

## РЕГИСТРАЦИЯ ВЫБРОСА ЧАСТИЦ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ УДАРНО-НАГРУЖЕННЫХ ОБРАЗЦОВ

*В. А. Огородников\**, *А. Л. Михайлов*, *В. В. Бурцев*, *С. А. Лобастов*, *С. В. Ерунов*,  
*А. В. Романов*, *А. В. Руднев*, *Е. В. Кулаков*, *Ю. Б. Базаров*, *В. В. Глушихин*,  
*И. А. Калашник*, *В. А. Цыганов*, *Б. И. Ткаченко*

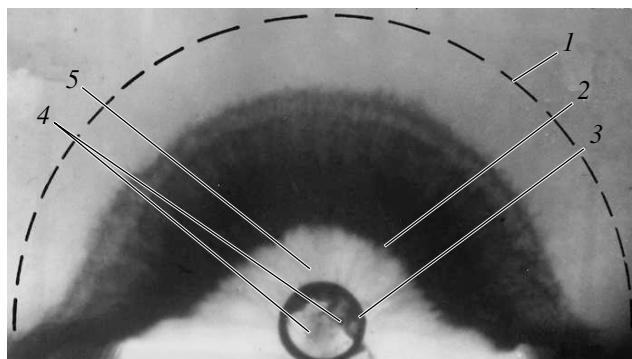
*РФЯЦ-ВНИИЭФ, Институт экспериментальной газодинамики и физики взрыва  
607190, Саров, Нижегородская обл., Россия*

Поступила в редакцию 13 апреля 2009 г.

С использованием высокоскоростной электронно-оптической камеры с ПЗС-матрицей и импульсной лазерной подсветки с длительностью импульса 4 нс теневым методом удалось визуализировать детали процесса выброса частиц размерами 20–200 мкм со скоростями 1.0–1.5 км/с с поверхности образцов из свинца и стали с шероховатостью от 5 до 40 мкм ( $Rz\ 5$ – $Rz\ 40$ ) при выходе на нее ударных волн с амплитудой 15 и 27 ГПа и получить их распределение по размерам и скоростям.

PACS: 52.35.Tc, 52.70.Nc

Несмотря на давнюю историю, вопрос об исследовании эффектов, сопровождающих процесс выхода ударной волны на свободную поверхность образца, вызванный, в частности, выбросом (ejection) частиц [1–9], по-прежнему остается актуальным. Это связано с тем, что локальный выброс частиц с поверхности образца может быть нежелательным для теневых, электроконтактных, емкостных методов регистрации [10] и интерферометрических измерений тонкой структуры профилей скорости поверхности ударно-нагруженных образцов [2], а также в ряде физических процессов, обусловленных, например, газодинамическим сжатием плазмы применительно к проблеме инерциального термоядерного синтеза [11, 12]. Пренебрежение эффектом выброса частиц со свободной поверхности при выходе на нее ударной волны определенной интенсивности может в ряде случаев заметно повлиять на интерпретацию полученных результатов. На рис. 1 в качестве примера иллюстрируется масштаб влияния эффекта, связанный с выбросом частиц с внутренней границы полуцилиндрической оболочки из свинца (2), разгоняемой с помощью продуктов взрыва, в одном из устройств, аналогичных используемым для сжатия газа до высоких давлений [5]. В центре этого устрой-



**Рис. 1.** Рентгенограмма процесса выброса частиц [5]: 1 — начальное положение оболочки; 2 — полуцилиндрическая оболочка из свинца; 3 — цилиндрическая оболочка из стали; 4 — отколы, струи; 5 — газ

ства расположен экран в виде цилиндрической оболочки из стали (3) с наружным радиусом 13 мм и толщиной стенки 2.5 мм. Штрихами на рентгенографическом снимке обозначено начальное положение оболочки (1). Видно, что частицы сильно засоряют газ (5) и пробивают экран до подлета к нему внутренней границы сходящейся оболочки (2).

