

Некоторые особенности выброса частиц с поверхности ударно-нагруженного свинцового образца

Н. В. Невмержицкий, В. А. Раевский, Е. А. Сотсков, Е. Д. Сеньковский, Н. Б. Давыдов, Е. В. Бодров, С. В. Фролов, К. В. Анисифоров, А. Б. Георгиевская, Е. В. Лёвкина, О. Л. Кривонос, А. С. Кучкарева, А. Р. Гавриш, Б. И. Ткаченко

Представлены результаты экспериментального исследования процесса выброса частиц в низкий (0,05 атм) вакуум с узкой (0,2–0,8 мм) шероховатой ($R_z = 20–50$ мкм) поверхности образца свинца под действием ударной волны интенсивностью около 17 и 34 ГПа. Регистрация течения проводилась видеокамерой в микроскопическом режиме при короткой лазерной подсветке. Благодаря малой оптической толщине пылевого потока получены спектры частиц примерно на 80 % его высоты, отсчитываемой от фронта потока. Установлено, что при твердом состоянии свинца (17 ГПа) с шероховатой поверхности выбрасываются струи, состоящие из множества частиц; при жидком состоянии свинца (34 ГПа) с поверхности металла выбрасывается множество тонких (от 7 мкм) микрокумулятивных струй, которые со временем распадаются на частицы.

Введение

При выходе сильной ударной волны (УВ) на свободную поверхность (СП) конденсированного материала происходит выброс частиц материала с поверхности. Этот процесс еще называют пылением материала. Причины выброса частиц связывают, в частности, с развитием неустойчивости Рихтмайера – Мешкова [1, 2], с микрокумуляцией, возникающей на неоднородной свободной поверхности материала под действием ударно-волновых процессов. Размер частиц пыли составляет от единиц до сотен микрон, а их скорости – несколько километров в секунду. Эти частицы могут отрицательно влиять на работу мишеней инерциального термоядерного синтеза. Процесс пыления сложен и недостаточно изучен. Исследователи пытаются разработать математические модели для его расчета. Для тестирования моделей требуются экспериментальные данные.

Применяются различные лабораторные методы экспериментального исследования процесса пыления:

- метод индикаторной фольги [3]: по деформации и смещению фольги, на которую действуют частицы, определяют массу и скорость потока частиц;
- рентгенографический [4]: по рентгенограмме определяют суммарную массу частиц и плотность их пространственного распределения;

- фотографический и макроскопический [5]: позволяет наблюдать фронт пыли, определять его скорость по фотографии течения;
- голографический [6]: основан на использовании приемов лазерной когерентной оптики, при помощи которой получают интерференционную картину течения и расчетным способом определяют размеры частиц;
- метод пьезоэлектрического датчика [7]: измеряют профиль давления при торможении частиц пыли на датчике и по расчетному импульсу определяют массу пыли;
- PDV [8]: основан на непрерывной регистрации скорости потока частиц лазерным гетеродин-интерферометром.

Ни один из указанных методов не позволяет напрямую визуализировать размеры движущихся частиц пыли на уровне единиц микрометров и установить закономерности их динамики. Размер частиц определяют, например, по точкам осредненной траектории их движения [5], восстанавливают голографическим методом или вычисляют по кривой их торможения в газе [8]. Авторами статьи разработан микроскопический электронно-оптический метод [9], которым можно регистрировать в эксперименте движущиеся частицы пыли размером от 4 мкм и выше. Метод основан на видеорегистрации течения через оптическую систему с большим коэффициентом увеличения при короткой лазерной подсветке. Метод микроскопической регистрации давно применяется в различных областях исследований для регистрации преимущественно низкоскоростных течений [10]. Метод адаптирован авторами статьи для исследования быстропротекающего процесса – пыления [9].

Некоторые результаты исследования этим методом процесса пыления металлов и жидкостей приведены в работах [11, 12]. Спектр частиц определялся в оптически прозрачной верхней части широкого (30 мм) потока (на высоте пылевого потока примерно 30 %). В этих работах, в частности, показано, что с уменьшением шероховатости поверхности и (или) с увеличением интенсивности УВ спектр частиц смещается в сторону меньших размеров, а с поверхности жидкости изначально выбрасываются тонкие микрокумулятивные струи, которые со временем распадаются на капли. Для тестирования расчетных методик требуются данные о структуре пылевого потока по всей его высоте и закономерностях пыления твердого и жидкого металла. Такие данные можно получить микроскопическим методом при выбросе частиц с узкой (0,2–0,8 мм) шероховатой полоски на поверхности металла, потому что поток частиц в этом случае разрежен и оптически прозрачен по высоте.

В работе [13] выброс частиц в низкий вакуум и сжатый гелий (давление 0,3–1,3 атм) из отдельной канавки, расположенной на поверхности образца из олова, исследовался голографическим методом. В поперечном сечении канавка имела форму треугольника высотой 40 мкм с углом раствора 120°. Интенсивность УВ составляла $p \approx 30$ ГПа. Олово после прохождения волны было в жидком состоянии. В этой работе по голограммам выполнен расчет размеров частиц (2–15 мкм), построен их спектр. На обработанной голограмме хорошо видны отдельные частицы в средней и в верхней частях пылевого потока. В нижней части, возле СП, пыль регистрируется в виде сетки, что связано, по-видимому, с процедурой обработки.

