

РЕГИСТРАЦИЯ СКОРОСТИ И УДЕЛЬНОЙ МАССЫ ПОТОКА ЧАСТИЦ, ВЫБРАСЫВАЕМЫХ С ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ, ПРИ ИХ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Е. А. Чудаков, А. В. Федоров, С. А. Финюшин, Д. А. Калашиников, И. В. Шмелев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров Нижегородской обл.

С помощью методики гетеродин-интерферометра (PDV) исследовались особенности процесса выброса частиц со свободной поверхности образцов из свинца и других металлов различной шероховатости при их ударноволновом (УВ) нагружении. В экспериментах регистрировались скорость свободной поверхности (СП) металлов и скорость пылевого потока, а также, с помощью индикаторных фольг и тонких стекол, удельная масса пыли. Построены зависимости распределения удельной массы частиц от их относительной скорости. Проанализировано влияние шероховатости и фазового состояния вещества после ударноволнового нагружения на возможности регистрации скорости свободной поверхности и определения удельной массы выброшенных частиц с помощью индикаторных фольг. Показано, что при заданной шероховатости поверхности удельная масса пыли, выбрасываемая с поверхности при плавлении исследуемых металлов на ударной волне или волне разгрузки, существенно больше, чем для образца, находящегося в твердом состоянии.

Метод индикаторных фольг

Метод постановки преград-индикаторов для определения характеристик потоков частиц, выбрасываемых со свободной поверхности материалов при их ударноволновом нагружении, исторически появился одним из первых [1]. В настоящее время при исследовании вопросов «пыления» широко используются такие методики, как оптическая [2], пьезоэлектрическая [3] и рентгенографическая [4]. Разработка лазерного интерферометра PDV (гетеродин-интерферометр) [5–8], позволяющего регистрировать скорость как пылевого потока, так и, в отдельных случаях, скорость свободной поверхности, расширила арсенал используемых методов. Создание многоканальных комплексов гетеродин-интерферометра привело к возможности одновременно получать информацию по значительному числу измерительных каналов и дополнить классические измерения скорости данными по движению тонких индикаторных фольг и стекол под действием налетающей на них пыли. Развитие данного метода связано с необходимостью измерений удельной массы пыли в условиях, когда применение других методик невозможно (сложная геометрия измерений, наличие сильных электромагнитных наводок, малое количество выбрасываемой массы и т. д.).

Суть методики определения удельной массы пыли с помощью лазерного интерферометра такова: на выбранном расстоянии от СП образца устанавливаются индикаторные фольги; пыль, выбрасываемая со СП образца, при ударе по фольге передает последней свой импульс, в результате чего фольга начинает двигаться с некоторой скоростью; с помощью лазерного интерферометра осуществляется непрерывная регистрация скорости движения фольги. Тогда, зная скорость потока частиц, расстояние до фольги и ее скорость, можно рассчитать массу пыли, налетающей на фольгу.

Пересчет удельной массы пыли, накопленной на фольге, производится исходя из следующих принципов: выброс частиц со свободной поверхности (СП) происходит мгновенно; скорость частицы не изменяется в процессе ее движения (частицы движутся в вакууме); частицы неупруго тормозятся на фольге-индикаторе. Тогда, согласно закону сохранения импульса, скорость прироста массы на фольге составляет

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M_{\phi}}{W - W_{\phi}} \frac{dW_{\phi}}{dt}, \quad (1.1)$$

где M – удельная масса выброшенных частиц образца на фольге, $\text{мг}/\text{см}^2$; M_{ϕ} – удельная масса фольги вместе с пылью, накопленной к моменту времени t $\text{мг}/\text{см}^2$; W – скорость подлетающих час-

тиц в данный момент времени t , м/с; W_{ϕ} – скорость фольги в момент времени t , м/с.

Постановка экспериментов

Нагружение образцов из свинца марки С1 $\varnothing 105 \times 2$ мм осуществлялось через прокладку из стали 3 толщиной 4 мм с помощью шашки ВВ $\varnothing 90 \times 10-60$ мм, инициируемой с помощью плосковолнового генератора. Давление нагружения в опытах варьировалось от 18 до 45 ГПа (для дополнительного ослабления ударной волны в опыте с давлением 18 ГПа устанавливалась проставка из фторопласта толщиной 7 мм). Полость сборки вакуумировалась, остаточное давление газа не превышало 0,05 атм. На базе 42 мм от свободной поверхности свинца располагался измерительный приемник (рис. 1) с установленными в нем датчиками методики PDV, при этом часть датчиков была закрыта индикаторными фольгами: из алюминия толщиной 15 мкм и 250 мкм, тантала толщиной 200 мкм и кварцевого стекла толщиной 270–340 мкм. Датчики располагались на двух диаметрах измерений 13 и 35 мм. Шероховатость поверхности свинца в первых двух опытах составила $Ra \sim 3,2$ мкм, $\lambda \sim 60$ мкм, в третьем $Ra \sim 0,16$ мкм.

