



FLUCOME 2009

10th International Conference on Fluid Control, Measurements, and Visualization
August 17–21, 2009, Moscow, Russia

РЕГИСТРАЦИЯ ВЫБРОСА ЧАСТИЦ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ УДАРНО-НАГРУЖЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ТЕНЕВЫМ СПОСОБОМ

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, Саров,
Россия

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты экспериментального исследования процесса выброса частиц со свободной поверхности металлов, после выхода на нее ударной волны. Исследования проведены на образцах из свинца и стали, имеющих шероховатость свободной поверхности Rz 5, Rz 20 и Rz 40. Методом теневой фотографии зарегистрирована качественная картина исследуемого процесса, определены спектр размеров выбрасываемых частиц и их характерные скорости движения.

Ключевые слова: поток частиц, ударные волны, металлы, теневая фотография

1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на давнюю историю, вопрос об исследовании эффектов, сопровождающих процесс выхода ударной волны (УВ) на свободную поверхность (СП) образца, в частности, связанный с выбросом частиц или «ejection» [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 так же в ряде физических процессов, связанных, например, с газодинамическим сжатием плазмы применительно к проблеме инерциального термоядерного синтеза [11, 12]. Неучет эффекта выброса частиц с СП при выходе на нее УВ определенной интенсивности может, в ряде случаев, заметно повлиять на интерпретацию полученных результатов. На рисунке 1, в качестве примера, иллюстрируется масштаб влияния эффекта, связанный с выбросом частиц с внутренней границы полуцилиндрической оболочки из свинца, разгоняемой с помощью продуктов взрыва, в одном из устройств, аналогичных используемым для сжатия газа до высоких давлений [5]. В центре этого устройства расположен экран в виде цилиндрической оболочки из стали с наружным радиусом 13 мм и толщиной стенки 2,5 мм. Пунктиром на рентгенографическом снимке обозначено начальное положение оболочки. Видно, что частицы сильно засоряют газ и пробивают экран до

подлета к нему внутренней границы сходящейся оболочки.

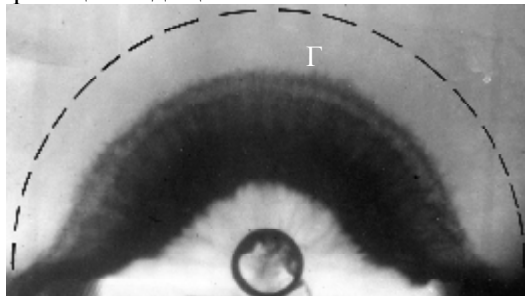


Рис. 1. Рентгенограмма опыта [5]

Если качественная картина и кинематические характеристики эффекта выброса частиц с СП 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, в зависимости от шероховатости СП, амплитуды УВ, 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 с СП ударно-нагруженных материалов свидетельствует о необходимости получения дополнительных экспериментальных данных [9], в том числе, с привлечением новых методик. Так, перспективные методы с использованием голографической диагностики, разрешающая способность которой оценивается в $\Delta \approx 1$ 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. Не состоятельным оказался и метод индикаторных фольг Эсея [2], направленный на получение количественных данных о массе или плотности потока частиц, поскольку для металлических частиц размером $\Delta \approx 10$ -100 мкм при их скоростях 1-10 км/с основное допущение [2] об упругом взаимодействии частиц с индикаторными фольгами оказалось не оправданным. 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 распределении частиц по размерам и скоростям. Реализация метода сохранения частиц, выброшенных с СП мишени [8], который предполагает их улавливание экраном из мягкого материала, возможна только в случае нагружения образца под действием энергии микровзрыва или лазерного излучения, при которых не происходит разрушения улавливающего экрана. Использование метода сохранения позволяет оценить массу потока частиц, выброшенных с СП образца, однако, его разрешающая способность ограничена размером частиц $\Delta_{\min} \geq 10$ мкм, а так же отсутствует возможность регистрации скорости отдельных частиц.