В настоящей работе представлены результаты исследования микроскопическим электронно-оптическим методом процесса пыления с узкой (0,2–0,8 мм) шероховатой полоски на образце свинца марки С1 при твердом ($p \approx 17$ ГПа) и жидком ($p \approx 34$ ГПа) состояниях свинца. Выброс частиц происходил в низкий вакуум (0,05 атм).

Техника экспериментов

Экспериментальное устройство, в которое устанавливались образец свинца и взрывчатое вещество (ВВ), представлено на рис. 1. Использовались образцы диаметром 36 мм и толщиной 1 мм. Передняя (свободная) поверхность образца имела шероховатость $Ra \leq 0,1$ мкм (зеркало), задняя поверхность – $Ra \leq 5$ мкм. Узкая ($b = 0,2-0,8$ мм) шероховатая полоска наносилась на переднюю поверхность образца (свободную) на специальном станке-манипуляторе и состояла из периодических двумерных возмущений (из трех канавок). В одних опытах полоска пересекала весь образец, в других – доходила лишь до центра (см. рис. 1, варианты А-1, А-2). Это сделано специально для того, чтобы исследовать пыление с шероховатой и зеркальной поверхностями в одном эксперименте. Полная амплитуда возмущений на полоске $\Delta = Rz$ варьировалась примерно от 20 до 80 мкм, длина волны – примерно от 80 до 300 мкм. На заднюю поверхность образца устанавливалась стальная подложка толщиной 0,5 мм. На подложку крепилось твердое ВВ. К верхнему торцу устройства крепился репер. В качестве репера использовалось оптоволокно диаметром 123 или 230 мкм. Экспериментальное устройство помещалось в герметичную камеру с двумя оптически прозрачными стеклами.

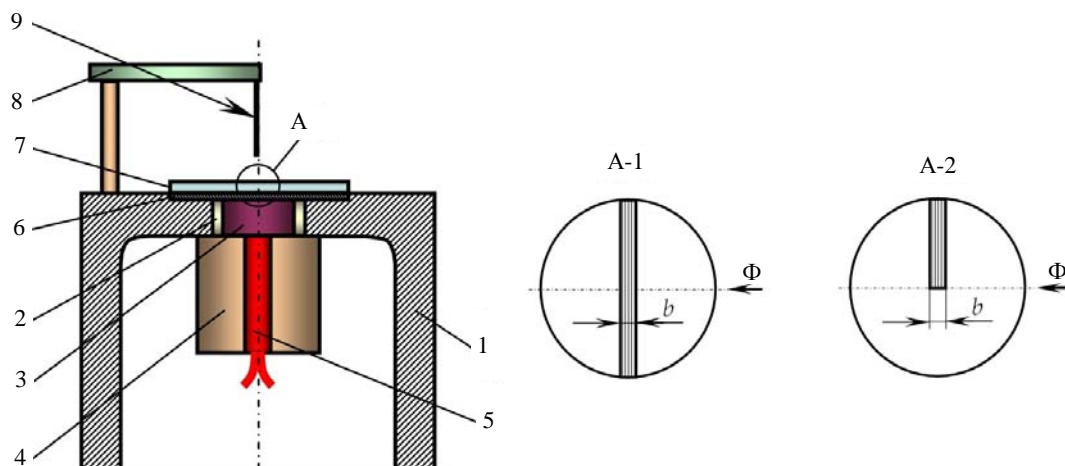


Рис. 1. Схема экспериментального устройства: 1 – корпус (сталь), 2 – втулка (фторопласт), 3 – ВВ, 4 – розетка, 5 – детонатор, 6 – подложка (сталь), 7 – образец свинца, 8 – подставка репера, 9 – репер; Φ – направление регистрации

Интенсивность УВ изменялась путем вариации массы ВВ. Давление во фронте УВ и скорость СП определялись в двумерных численных расчетах.

На рис. 2 (см. также цв. вкл.) и 3 представлены характерная фотография образца и профилограмма шероховатой поверхности, полученные на лазерном профилометре.

Регистрация процесса пыления проводилась CCD-видеокамерой через систему с коэффициентом оптического увеличения $k = 30$ при короткой (менее 7 нс) лазерной подсветке [9]. Размер пикселя CCD-видеокамеры составлял ≈ 7 мкм.

Схема регистрации представлена на рис. 4. Короткофокусный телескоп ($f = 60-70$ мм) был смонтирован из объектива и окуляра от оптического микроскопа.

Для подсветки течения применялся двухимпульсный лазер с длиной волны излучения 532 нм.