\*E-mail: root@gdd.vniief.ru

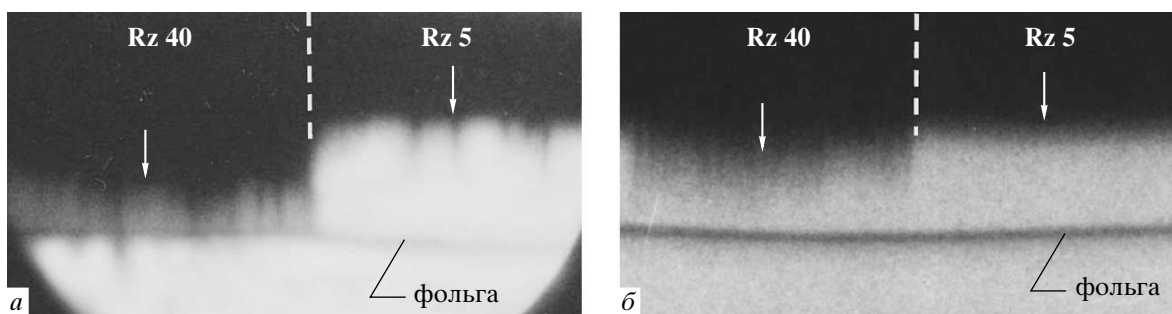


Рис. 2. Фотохронограмма (а) и рентгенограмма (б) процесса выброса частиц (стрелка указывает направление их скорости)

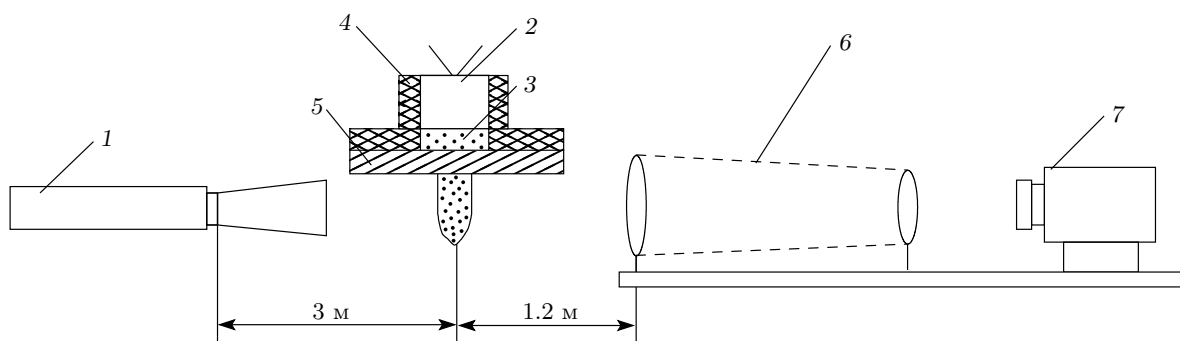


Рис. 3. Схема эксперимента: 1 — импульсный лазер ОИГ-50; 2 — электродетонатор; 3 — заряд ВВ; 4 — втулка под электродетонатор и ВВ; 5 — образец из стали или свинца толщиной соответственно 4.5 или 8.0 мм; 6 — телескопическая система; 7 — высокоскоростная камера с ПЗС-матрицей

Если качественная картина и кинематические характеристики эффекта выброса частиц со свободной поверхности или микроструеобразования, обусловленные ее шероховатостью, дефектностью образца или реализацией микроотколов, хорошо известны, то его количественные параметры, связанные с распределением частиц по размерам и скоростям, в том числе их зависимость от шероховатости свободной поверхности, амплитуды ударной волны, структуры и физико-механических свойств материалов, менее исследованы. Это препятствует построению физически обоснованных математических моделей, используемых для описания процесса. Анализ попыток моделирования процесса выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженных материалов свидетельствует о необходимости получения дополнительных экспериментальных данных [9] с привлечением новых методик. Так, многие известные методы, например, с использованием голографической диагностики, разрешающая способность которой составляет 1 мкм [4, 6], не нашли широкого применения из-за технических трудностей при постановке

таких экспериментов и сложности цифровой обработки при восстановлении объемного изображения исследуемых процессов.

Несостоятельным оказался и метод индикаторных фольг [2], направленный на получение количественных данных о массе или плотности потока частиц, поскольку для металлических частиц размером  $d = 10\text{--}100$  мкм при их скоростях 1–10 км/с основное допущение [2] об упругом взаимодействии частиц с индикаторными фольгами оказалось неоправданным. Проведенные нами исследования свидетельствуют о том, что индикаторные фольги из свинца, меди и стали толщиной от 0.05 до 0.5 мм пробиваются высокоскоростными частицами, не оказывая им заметного сопротивления. Это говорит о некорректности их использования для исследования массы и импульса потока частиц.