Эффект выброса частиц с СП металлических образцов, при выходе на нее УВ, 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 образцах плоской или цилиндрической геометрии, выполненных из различных металлов (алюминий, медь, сталь, свинец), при давлении на фронте УВ ~ 50 -70 ГПа. В опытах использовали, как правило, фотохронографическую или рентгенографическую методики регистрации. Поток частиц металла впереди СП образца определяли по плотности почернения фото или рентгеновской пленки с известной характеристической кривой. Типичная фотохронограмма и рентгенограмма одного и того же процесса выброса частиц с ударно-нагруженных участков поверхности свинца, имеющих разную шероховатость ~ 40 и 5 мкм ($R_z 40$ и $R_z 5$) приведены на рисунке 2.

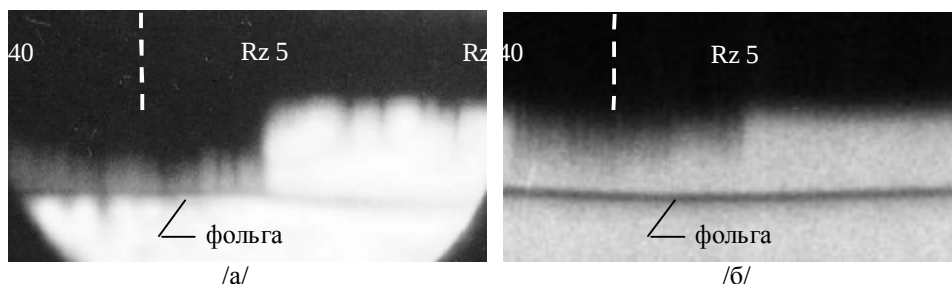


Рис. 2. Фотохронограмма -/а/ и рентгенограмма -/б/ опыта

Представленные данные свидетельствуют о том, что в обоих случаях можно говорить только о качественной картине процесса и об оценочных значениях его кинематических характеристик. На рисунке 2 видно, что регистрируемое изображение исследуемого процесса не контрастно и имеет размытие, связанное с достаточно большим временем экспозиции пленки, которое составляло $\sim 0,3$ и $0,5$ мкс при использовании рентгенографической и фотохронографической методик регистрации соответственно. Поскольку ожидаемые размеры частиц при шероховатости СП Rz 5-Rz 40 составляют $\Delta \approx 1-100$ мкм [5], а их скорости могут изменяться в диапазоне от 1 до 10 км/с в зависимости от амплитуды давления в УВ, то, как показывают оценки, временное разрешение методов, используемых для регистрации процесса, не должно превышать единиц наносекунд.

2. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ.

2.1. ПОСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.

В данной работе для регистрации теневого изображения потока частиц с СП использовали высокоскоростную электрооптическую камеру с ПЗС-матрицей и импульсную лазерную подсветку с длительностью импульса 4 нс. Схема нагружения образцов и регистрации картины процесса выброса частиц приведены на рисунке 3. Ударную волну в образцах создавали при контактном подрыве заряда ВВ, установленного в обойму из фторопласта. Согласно предварительным расчетам в такой постановке опытов на СП образцов из свинца и стали выходит УВ со спадающим профилем давления за ее фронтом, имеющая амплитуду на фронте 15 ГПа и 27 ГПа соответственно.