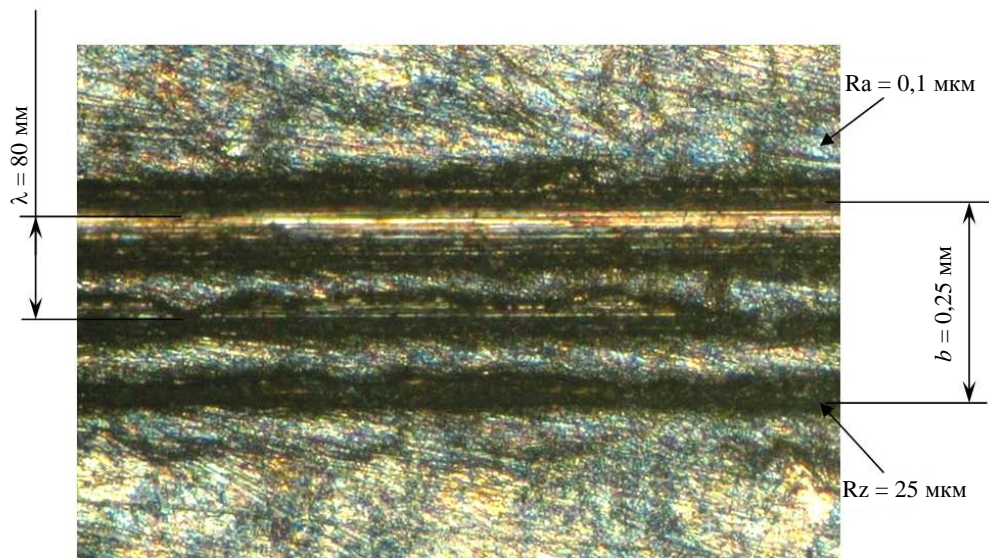


Рис. 2. Фотография поверхности образца

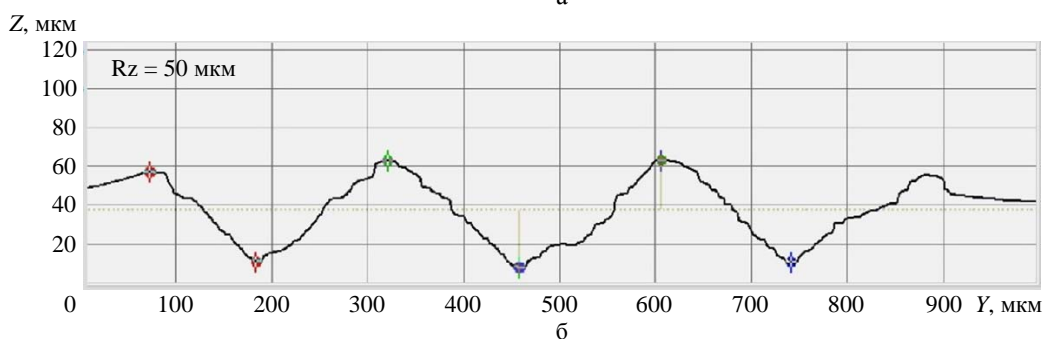
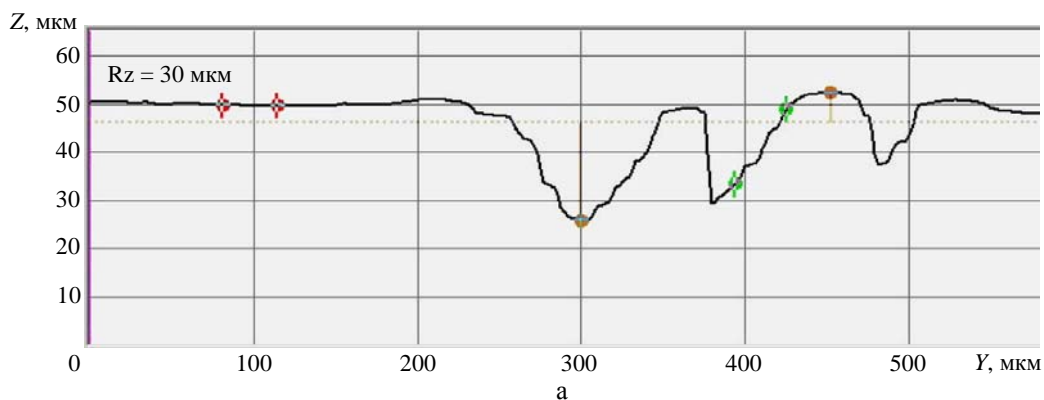


Рис. 3. Характерные профилограммы поверхностей образцов

Разрешение системы регистрации определялось по видеокадрам оптического эталона («миры» № 1) и металлического порошка с зерном 3–10 мкм (рис. 5). При $k = 30$ система разрешает частицы размером от 4 мкм и выше, глубина резкости $\approx 0,2 \text{ мм}$. Фокус оптической системы настраивался на репер, установленный по центру ширины полоски. В опыте регистрировалось одно или два изображения процесса пыления.