Использование метода измерения параметров давления в преграде, установленной на пути потока частиц, с помощью пьезоэлектрических датчиков также содержит много упрощающих предположений [3, 7] и не дает информации о распределе-

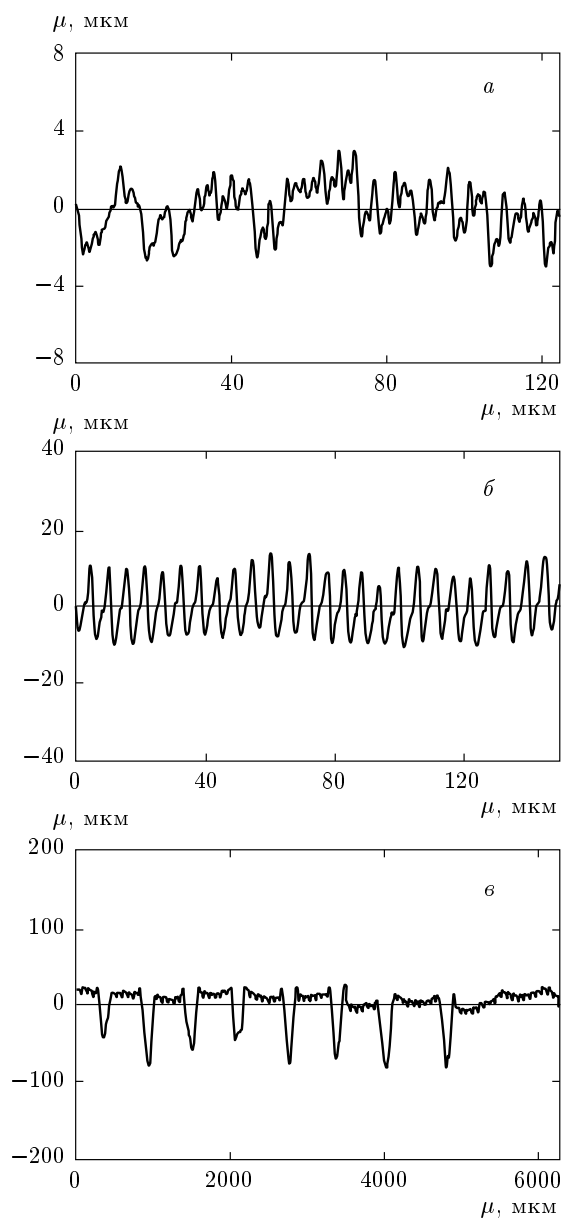


Рис. 4. Профили поверхности с шероховатостями Rz 5 (а), Rz 20 (б) и Rz 40 (в)

нии частиц по размерам и скоростям. Реализация метода сохранения частиц, выброшенных со свободной поверхности мишени [8], состоящего в их улавливании экраном из мягкого материала, возможна только в случае нагружения образца под действием энергии микровзрыва или лазерного излучения, при которых не происходит разрушения улавливающего экрана. Метод сохранения позволяет оценить массу потока частиц, выброшенных со свободной поверхности образца, однако его разрешающая способность ограничена размером частиц  $d_{min} \geq 10$  мкм, а так-

же отсутствует возможность регистрации скорости отдельных частиц.

Эффект выброса частиц со свободной поверхности металлических образцов при выходе на нее ударной волны был обнаружен и исследован сотрудниками ВНИИЭФ еще в 50-е годы, хотя отдельные результаты этих и дополнительных исследований были опубликованы значительно позже [5]. Исследования проводили на плоских или цилиндрических образцах, выполненных из различных металлов (алюминия, меди, стали, свинца), при давлении 50–70 ГПа на фронте ударной волны. В опытах использовали, как правило, фотохронографическую или рентгенографическую методики регистрации. Поток частиц металла перед свободной поверхностью образца определяли по плотности почернения фотографической или рентгеновской пленки с известной характеристической кривой. На рис. 2 приведены типичные фотохронограмма и рентгенограмма одного и того же процесса выброса частиц с ударно-нагруженных участков поверхности свинца, имеющих шероховатость 40 и 5 мкм (Rz 40 и Rz 5), где Rz — средняя высота неровностей профиля по десяти точкам в пределах длины измерений, равной 0.12, 0.16 и 6 мм соответственно для Rz 5, Rz 20 и Rz 40 [13].