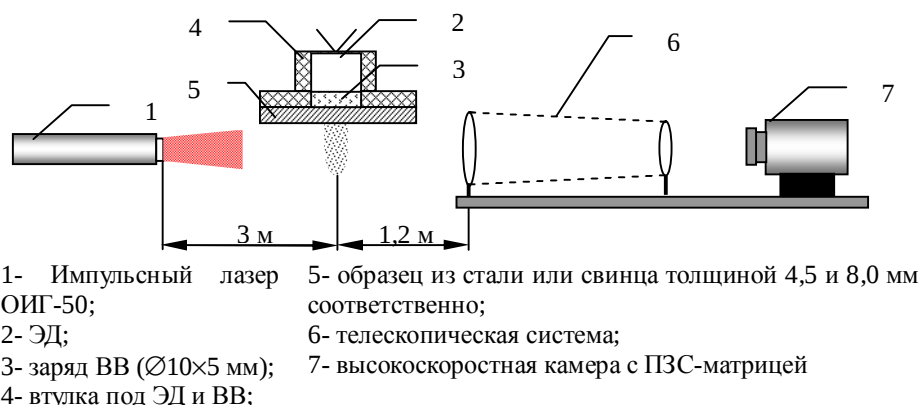


Рис. 3. Схема проведения экспериментов

Исследовали образцы из свинца С1 и стали Ст.3 диаметром 45 мм и толщинами 8,0 и 4,5 мм соответственно. Поверхности образца, с которой происходил выброс частиц, имела шероховатость $\sim 5, 20$ и 40 мкм (Rz 5, Rz 20 и Rz 40) для образцов из свинца и 40 мкм для образца из стали. Шероховатость поверхности Rz 5 и Rz 20 задавали в результате токарной обработки материала образцов, а шероховатость Rz 40 мкм организовывали путем механического нанесения на полированные образцы параллельных друг

другу канавок глубиной ~40 мкм, длиной ~2 мм с шагом ~600 мкм. Профили поверхности подготовленных таким образом образцов измеряли с помощью профилографа «Абрис ПМ-7». На рисунке 4 приведены результаты измерений, где Rz- средняя высота неровностей профиля по десяти точкам в пределах длины измерений [13].

Для подсветки исследуемого процесса применяли полупроводниковый лазер с длиной волны $\lambda_0=680$ нм, энергией и углом расходимости излучения $E=45$ мДж и $\alpha=30^\circ$ соответственно. Для построения увеличенного действительного изображения частиц использовали телескопическую систему, состоящую из объектива и окуляра с фокусными расстояниями $F_1=750$ и $F_2=75$ мм соответственно, что позволило получить при проведении опытов оптическое увеличение $N=3$.

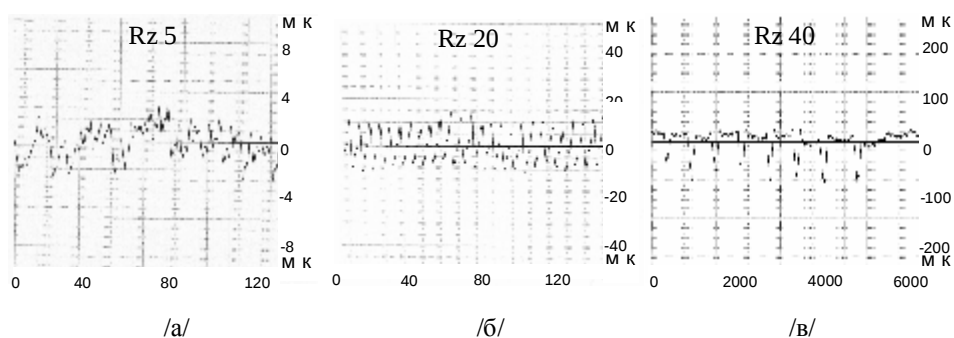


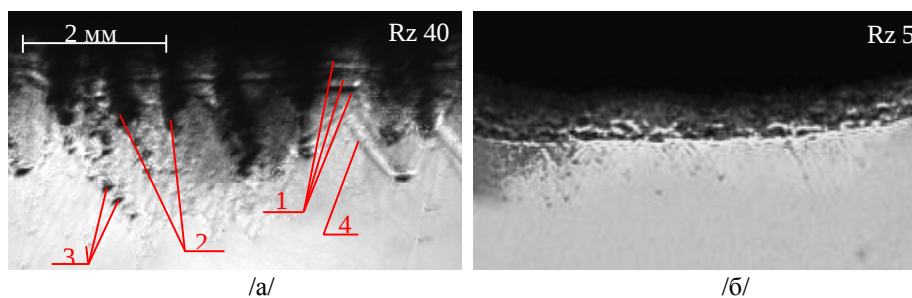
Рис. 4. Профили поверхности с шероховатостью Rz 5 -/а/, Rz 20, -/б/ и Rz 40 -/в/

