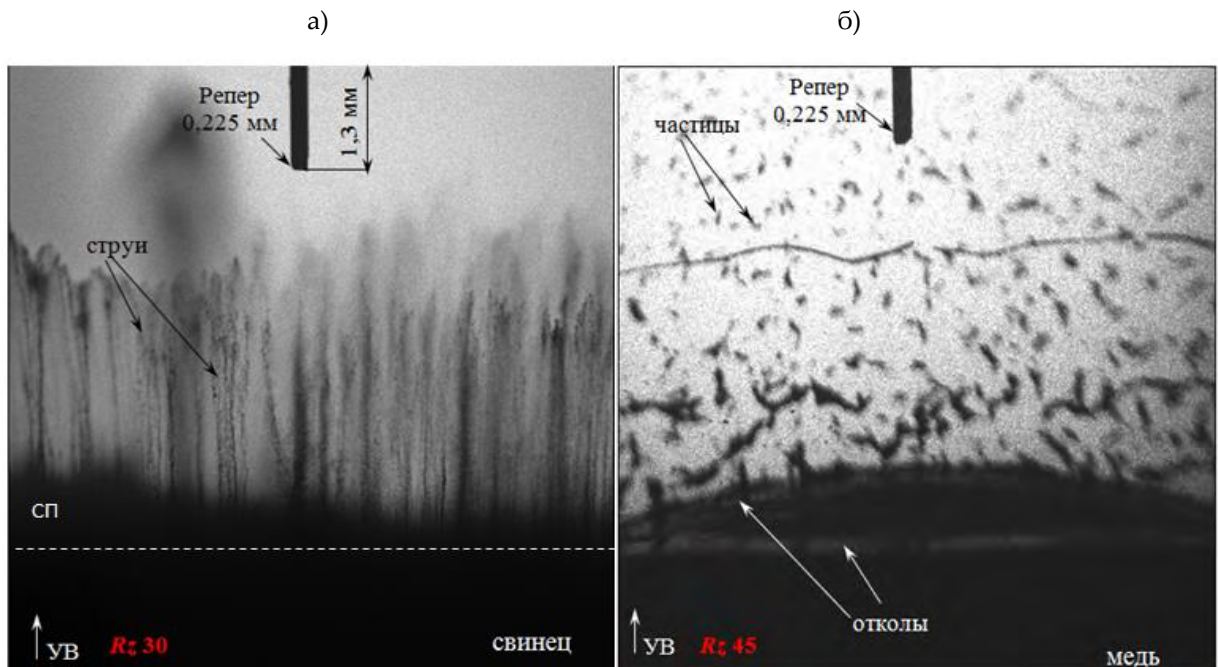
$t = 7,7$ мкс

Рисунок 4. Видеокадры выброса частиц с поверхности свинца (опыт № 18, отраженный свет, $P_{УВ} = 17$ ГПа; $Rz 30$, $\lambda = 100$ мкм, УВ – направление ударной волны)



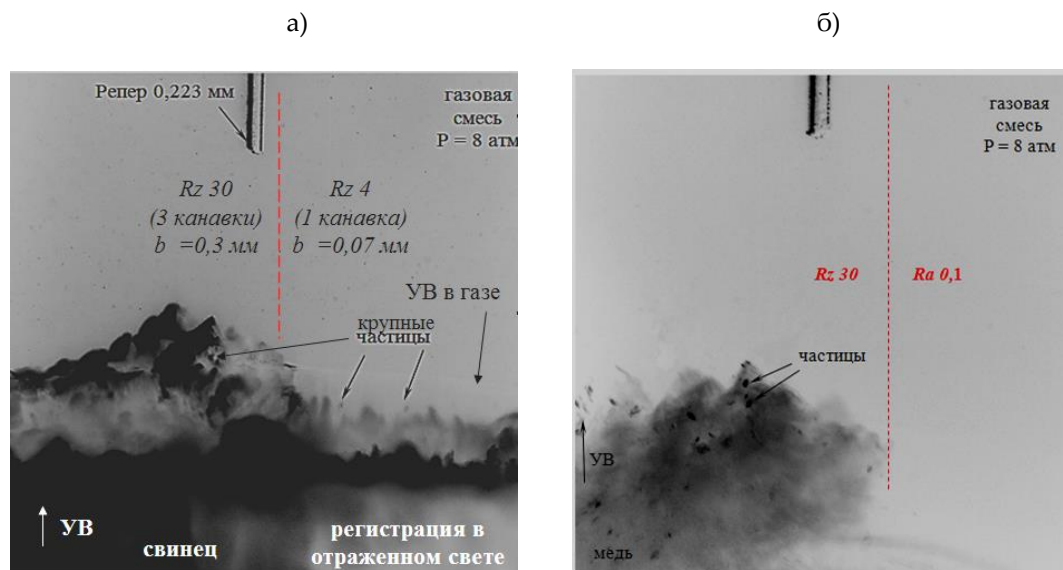
а) опыт № 8, Rz 30, $\lambda = 140$ мкм, пыление в вакуум, $t = 7,5$ мкс; б) опыт № 9, Rz 20, $\lambda = 100$ мкм, пыление в газовую смесь, $t = 14,8$ мкс