Представленные данные свидетельствуют о том, что в обоих случаях можно говорить только о качественной картине процесса и об оценочных значениях его кинематических характеристик. На рис. 2 видно, что регистрируемое изображение исследуемого процесса не контрастно и имеет размытие, связанное с достаточно большим временем экспозиции пленки, которое составляло 0.3 и 0.5 мкс при использовании соответственно рентгенографической и фотохронографической методик регистрации. Поскольку ожидаемые размеры частиц при шероховатости свободной поверхности Rz 5–Rz 40 составляют  $d = 1–100$  мкм [5], а их скорости могут изменяться в диапазоне от 1 до 10 км/с в зависимости от амплитуды ударной волны в образце, временное разрешение методов, используемых для регистрации процесса, как показывают оценки, не должно превышать единиц наносекунд.

В данной работе для регистрации теневого изображения потока частиц со свободной поверхности использовали также теневой метод, но с применением высокоскоростной электронно-оптической камеры с ПЗС-матрицей и импульсной лазерной подсветки с длительностью импульса 4 нс. Схема нагружения образцов и регистрации картины процесса выброса частиц приведены на рис. 3. Ударную волну в образ-

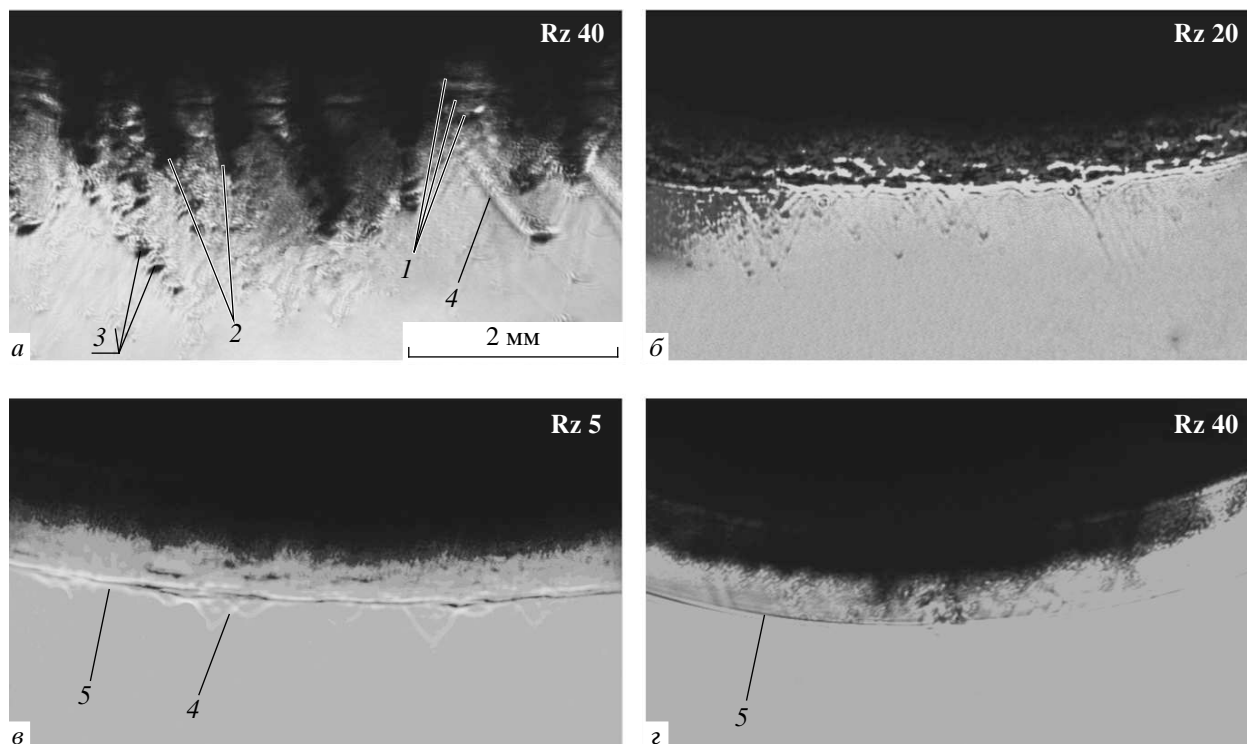


Рис. 5. Фотографии процесса выброса частиц со свободных поверхностей свинца (а, б, в) и стали (г): 1 — отколы; 2 — микроструи; 3 — частицы; 4, 5 — ударная волна в воздухе