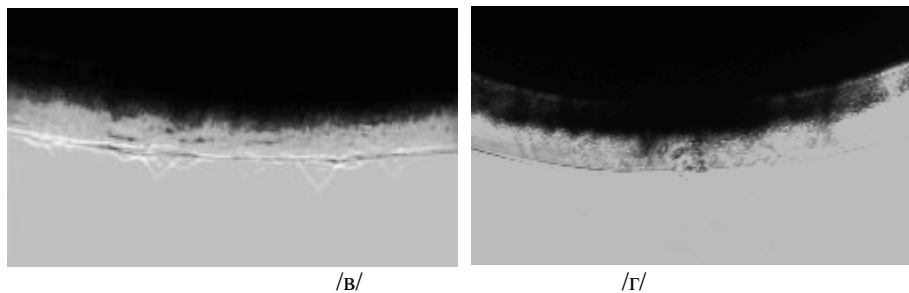
Регистрацию построенного с помощью телескопа изображения осуществляли с использованием цифровой камеры с ПЗС-матрицей, имеющей пространственное разрешение 2048×2048 пикселей при размере матрицы 15×15 мм. Время экспозиции кадра соответствовало длительности лазерного импульса ~4 нс. Разрешающую способность Δ и глубину резкости изображения T выбранной схемы регистрации оценивали по формулам из [14]:

$$\Delta \geq 1,22 \frac{l_0}{n \sin a} K, \quad T = \frac{l_0}{(n \sin a)^2} \left(\frac{1,22 L}{ND} + n \right)$$

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 разрешение выбранной схемы регистрации было не хуже 15 мкм, а глубина резкости изображения составляла ~1,5 мм.

Картину выброса потока частиц регистрировали в однокадровом режиме на время, соответствующее смещению СП на расстояние ~2-3 мм от своего начального положения. На рисунке 5 приведены фотографии процесса выброса частиц со свободной поверхности образцов из свинца, имеющих шероховатость Rz 40, Rz 20 и Rz 5, и стали с шероховатостью поверхности Rz 40, снятые на близкие моменты времени после выхода УВ на СП -3,8; 3,6; 2,7; и 5,9 мкс соответственно.





1- отколы; 2- микроструи; 3- частицы; 4,5 УВ в воздухе

Рис. 5. Фотографии опытов

2.2. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ полученных результатов свидетельствует о сложной качественной и количественной картине исследуемого процесса, зависящей как от степени шероховатости СП, так и от свойств исследуемых материалов. Наряду с процессами множественного откольного разрушения -1 и микрокумуляции -2 на рисунке 5 видны фронты УВ в воздухе, которые формируются после выхода УВ на СП образца -5 и при движении отдельных частиц -4. Можно отметить, что при увеличении шероховатости поверхности образцов из свинца от Rz 5 к Rz 40 отдельные частицы опережают фронт основной УВ в воздухе и видны фронты УВ, которые формируются в результате движения самих частиц или присоединенные к ним УВ в воздухе. На рисунке 5 так же видно, что с ростом шероховатости СП образцов из свинца увеличивается интенсивность наблюдаемых процессов множественного откольного разрушения и струеобразования. При шероховатости СП Rz 5 превалирует процесс откольного разрушения. С ростом шероховатости СП на него накладывается процесс выброса частиц. При шероховатости СП, равной Rz 40, выброс частиц имеет ярко выраженный микрокумулятивный характер с образованием струй метала. 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 откольных слоев за счет фрагментации и диспергирования материала при разрушении. В опытах удалось отчетливо зарегистрировать частицы с минимальным размером ~20-30 мкм (рисунок 5). Однако использование телескопической системы с увеличением $N \geq 10$ позволит регистрировать частицы с размерами ~1-10 мкм.