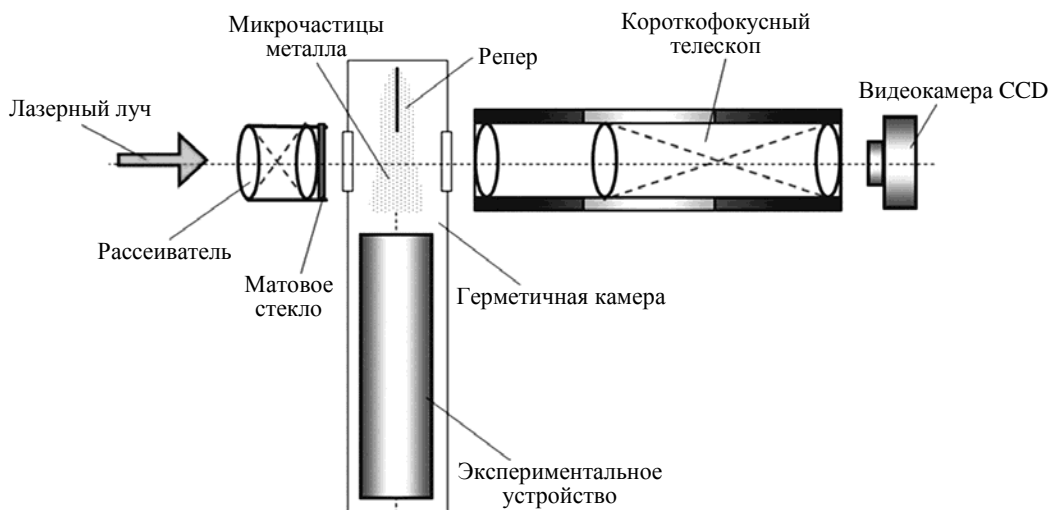


Рис. 4. Схема регистрации процесса пыления микроскопической видеосъемкой

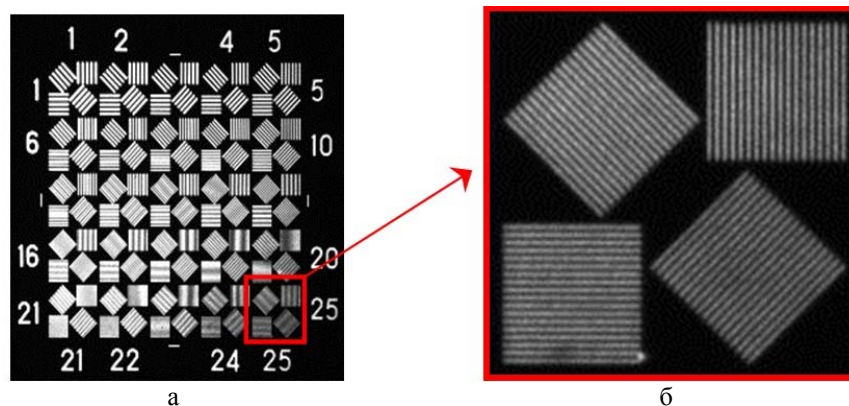


Рис. 5. Снимок «миры» № 1 (а) и увеличенный квадрат 25 «миры» (б) при $k = 30$ (расстояние между линиями квадрата 25 равно 5,2 мкм)

В табл. 1 представлены некоторые условия проведения экспериментов.

Таблица 1

Условия проведения экспериментов

Номер опыта	f , мм	b , мм	Rz, мкм	λ , мкм	t_1 , мкс	t_2 , мкс	P , ГПа	Схема образца
1	5	0,4	40	100	6,36	7,38	17	А-2
2	4,5	0,35	30	100	4,8	6,8	17	А-2
6	17,5	0,8	50	300	10,7	–	34	А-1
7	17,5	0,2	20	80	10,45	11,2	34	А-2
8	10	0,2	30	140	7,5	8,3	34	А-1

Обозначения: f – расстояние от начального положения СП до репера; b – ширина полосы; Rz – шероховатость поверхности; λ – длина волны возмущения; t_1 , t_2 – время регистрации первого и второго видеокадров от подачи импульса на капсуль-детонатор.

Результаты экспериментов

На рис. 6–8 приведены характерные видеокadres процесса выброса частиц со СП свинца. На всех этих рисунках время отсчитывается от прихода импульса на подрыв детонатора, штриховая горизонтальная линия – расчетное положение СП. На представленных видеокadres разрешается $\approx 80\%$ высоты пылевого потока. Согласно результатам расчета из работы [14] при $p = 17$ ГПа после прохождения УВ свинец находился в твердом состоянии, при $p = 34$ ГПа – в жидком.

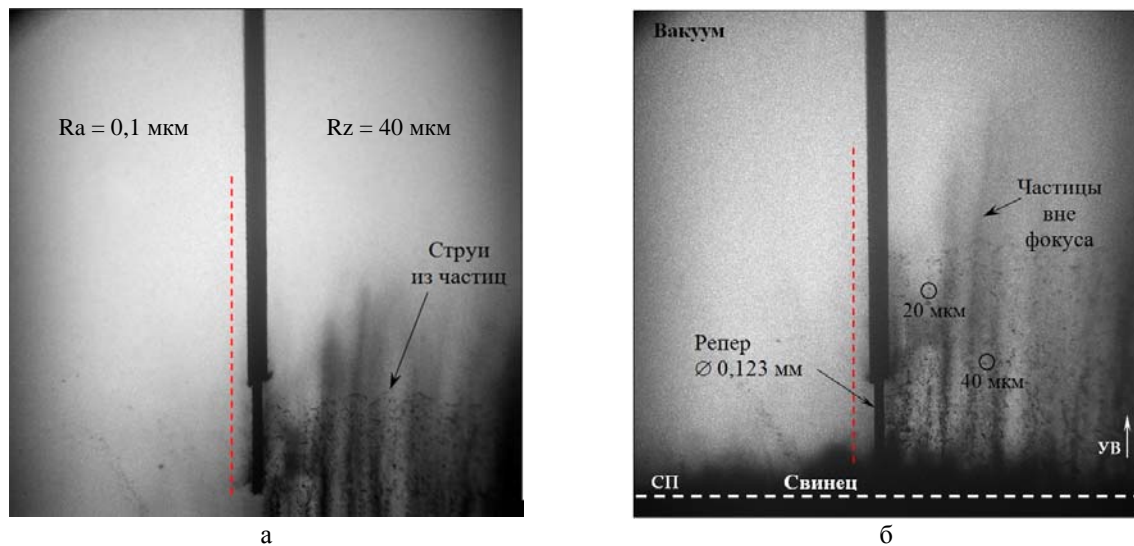


Рис. 6. Видеокadres выброса частиц с поверхности свинца в опыте № 1 ($p = 17$ ГПа):