цах создавали при контактном подрыве взрывчатого вещества (ВВ), установленного в обойму из фторопласта диаметром 10 мм и длиной 5 мм. Согласно предварительным расчетам, в такой постановке опытов на свободную поверхность образцов из свинца и стали выходит ударная волна с убывающим профилем давления за ее фронтом, имеющая амплитуду на фронте соответственно 15 и 27 ГПа. При этом диаметр поверхности образца, с которой происходил выброс частиц, составил 6 мм.

Исследовали образцы из свинца С1 и стали Ст.3 диаметром 45 мм и толщинами соответственно 8.0 и 4.5 мм. Поверхность образца, с которой происходил выброс частиц, имела шероховатости Rz 5, Rz 20 и Rz 40 для образцов из свинца и Rz 40 мкм для образца из стали. Шероховатости поверхности Rz 5 и Rz 20 задавали в результате токарной обработки материала образцов, а шероховатость Rz 40 создавали путем механического нанесения на полированные поверхности параллельных друг другу канавок глубиной около 40 мкм, длиной 2 мм с шагом 600 мкм. Профили поверхности подготовленных таким образом образцов измеряли с помощью профилографа «Абрис ПМ-7». На рис. 4 приведены результаты измерений.

Для подсветки исследуемого процесса применяли полупроводниковый лазер с длиной волны  $\lambda_0 = 680$  нм, энергией  $E = 45$  мДж и углом расходимости излучения  $\alpha = 30^\circ$ . Для построения увеличенного действительного изображения частиц использовали телескопическую систему, состоящую из объектива и окуляра с фокусными расстояниями соответственно  $F_1 = 750$  и  $F_2 = 75$  мм, что позволило получить при проведении опытов оптическое увеличение  $N = 3$ . Время экспозиции кадра соответствовало длительности лазерного импульса и составляло 4 нс. Разрешающую способность  $\Delta$  и глубину резкости изображения  $T$  выбранной схемы регистрации оценивали по формулам [14]

$$\Delta \geq 1.22 \frac{\lambda_0}{n \sin \alpha} K, \quad T = \frac{\lambda_0}{(n \sin \alpha)^2} \left( \frac{1.22L}{ND} + n \right),$$

где  $n$  — показатель преломления среды, в которой проводятся исследования,  $K$  — диафрагменное число объектива, равное отношению его фокусного расстояния к диаметру,  $L$  — расстояние от первого объектива оптической схемы до мишени,  $N$  — увеличение оптической схемы,  $D$  — диаметр линзы. С учетом используемых значений  $\lambda_0 = 680$  нм,  $n = 1$  (воздух),  $\alpha = 30^\circ$ ,  $K = 8$ ,  $L = 120$  см,  $N = 3$  и  $D = 9.5$  см