На рисунках 6,7 приведены результаты обработки фотоснимков в виде распределений по размерам и скоростям частиц в опытах с образцами из свинца с шероховатостью СП Rz 40 и Rz 20, выброшенных с СП за счет микрокумуляции.

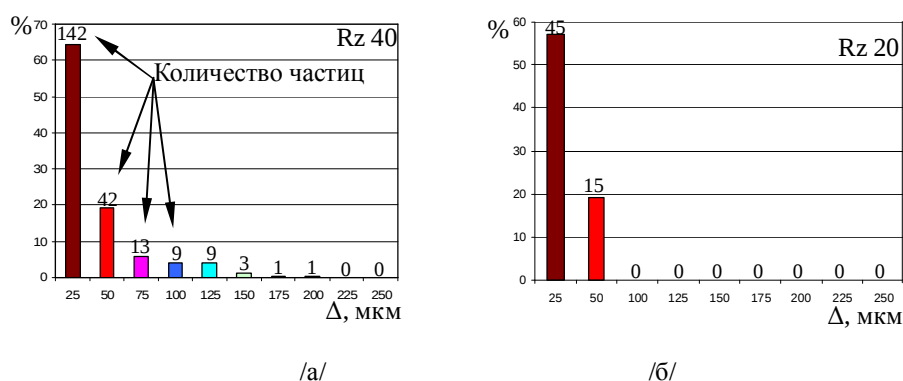


Рис. 6. Распределение частиц по размерам

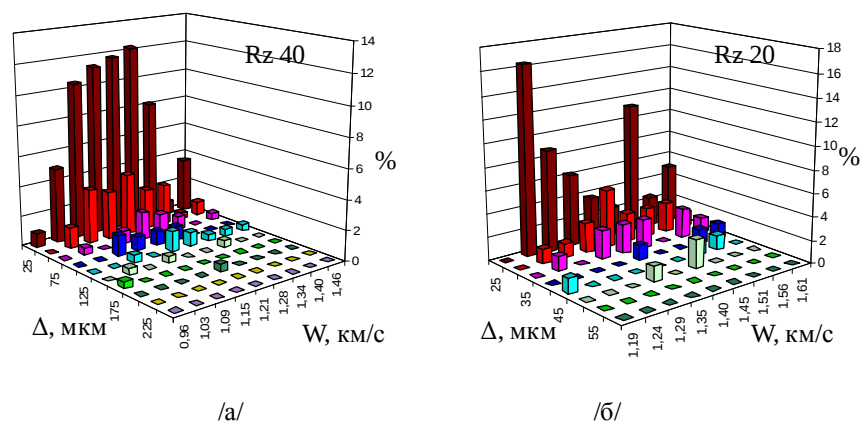


Рис. 7. Распределение частиц по скоростям

Из рисунка 6 следует, что при увеличении шероховатости поверхности с Rz20 до Rz40 количество выброшенных частиц увеличивается примерно в 2 раза, а их максимальный размер изменяется с 50 мкм до 200 мкм. Эти результаты указывают на приближенный характер оценок размера частиц Δ по величине шероховатости $-Rz$ [5]. Анализ зависимости распределения частиц по скоростям, приведенной на рисунке 7, 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 рисунков 5 а, г видно, что при одинаковой шероховатости образцов из свинца и стали процесс выброса частиц в последнем имеет менее выраженный характер и частицы сосредоточены между фронтом УВ в воздухе и СП. Это связано, по-видимому, с недостаточно высокой амплитудой УВ в стали, которая обладает повышенными физико-механическими свойствами (прочность, температура плавления).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Таким образом, с использованием выбранной схемы регистрации, теньевым методом удалось визуализировать детали процесса выброса частиц с СП металлических образцов при выходе на нее УВ и получить их распределение по размерам и скоростям. С ростом шероховатости СП образцов из свинца при фиксированной амплитуде давления на фронте УВ, равной ~ 15 ГПа, увеличивается интенсивность наблюдаемых процессов множественного откольного разрушения и струеобразования, происходит увеличение количества выброшенных частиц и изменение спектра их размеров. В зарегистрированном спектре выброшенных частиц не наблюдается ярко выраженного распределения по скоростям их движения. При выбранных условиях нагружения наблюдается зависимость интенсивности процесса выброса частиц от физико-механических характеристик материалов.