а – $t_1 = 6,36$ мкс, б – $t_2 = 7,38$ мкс

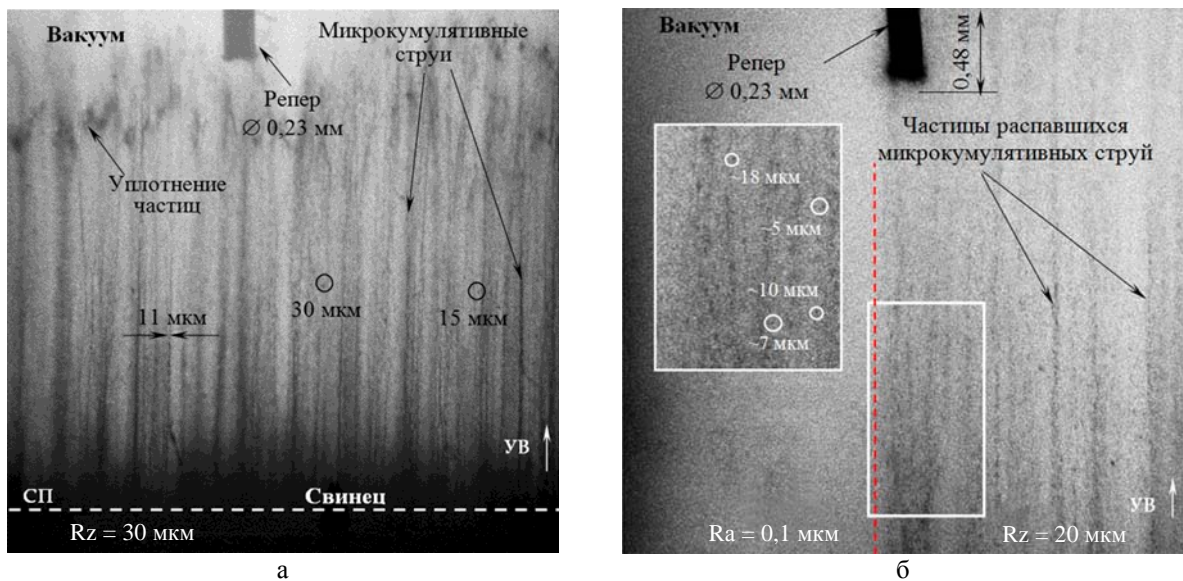


Рис. 7. Видеокadres выброса частиц с поверхности свинца: а – опыт № 8, $Rz = 30$ мкм, $p = 34$ ГПа, $\lambda = 140$ мкм, $b = 0,2$ мм, $t_1 = 7,5$ мкс; б – опыт № 7, $Ra = 0,1$ мкм/ $Rz = 20$ мкм, $p = 34$ ГПа,

$\lambda = 80$ мкм, $b = 0,2$ мм, $t_1 = 10,45$ мкс

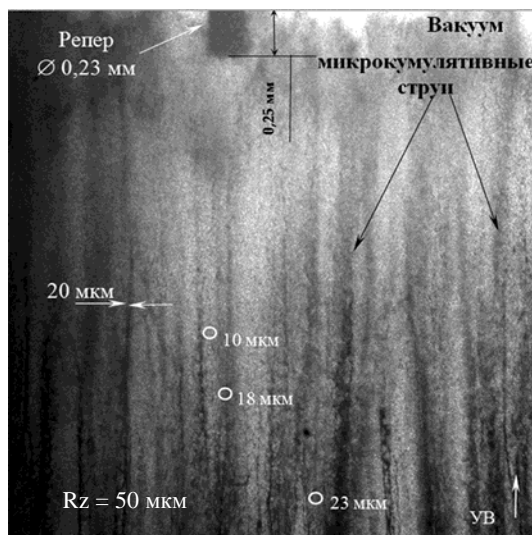


Рис. 8. Видеокадр выброса частиц с поверхности свинца: опыт № 6,
 $R_z = 50$ мкм, $p = 34$ ГПа, $\lambda = 300$ мкм, $b = 0,8$ мм, $t_1 = 10,7$ мкс

По видеокадрам видно, что в том и другом случаях с шероховатой поверхности выбрасываются кумулятивные струи. При твердом состоянии свинца струи являются дискретными: они состоят из отдельных твердых частиц (см. рис. 6); при жидком состоянии свинца струи изначально сплошные и тонкие (от 7 мкм), но со временем они распадаются на частицы (см. рис. 7, 8). Механизм образования кумулятивных струй известен (см., например, работу [15]). При пылении он связан с течениями материала с боковых поверхностей возмущений (из-за возникающего градиента давления на СП при прохождении УВ и волны разгрузки) и последующим высокоскоростным соударением этих течений, а также с захлопыванием микропор.