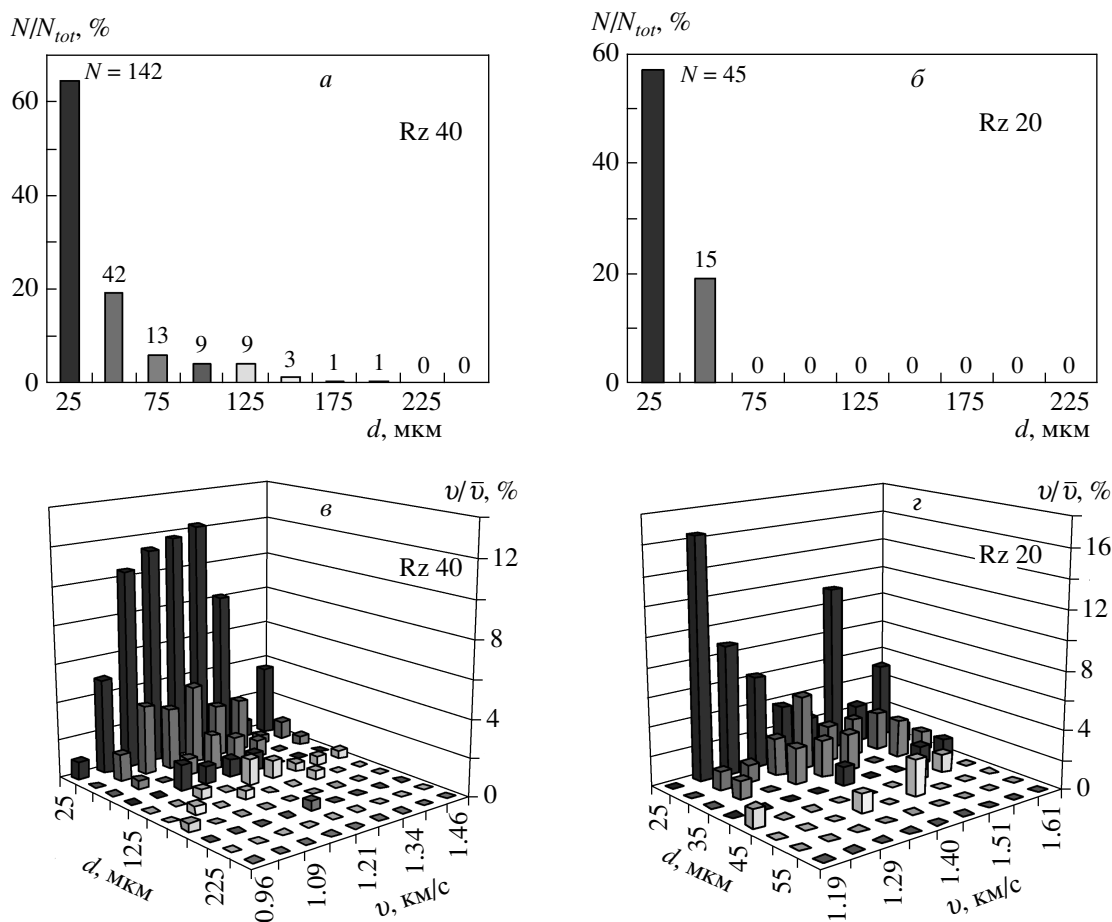


Рис. 6. Распределения частиц по размерам (а,б) и скоростям (в,г);  $N_{tot}$  — полное число частиц,  $\bar{v}$  — их средняя скорость

разрешение выбранной схемы регистрации было не хуже 15 мкм, а глубина резкости изображения составляла около 1.5 мм. Построенное с помощью телескопа изображение регистрировалось с помощью цифровой камеры с ПЗС-матрицей, имеющей пространственное разрешение 2048 × 2048 пикселей при размере матрицы 15 × 15 мм.

Картину выброса потока частиц регистрировали в однокадровом режиме в момент времени, соответствующий смещению свободной поверхности на расстояние 2–3 мм от своего начального положения. На рис. 5 приведены фотографии процесса выброса частиц со свободной поверхности образцов из свинца, имеющих шероховатости Rz 40, Rz 20 и Rz 5, и стали с шероховатостью поверхности Rz 40, снятые в близкие моменты времени после выхода ударной волны на свободную поверхность (соответственно 3.8, 3.6 и 2.7 для свинца и 5.9 мкс для стали). Анализ полученных результатов свидетельствует о сложной каче-

ственной и количественной картинах исследуемого процесса, зависящих как от степени шероховатости свободной поверхности, так и от свойств исследуемых материалов. Наряду с процессами множественных разрушений в виде отколов (1) и микрокумуляции (2) на рис. 5 видны фронты ударных волн в воздухе, которые формируются после их выхода на свободную поверхность образца (5) и при движении отдельных частиц (4). Можно отметить, что при увеличении шероховатости поверхности образцов из свинца от Rz 5 до Rz 40 отдельные частицы опережают фронт основной ударной волны в воздухе, видны фронты ударных волн, которые формируются в результате движения самих частиц или обусловленных ими ударных волн в воздухе. На рис. 5 также видно, что с ростом шероховатости свободной поверхности образцов из свинца увеличивается интенсивность наблюдаемых процессов разрушения из-за множества отколов и струеобразования. При

шероховатости Rz 5 превалирует процесс разрушения в виде отколов. С ростом шероховатости на него накладывается процесс выброса частиц. При шероховатости Rz 40 выброс частиц имеет ярко выраженный микрокумулятивный характер с образованием струй металла. Вершины этих струй теряют устойчивость из-за наличия градиента скорости вдоль оси струй и распадаются на отдельные частицы. Наряду с этим механизмом частицы образуются около слоев в виде отколов за счет фрагментации и диспергирования материала при разрушении. В опытах удалось отчетливо зарегистрировать частицы с минимальным размером 20–30 мкм (рис. 5). Использование телескопической системы с увеличением  $N \geq 10$  позволяет регистрировать частицы с размерами 1–10 мкм.