Рисунок 5. Видеокadres выброса частиц с поверхности свинца ($P_{УВ} = 34$ ГПа)



а) свинец, опыт № 28, Rz30, $\lambda = 100$ мкм, $t = 9$ мкс; б) медь, опыт № 25, Rz 45, $\lambda = 170$ мкм, $t = 8,15$ мкс

Рисунок 6. Видеокadres выброса частиц свинца при $P_{УВ} = 42$ ГПа и меди при $P_{УВ} = 44$ ГПа, в вакуум



а) свинец, опыт № 23, Rz 30, $\lambda = 100$ мкм, $t = 10,2$ мкс; б) медь, опыт № 22, Rz 30, $\lambda = 120$ мкм, $t = 11,6$ мкс

Рисунок 7. Видеокдры выброса частиц свинца при $P_{УВ} = 42$ ГПа и меди при $P_{УВ} = 44$ ГПа, в газовую смесь

Время регистрации t на видеокдрах отсчитывается от подачи импульса на подрыв детонатора. На представленных видеокдрах с вакуумом разрешается $\approx 80\%$ высоты пылевого потока. По видеокдрам видно следующее:

- с шероховатой узкой полосы выбрасываются кумулятивные струи. При твердом состоянии свинца струи являются дискретными: они состоят из отдельных твердых частичек (см. рисунок 3а), при жидком - струи изначально тонкие (от 7 мкм), они могут быть сплошными или представлять собой скопление мелких частиц, со временем струи распадаются на частицы (см. рисунки 5а, 6а).

- на зеркальной поверхности металла процесс пыления также развивается, но протекает он менее интенсивно (см. рисунки 3а, 4, 5б на участке с Ra0,1). Пылевой поток на этой поверхности регистрируется в виде невысокого туманного облака, микрокумулятивные струи не наблюдаются. Частицы здесь мелкие, они образуются, по-видимому, из-за неоднородностей металла.

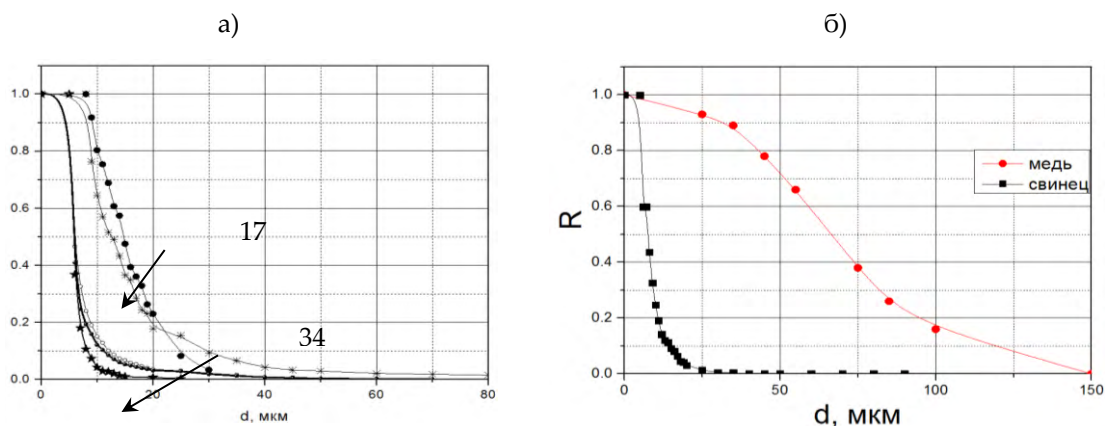
- при пылении свинца в газовую смесь частицы пыли в проходящем свете (шлирен-методом), как и в [7], не разрешаются (см. рисунки 3б, 5б). В отраженном свете структура пылевого облака регистрируется в виде множества конических размытых струй, на вершинах которых находятся крупные частицы, мелкие фрагменты частиц не разрешаются. Коническая форма изображения струи может быть связана с ударной волной, создаваемой частицей в газовой смеси [2]. На рисунке 4 видно, что за крупной (20 мкм) частицей тянется шлейф из мелких фрагментов (как за кометой). Это говорит о том, что частицы, движущиеся по газовой смеси, могут претерпевать вторичное дробление: потоком газа с поверхности частицы могут срывать мелкие фрагменты. Возможно и частичное испарение этих фрагментов из-за дополнительного нагрева при торможении (температура испарения свинца – 2050 К). Множество мелких фрагментов частиц (или пар) делают изображение потока непрозрачным.