На зеркальной поверхности металла процесс пыления также развивается, но протекает менее интенсивно (см. рис. 6 и 7,б на участке с $R_a = 0,1$ мкм). Пылевой поток на этой поверхности регистрируется в виде невысокого туманного облака, микрокумулятивные струи не наблюдаются. Это свидетельствует о том, что здесь частицы в основном мелкие (менее 5 мкм). Они образуются, по-видимому, из-за неоднородностей металла.

Видеокадры обрабатывались по специальной математической программе, которая определяла площадь изображения частиц, лежащих в фокусе оптической системы (т. е. частиц с гистограммой почернения, близкой к гистограмме репера). На рис. 9,а показано изображение частицы, полученной в эксперименте, на рис. 9,б – обработанной по программе. Видно, что площадь обработанной частицы меньше необработанной. Это связано с тем, что программа убирает полутона, связанные со статической и кинематической нерезкостью и с цифровым шумом матрицы видеокамеры, с отражением света частицами.

Диаметр частицы d определялся по площади ее изображения и масштабировался на размер репера. По результатам метрологической экспертизы относительная погрешность измерения диаметра частицы составляет 17 %. (Подробное изложение алгоритмов программы выходит за рамки данной работы.)

В табл. 2 представлены размеры и количество частиц в некоторых экспериментах. Частицы сгруппированы по диаметрам в интервалах $d_H = 5-7$ мкм, $7-8$ мкм и т. д. Полученные данные коррелируют с данными работы [13], но в наших экспериментах частицы несколько крупнее, чем в [13], и возле СП свинца не наблюдается сетчатой структуры.



а



б

Рис. 9. Изображение частицы на видеокадре (а) и изображение частицы, обработанной по программе (б)

Таблица 2

Размеры и количество частиц в опытах

Опыт № 1		Опыт № 2		Опыт № 6		Опыт № 7		Опыт № 8	
d_H , мкм	n , шт.	d_H , мкм	n , шт.	d_H , мкм	n , шт.	d_H , мкм	n , шт.	d_H , мкм	n , шт.
5–7	10	5–7	3	4–5	334	4–5	288	4–5	1295
7–10	25	7–10	258	5–6	88	5–6	85	5–6	356
10–12	19	10–12	77	7–8	54	6–7	34	6–7	117
12–15	63	12–15	122	8–9	31	7–8	15	7–8	77
15–20	102	15–20	151	9–10	25	8–9	14	8–9	82
20–25	75	20–25	60	9–10	14	9–10	6	9–10	38
25–30	45	25–30	23	10–11	17	10–11	1	10–11	41
30–50	42	30–50	33	11–12	9	11–12	3	11–12	32
50–70	1	50–70	6	12–13	8	12–13	3	12–13	24
70–80	1	70–80	14	13–14	4	13–14	2	13–14	15
–	–	–	–	14–15	6	14–15	1	14–15	9
–	–	–	–	15–16	3	19–20	2	15–16	11
–	–	–	–	16–17	4	20–25	1	16–17	10
–	–	–	–	17–18	4	–	–	17–18	7
–	–	–	–	18–19	3	–	–	18–19	11
–	–	–	–	19–20	3	–	–	19–20	5
–	–	–	–	20–25	6	–	–	20–25	22
–	–	–	–	25–30	3	–	–	25–30	14
–	–	–	–	30–35	5	–	–	30–35	9
–	–	–	–	35–40	1	–	–	35–40	6
–	–	–	–	40–45	2	–	–	40–45	5
–	–	–	–	45–50	0	–	–	45–50	3
–	–	–	–	50–60	2	–	–	50–60	2
–	–	–	–	–	–	–	–	70–80	1
$d_c = 20$ мкм		$d_c = 16$ мкм		$d_c = 6,6$ мкм		$d_c = 5,1$ мкм		$d_c = 6$ мкм	

Обозначения: d_H – интервал диаметров частиц, d_c – средний размер частиц, n – количество частиц в данном интервале.

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 -м интервале диаметров с учетом количества в предыдущем интервале. В указанном интервале могло находиться различное количество частиц (например, в интервале 7–8 мкм могло быть несколько частиц размерами 7; 7,1; 7,2; ...; 7,9 мкм).

На рис. 10 представлено распределение частиц по размерам. Видно, что с увеличением интенсивности УВ спектр частиц смещается в сторону меньших размеров. При твердом состоянии свинца средний размер частиц при $Rz = 40$ мкм составляет 20 мкм, при $Rz = 30$ мкм – около 16 мкм.

При жидком состоянии свинца средний размер частиц пыли при $Rz = 20$ и 50 мкм примерно одинаков и составляет 6 мкм. Зависимости $R(d)$ при $d < 4$ мкм получены при помощи аппроксимации экспериментальных данных математическими функциями.

На рис. 11 приведены полученные в экспериментах $X(t)$ -диаграммы движения осредненного фронта потока пыли и СП. Точка на оси t соответствует расчетному выходу УВ на свободную поверхность образца. Погрешность измерения положения фронта пыли составляет $\Delta X = \pm 0,3$ мм, времени – $\Delta t = \pm 0,1$ мкс. Средняя скорость фронта пыли при $p = 17$ ГПа составляет $u_{\text{п}} = 2,1$ мм/мкс, скорость СП – $u_{\text{СП}} = 1,2$ мм/мкс; при $p = 34$ ГПа – $u_{\text{п}} = 2,7$ мм/мкс, $u_{\text{СП}} = 1,85$ мм/мкс.