4. БЛАГОДАРНОСТИ.

Работа выполнена при поддержке научной школы №НШ-1307. 2008. 1.

5. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Walsh J.M., Shreffler R.G. and Willing F.J. (1953) J. Appl. Phys. 24, 349.
2. Asay J.R., Barker L.M. (1974) «Interferometric measurement of shock-induced internal particle velocity and spatial variations of particle velocity» J. Appl. Phys. 45, 2540.
3. Speight C.S., Harper L., Smeeton V.S. (1989) «Piezoelectric probe for the detection of shock-induced spray and spell» Rev. Sci. Instr. 60 (12), 3802-3808.
4. Dunning M., Jacoby B. (1995) «Ejecta production from shocked metal samples» The Fourth Zababakhin Scientific Talks. Russian, Chelyabinsk Region, Abstr. Snezhinsk: All-Russian Research Institute of Technical Physics. October 16-20.
5. Огородников В.А., Иванов А.Г., Михайлов А.Л., Крюков Н.И., Толочко А.П., Голубев В.А. (1998) «О выбросе частиц со свободной поверхности металлов при выходе на нее ударной волны и методах диагностики этих частиц» ФГВ, Т.34, №6, с. 103-107.

6. **Sorenson D.S., Minich R.W., Romero J.L., Tunnel T.H., Mallone R.M.** (2002) «Ejecta particle size distribution for shock loaded Sn and Al metals» J. Appl. Phys. V. 92, №10, P. 5830.
7. **Vogan W.S., Anderson W.W. et al.** (2005) «Piezoelectric characterization of eject from shocked tin surface» J. Appl. Phys., V. 98, 113508.
8. **Resseguier T. de, Signor L., Dragon A. et al** (2007) «Experimental investigation of liquid spall in laser shock-loaded tin» J. Appl. Phys. 101, 013506.
9. **Timothy C., Germann, Guy Dimonte, James E. Hammerberg** (2008) «Billion-atom simulations of shock-induced particulate ejection and Richtmyer-Meshkov instability development in copper» 7'th International Conference on new models and hydrocodes for shock wave processes in condensed matter. Estoril-Portugal.
10. **Жерноклёгов М.В.** (2003) «Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках» Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ.
11. **Bodner S.E.** (1974) Phys. Rev. Lett., 33, 761.
12. **Козырев А.С.** (2005) «Газодинамический термоядерный синтез» Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ.
13. **Федоренко В.А., Шошин А.И.** (1981) Справочник по машиностроительному черчению. Машиностроение.
14. **Ландсберг Г.С.** (1976) Оптика. изд. «Наука», М.

SHADOW PHOTOGRAPHY METHOD OF RECORDING THE EJECTA PRODUCED FROM SHOCKED SAMPLES.

V.A. Ogorodnikov, A.L. Mikhailov, V.V. Burtsev, S.A. Lobastov,

S.V. Erunov, A.V. Romanov, A.V. Rudnev, E.V. Kulakov, Yu.B. Bazarov,

V.V. Glushikhin, I.A. Kalashnik, V.A. Tsyanov, B.I. Tkachenko

RFNC-VNIIEF, Institute of Experimental Gas Dynamics and Physics of Explosion, Sarov,
Russia

ABSTRACT

In this work the results of experimental study of ejecta produced after the reflection of a shock wave from the free surface of metals were presented. The research was conducted on lead and steel samples having free-surface roughness of Rz 5, Rz 20 and Rz 40. Using shadow photography method a qualitative picture of the investigated process was registered; ejecta size spectrum and typical velocities were determined.

Keywords: ejecta flow, shock waves, metals, shadow photography.