• в эксперименте с медью разрешаются частицы и в проходящем, и в отраженном свете, т. к. медь после прохождения УВ находится в твердом состоянии, частицы относительно крупные, наблюдаются отколы (см. рисунки 6б, 7б).

• во всех экспериментах с газовой смесью при регистрации течения в проходящем свете наблюдается УВ, расположенная внутри облака пыли и отходящая от СП в смесь (см. рисунок 5б).

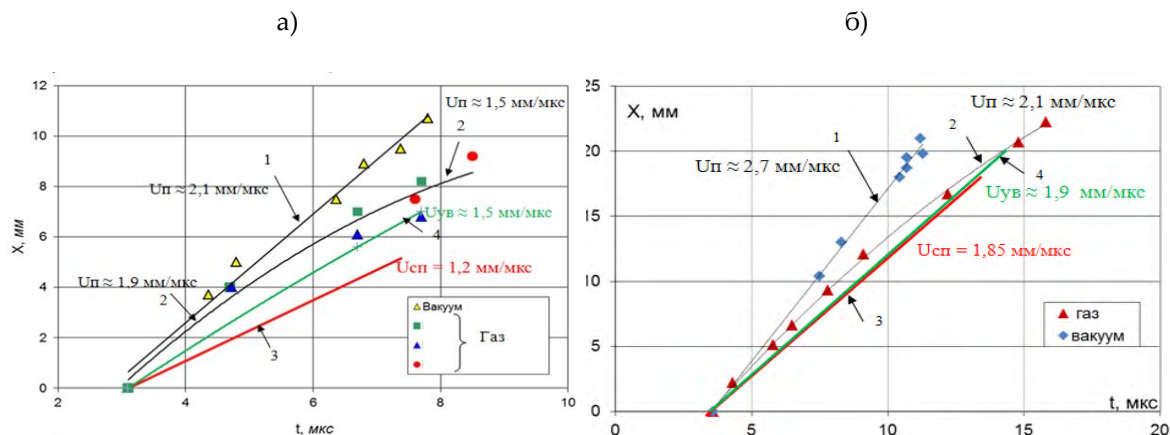
Обработка видеок кадров проводилась по специальной программе. Диаметр частицы d определялся по площади ее изображения и масштабировался на размер репера. По результатам метрологической экспертизы относительная погрешность измерения диаметра частицы по этой программе составляет 17%. Распределение частиц «пыли» по размерам $R(d)$ определялось по формуле $R = \frac{N - \sum_{i=1}^n n_i}{N}$, где N – общее количество частиц в эксперименте, n_i – количество частиц в i -интервале диаметров с учетом количества в предыдущем интервале.

На рисунке 8 представлено распределение частиц по размерам в вакууме. По графику видно, что с увеличением интенсивности ударной волны спектр частиц смещается в сторону меньших размеров, частицы свинца значительно меньше частиц меди.