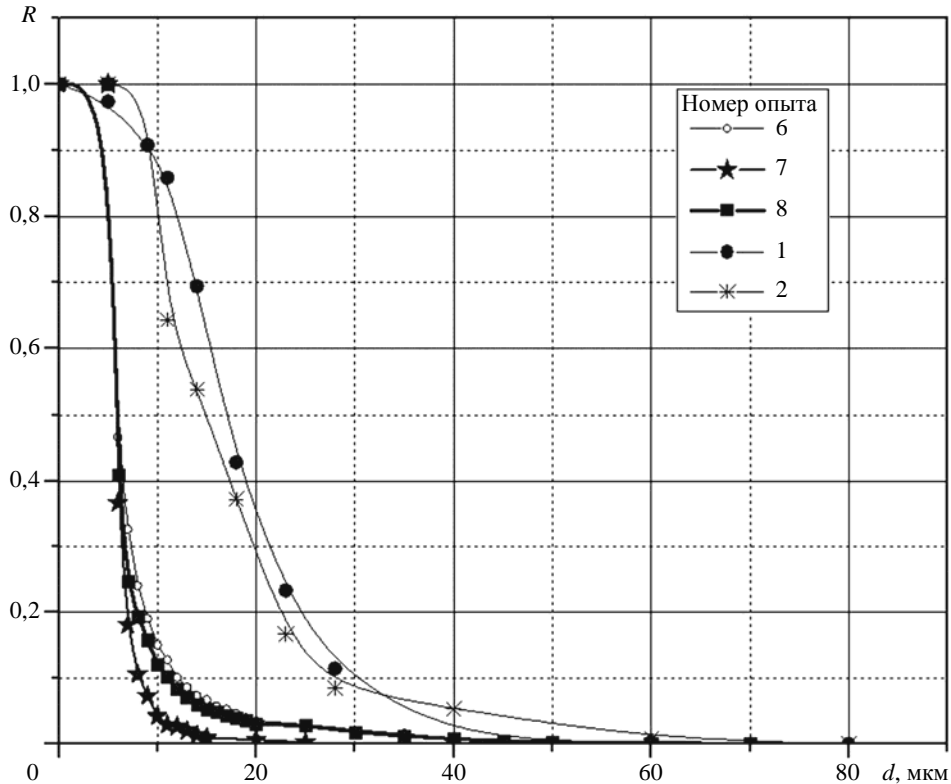
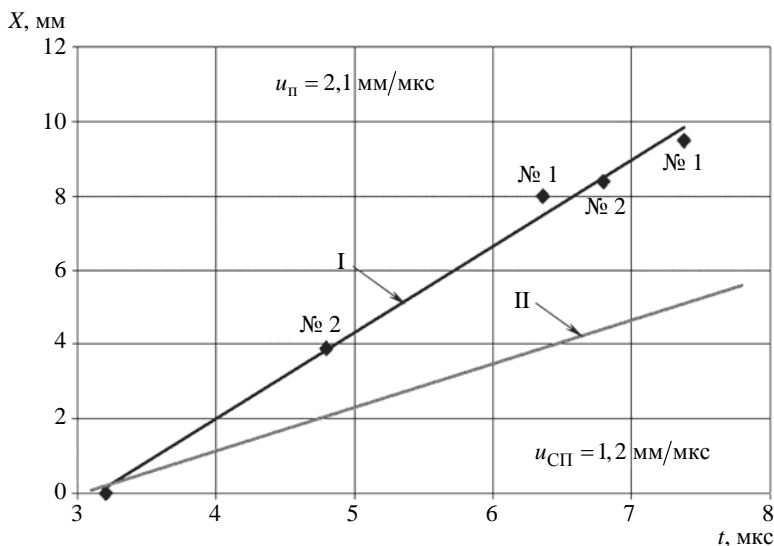
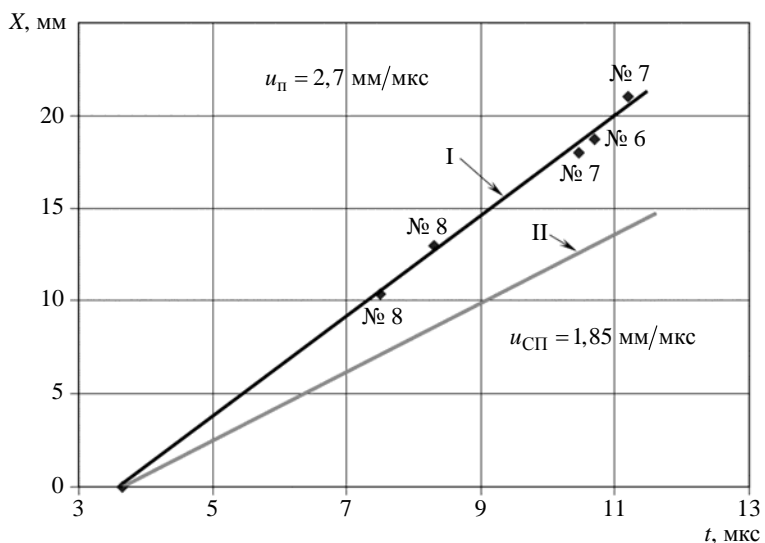


Рис. 10. Распределение частиц пыли по размерам



а



б

Рис. 11. $X(t)$ -диаграммы фронтов пыли и свободной поверхности. Значки: а – опыты при $p = 17$ ГПа; б – опыты при $p = 34$ ГПа, I – положение фронта пыли (линейная аппроксимация экспериментальных значений), II – расчетное положение свободной поверхности образца

Выводы

При ударно-волновом пылении с шероховатой поверхности твердого свинца выбрасываются струи, состоящие из отдельных частиц; в случае плавления свинца после воздействия ударной волны с поверхности выбрасываются сплошные микрокумулятивные струи, которые со временем распадаются на частицы.