На рис. 6 приведены результаты обработки фотоснимков в виде распределений частиц по размерам и скоростям, полученных в опытах с образцами из свинца с шероховатостями свободной поверхности Rz 40 и Rz 20. Из рис. 6а,б следует, что при увеличении шероховатости поверхности от Rz 20 до Rz 40 количество выброшенных частиц увеличивается примерно в два раза, а их максимальный размер изменяется от 50 до 200 мкм. Эти результаты указывают на приближенный характер оценок размера  $\Delta$  частиц по величине шероховатости Rz [5]. Анализ зависимости распределения частиц по скоростям, приведенной на рис. 6в,г, свидетельствует о том, что в спектре частиц не наблюдается ярко выраженного распределения по скоростям, что связано, по-видимому, с начальной стадией развития процесса. Из сравнения рис. 5а и 5г видно, что при одинаковой шероховатости образцов из свинца и стали процесс выброса частиц в стали имеет менее выраженный характер и частицы сосредоточены между фронтом ударной волны в воздухе и свободной поверхностью. Это связано, по-видимому, с недостаточно большой амплитудой ударной волны в стали, которая обладает повышенными физико-механическими свойствами (прочностью, температурой плавления).

Таким образом, с использованием выбранной схемы регистрации удалось теневым методом визуализировать детали процесса выброса частиц со свободной поверхности металлических образцов при выходе на нее ударной волны и получить их распределение по размерам и скоростям. С ростом шероховатости свободной поверхности образцов из свинца при фиксированной амплитуде давления на фронте ударной волны, равной примерно 15 ГПа, увеличивается интенсивность наблюдаемых процессов множественного разрушения в виде отколов и струеобразования, происходит увеличение количе-

ства выброшенных частиц и изменение спектра их размеров. При выбранных условиях нагружения наблюдается зависимость интенсивности процесса выброса частиц от физико-механических характеристик материалов.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ в рамках Программы поддержки ведущих научных школ (№ НШ-1307.2008.1).

## ЛИТЕРАТУРА

1. J. M. Walsh, R. G. Shreffler, and F. J. Willing, *J. Appl. Phys.* **24**, 349 (1953).
2. J. R. Asay and L. M. Barker, *J. Appl. Phys.* **45**, 2540 (1974).
3. C. S. Speight, L. Harper, and V. S. Smeeton, *Rev. Sci. Instr.* **60**, 3802 (1989).
4. M. Dunning and B. Jacoby, in *Abstracts of the Fourth Zababakhin Scientific Talks*, Chelyabinsk Region, Russia, October 1995, All-Russian Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, October (1995), p. 16.
5. В. А. Огородников, А. Г. Иванов, А. Л. Михайлов и др., *Физика горения и взрыва* **34**, 103 (1998).
6. D. S. Sorenson, R. W. Minich, J. L. Romero et al., *J. Appl. Phys.* **92**, 5830 (2002).
7. W. S. Vogan, W. W. Anderson, M. Grover et al., *J. Appl. Phys.* **98**, 113508 (2005).
8. T. Resseguier, L. Signor, A. Dragon et al., *J. Appl. Phys.* **101**, 013506 (2007).
9. C. Timothy, A. Germann, G. Dimonte et al., in *7<sup>th</sup> Int. Conf. on New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter*, Estoril, Portugal (2008), p. 48.
10. *Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках*, под ред. М. В. Жерноклетова, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров (2003).
11. S. E. Bodner, *Phys. Rev. Lett.* **33**, 761 (1974).
12. А. С. Козырев, *Газодинамический термоядерный синтез*, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров (2005).
13. В. А. Федоренко, А. И. Шошин, *Справочник по машиностроительному черчению*, Машиностроение, Москва (1981).
14. Г. С. Ландсберг, *Оптика*, Наука, Москва (1976).