а) опыты со свинцом, №1, 2 – $P_{УВ} = 17$ ГПа, опыты №6, 7, 8 – $P = 34$ ГПа;
б) опыты №28 свинец при ($P_{УВ} = 42$ ГПа), №25 медь при ($P_{УВ} = 44$ ГПа)

Рисунок 8. Распределение частиц пыли по размерам в вакууме

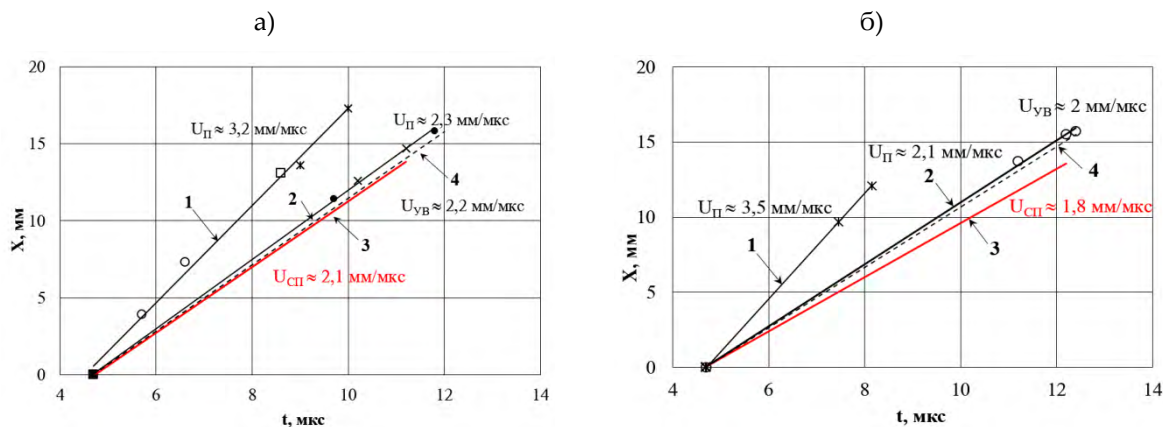


а) $P_{УВ} = 17$ ГПа; б) $P_{УВ} = 34$ ГПа: фронт пыли в вакууме (1), фронт пыли в газовой смеси (2), расчетное положения СП (3), положение УВ в газовой смеси (4)

Рисунок 9. $X(t)$ -диаграммы в экспериментах со свинцом

На рисунках 9 и 10 приведены $X(t)$ -диаграммы движения усредненного фронта потока пыли, СП и УВ в экспериментах. На графиках: U_{Π} , $U_{СП}$, $U_{УВ}$ – скорости фронтов пыли, СП и УВ, соответственно. Погрешность измерения $X_i = \pm 0,5$ мм.

По $X(t)$ -диаграммам видно, что отношение скорости фронта пыли в вакууме к скорости фронта в газовой смеси составляет примерно 30%, т.е., в газовой смеси происходит торможение потока.



а) свинец при $P_{УВ} = 42$ ГПа, б) медь при $P_{УВ} = 44$ ГПа

Рисунок 10. $X(t)$ -диаграммы в экспериментах: фронт пыли в вакууме (1), фронт пыли в газовой смеси (2), расчетное положения СП (3), положение УВ в газовой смеси (4)

Оценочные расчеты испарения частицы

Проведены расчётные оценки прогрева сферических частиц свинца размером $r = 2$ мкм и 10 мкм, движущихся с начальной скоростью 3 км/с в покоящемся газе. Такое значение скорости выбрано из предположения, что в газовую смесь частица вылетает с поверхности образца с такой же скоростью, что и в вакуум, т. к. условия нагружения были одинаковыми.

Оценка температуры газа при торможении на поверхности частицы выполнена по формуле (1) из [7] и проверена в модельных расчетах по газодинамическим программам.

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{[2 \times \gamma \times M_1^2 - (\gamma - 1)] \times [(\gamma - 1) \times M_1^2 + 2]}{(\gamma + 1)^2 \times M_1^2} \tag{1}$$

T_1 – температура перед фронтом УВ, T_2 – температура за фронтом УВ, M_1 – число Маха УВ.

В расчетах газовая смесь представлялась идеальным газом с параметрами: начальная плотность $\rho_0 = 0,0051$ г/см³, начальное давление $P_0 = 8$ атм; $\gamma = C_p/C_v = 1,5$; C_p – теплоемкость при постоянном давлении; C_v – теплоемкость при постоянном объеме $C_v = 1,12 \cdot 10^{-3}$ кДж/г·К; $T_0 = 293$ К; скорость звука $C = 530$ м/с.

По результатам двумерных газодинамических расчётов (см. рисунок 11) получено, что сферическая частица радиусом 10 мкм прогревается до температуры испарения и испаряется полностью за время $\tau \approx 5$ мкс, частица радиусом 2 мкм - за время $\tau \approx 0,2$ мкс.