При твердом состоянии свинца средний размер частиц при $p = 17$ ГПа и $Rz = 30-40$ мкм составляет 18 мкм, при жидком – примерно равен 6 мкм в диапазоне $Rz = 20-50$ мкм и при $p = 34$ ГПа.

С зеркальной поверхности металла выбрасываются отдельные мелкие частицы (менее 4–5 мкм), процесс пыления здесь идет менее интенсивно, чем с шероховатой поверхности.

Список литературы

1. Richtmyer R. D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids // Commun. Pure Appl. Math. 1960. Vol. 13. P. 297.
2. Мешков Е. Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной // Изв. АН СССР. Сер. Механика жидкости и газа. 1969. № 5. С. 151–158.
3. Asay J. R., Mix L. P., Perry F. C. Ejection of material from shocked surfaces // Appl. Phys. Lett. 1976. Vol. 29, N 5. P. 284–287.
4. Антипов М. В., Георгиевская А. Б., Игонин В. В. и др. Результаты исследований процесса выброса частиц со свободной поверхности металлов под действием ударной волны // Тр. XVII Международ. конф. «Харитоновские тематические научные чтения». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. С. 702–709.
5. Огородников В. А., Иванов А. Г., Михайлов А. Л. и др. О выбросе частиц со свободной поверхности металлов при выходе на нее ударной волны и методах диагностики этих частиц // ФГВ. 1998. Т. 34, № 6. С. 103–107.
6. Sorenson D. S., Minich R. W., Romero J. L. et al. Ejecta particle size distributions for shock loaded Sn and Al metals // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 92, N 10. P. 5830.
7. Butler W. T., Zeliner M. B., Olson R. T. et al. Dynamic comparisons of piezoelectric ejecta diagnostics // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 101. P. 063547.
8. Федоров А. В., Михайлов А. Л., Финюшин С. А. и др. Исследование особенностей поведения свинца при ударно-волновом нагружении и последующей разгрузке // Тр. XV Международ. конф. «Харитоновские тематические научные чтения». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. С. 274–282.
9. Пат. на полезную модель RU № 139204 U1. Устройство для регистрации микронных частиц в газодинамическом потоке / С. А. Абакумов, О. Л. Кривонос, Н. В. Невмержицкий, А. В. Руднев, Е. А. Сотсков, Е. Д. Сеньковский, Л. В. Точилина, С. В. Фролов // Зарегистр. 13.03.2014.
10. Дубовик А. С. Фотографическая регистрация быстротекущих процессов. – М.: Наука, 1975.
11. Невмержицкий Н. В., Михайлов А. Л., Раевский В. А. и др. Микроскопическая электронно-оптическая регистрация процесса выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженного свинца // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теор. и прикл. физика. 2010. Вып. 3. С. 3–6.
12. Невмержицкий Н. В., Сотсков Е. А., Сеньковский Е. Д. и др. Микроскопическая электронно-оптическая регистрация процесса выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженных металлов и жидкостей // Тр. XV Международ. конф. «Харитоновские тематические научные чтения». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2013. С. 655–661.

13. Sorenson D. S., Pazuchanics P., Johnson R. et al. Ejecta particle-size measurements in vacuum and helium gas using ultraviolet in-line fraunhofer holography. Los Alamos National Laboratory. Report No. LA-UR-14-24722. 2014. P. 22.
14. Копышев В. П., Медведев А. Б. Термодинамическая модель сжимаемого коволюма. – Саров: ВНИИЭФ, 1995. С. 58–120.
15. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. – М.: Физматлит, 2004.

Some Peculiarities of Particle Ejection from Surface of Shock Loaded Lead Sample

N. V. Nevmerzhitkiy, V. A. Raevskiy, E. A. Sotskov, E. D. Senkovskiy, N. B. Davydov,
E. V. Bodrov, S. V. Frolov, K. V. Anisiforov, A. B. Georgievskaya, E. V. Levkina,
O. L. Krivonos, A. S. Kuchkareva, A. R. Gavrish, B. I. Tkachenko

The results of experimental study of particle ejection from the surface of shock loaded lead sample are presented. The ejection was occurred in the low vacuum (0.05 atm) from the narrow (0.2–0.8 mm) rough (Rz20–Rz50) sample surface under the shock wave with intensity of $P \approx 17$ GPa and $P \approx 34$ GPa. The flow was recorded by video filming in microscopic mode at short laser lighting. Due to small optic width of the ejecting particle flow, the particle distributions were obtained almost in 80 % of the flow height counted from the flow front. It was determined that the jets consisted of multiple particles were ejected from the rough surface of lead in a solid phase ($P \approx 17$ GPa), and when lead was in a liquid phase, the plenty of thin (from 7 μm) microcumulative jets were ejected from the metal surface, and in time these jets were splitted into the particles.