Выводы

Представленные результаты показывают, что:

- с шероховатой поверхности твердого свинца в вакуум выбрасываются струи, состоящие из отдельных частичек; в жидком свинце - микрокумулятивные струи, которые со временем распадаются;

- с зеркальной поверхности свинца в вакуум выбрасываются отдельные мелкие частицы (4-5 мкм), процесс пыления здесь идет менее интенсивно, чем с шероховатой поверхности;
- частицы пыли свинца, выброшенные в газовую смесь, в проходящем свете не разрешаются, что связано с затенением течения мелкими фрагментами, образующимися при вторичном дроблении (испарении) частиц. В отраженном свете структура пылевого облака регистрируется в виде множества конических размытых струй, на вершинах которых находятся крупные частицы, мелкие фрагменты частиц не разрешаются;
- расчетные оценки течения показывают, что при давлении за фронтом ударной волны $P = (34-42)$ ГПа отдельные частицы свинца могут испаряться за единицы микросекунд.

Авторы выражают благодарность В.А. Огородникову и А.Б. Георгиевской за полезные замечания.

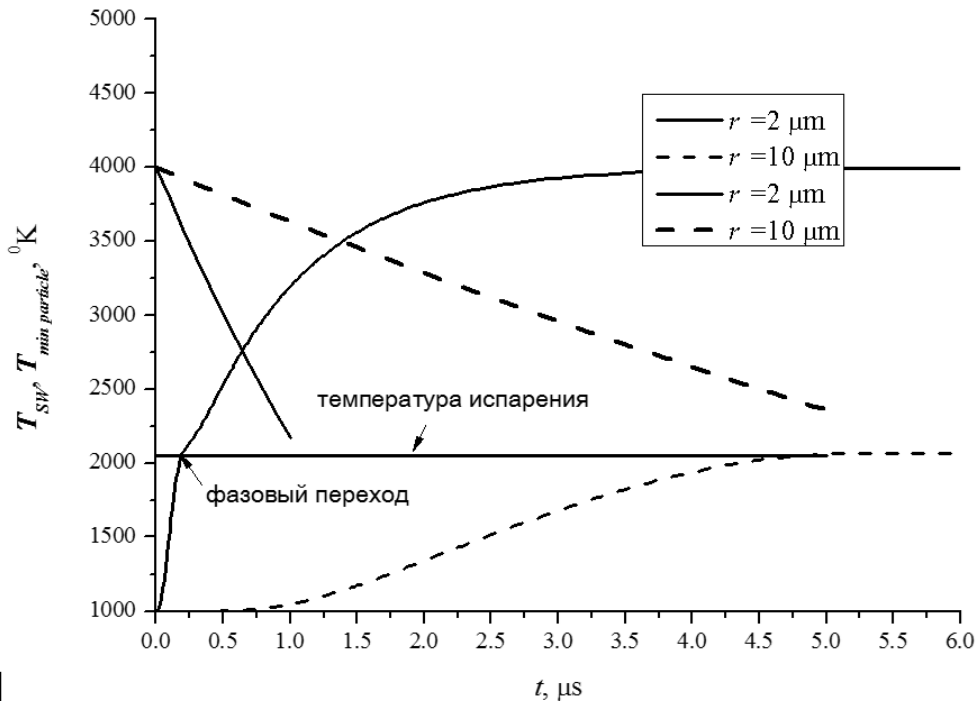


Рисунок 11. Расчетные временные зависимости температуры разогрева материала частицы $T_{\min \text{ particle}}$ и температуры газа на фронте частицы T_{sw} вследствие торможения

Список литературы

- 1 В.А. Огородников, А.Г. Иванов, А.Л. Михайлов и др. // ФГВ. 1998. Т. 34, № 6, с. 103-107.
- 2 В.А. Огородников, А.Л. Михайлов, С.В. Ерунов и др. Регистрация процесса выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженных образцов теньевым способом. // XI Харитоновские тематические научные чтения. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Саров. 2009. С. 647-653.
- 3 М.В. Антипов, А.Б. Георгиевская, К.Н. Панов и др. Результаты исследований процесса выброса частиц со свободной поверхности металлов под действием ударной волны. // XVII Харитоновские тематические научные чтения. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Саров. 2015. С. 702-709.
- 4 С.А. Абакумов, О.Л. Кривонос, Н.В. Невмержицкий и др. Устройство для регистрации микронных частиц в газодинамическом потоке. // Патент на полезную модель RU № 139204 U1, зарегистр. 13 марта 2014.
- 5 Н.В. Невмержицкий, В.А. Раевский, Е.А. Сотсков, Е.Д. Сеньковский и др. Некоторые особенности выброса частиц с поверхности ударно-нагруженного свинцового образца // ФГВ. 54. №5. 2018. С. 82.

- 6 В.П. Копышев, А.Б. Медведев. Термодинамическая модель сжимаемого коволюма. ВНИИЭФ. Саров. 1995. С. 58-120.
- 7 В.А. Огородников, А.Л. Михайлов, С.В. Ерунов и др. Влияние газа на процесс выброса частиц со свободной поверхности образца при выходе на нее ударной волны различной интенсивности. // ЖЭТФ, 2016. Т.150, вып.2. С.411-417.
- 8 Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц, Теоретическая физика. Изд.3. Т.6. Гидродинамика. Гл. XIII. Обтекание конечных тел. Издательство «Наука». 1986. Стр.638-640.

ХАРАКТЕРИСТИКИ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПЫЛЕВЫХ ПОТОКОВ С ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СВИНЦА И МЕДИ ПРИ ДАВЛЕНИИ В УДАРНОЙ ВОЛНЕ 45-50 ГПА И РАЗГРУЗКЕ В ВАКУУМ

*В.А. Огородников, А.Л. Михайлов, С.В. Ерунов, С.А. Финюшин, Д.Е. Зотов,
Н.В. Невмержицкий, А.И. Быструев, М.А. Сырунин, М.В. Антипов, А.В. Федоров,
К.Н. Панов, Е.В. Кулаков, А.А. Утенков, И.В. Юртов, Е.А. Чудаков, И.В. Шмелев,
А.О. Яговкин, А.В. Чапаев, А.В. Романов, А.В. Мишанов, Н.Б. Давыдов, В.В. Глушихин,
И.А. Калашиник, Е.Д. Сеньковский, Е.В. Бодров, А.В. Руднев, Д.Н. Замыслов, М.О. Лебедева*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса ударно-индуцированного выброса частиц («пыления») со свободной шероховатой ($Rz\ 20$) поверхности образцов из свинца и меди в вакуумированную среду при совместном использовании методик, основанных на разных физических принципах. Причем для более эффективного использования теневой лазерно-оптической методики по определению размеров частиц, в центре свободной поверхности образца выполняли узкую полосу, из которой выбрасывался оптически прозрачный поток частиц. С остальной, существенно большей по размерам, поверхности выбрасывался поток частиц, параметры которого надежно регистрировали с использованием методики гетеродин-интерферометра, рентгенографической и пьезоэлектрической методик. Это позволило получить более надежные данные о распределении частиц по размерам, скорости фронта потока частиц и распределении плотности (массы) потока в направлении его движения, необходимые для уточнения имеющихся и создания более обоснованных моделей описания явления. Использование образцов из свинца и меди, материал которых при выбранных близких условиях нагружения (амплитуда ударной волны, шероховатость свободной поверхности) плавится или не плавится на ударной волне, позволили отчетливо показать влияние плавления на качественную картину и количественные характеристики процесса ударно-индуцированного «пыления».

Эффект выброса частиц со свободной поверхности металлических образцов при выходе на нее ударной волны или эффект ударно-индуцированного «пыления» обнаружен и в какой-то мере был исследован в США начиная с 50-х годов прошлого столетия [1-2]. Примерно в это же время этот эффект был исследован сотрудниками РФЯЦ-ВНИИЭФ, хотя отдельные результаты этих работ, дополненные авторами, были опубликованы значительно позже [3]. В качестве диагностики в этих исследованиях использовали фотохронографическую и рентгенографическую методики с использованием пленочных систем регистрации. Регистрируемые изображения потоков частиц имели сильное размытие, связанное с большими временами экспозиции ($\sim 0,3-0,5$ мкс), поэтому можно было говорить только о качественной картине процесса и об оценочных значениях его кинематических характеристик.

Интерес к этому эффекту возобновился в конце прошлого – начале нынешнего столетий, в связи с развитием высокоточной лазерной и оптико-электронной техники. Это позволило,