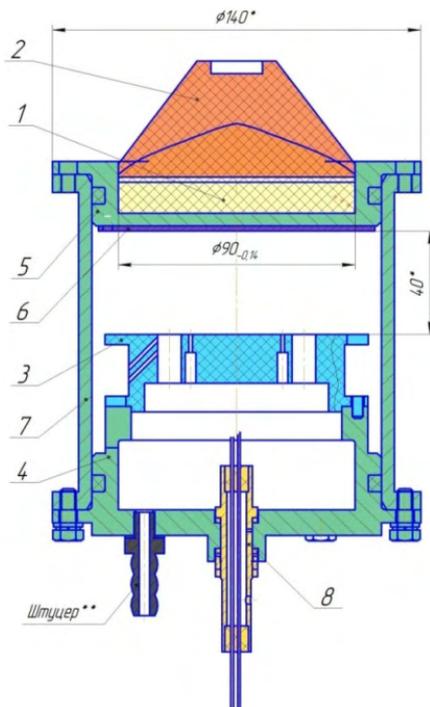


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки: 1 – шашка ВВ $\varnothing 90 \times 10-60$ мм, 2 – генератор плоской волны, 3 – измерительный приемник, 4 – основание, 5 – крышка, 6 – свинец С1 $\varnothing 105 \times 2$ мм, 7 – корпус, 8 – гермопереход, 9 – штуцер для откачки газа

Результаты экспериментов

Результаты опыта с образцом в твердом фазовом состоянии

Характерные спектрограммы, полученные с помощью датчиков PDV в опыте с давлением нагружения образца ~ 18 ГПа, представлены на рис. 2. Согласно данным [8, 9], плавление свинца на волне разгрузки начинается при давлении 25 ГПа, а заканчивается при давлении 36 ГПа. Таким образом в данном опыте образец оставался в твердом фазовом состоянии после ударноволнового нагружения.

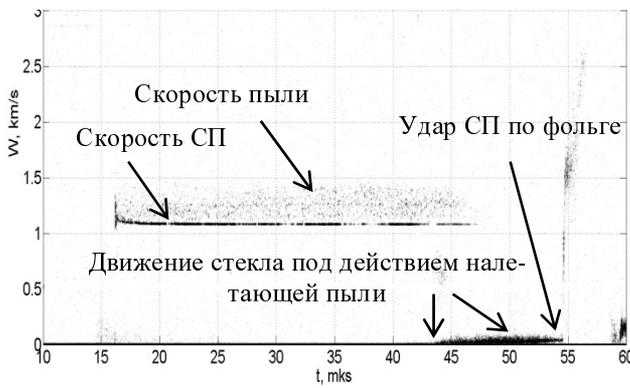
На спектрограмме, зарегистрированной с помощью датчика, закрытого кварцевым стеклом (рис. 2,а), получена запись скорости свободной поверхности на всей базе полета (средняя скорость составила 1,085 км/с), а также дисперсия скорости пыли в диапазоне 1,1–1,5 км/с. На спектрограмме отчетливо видно движение стекла под действием налетающей на него пыли вплоть до момента резкого набора скорости, связанного с ударом СП свинца по стеклу.

В данном опыте с помощью танталовой фольги толщиной 200 мкм также удалось получить полную запись движения фольги под действием налетающей пыли вплоть до удара СП. На увеличенном участке спектрограммы на рис. 2,б отчетливо виден момент удара СП по фольге, дальнейшее ускорение фольги в виде ступенчатого профиля разгона (отчетливо видны четыре ступени разгона), выход скорости на полку, равную скорости ударника. Зная момент удара СП по фольге, базу полета и среднее время выхода УВ на СП, можно оценить среднюю скорость поверхности равной 1,097 км/с, что в пределах погрешности измерений совпадает со средней скоростью 1,085 км/с.

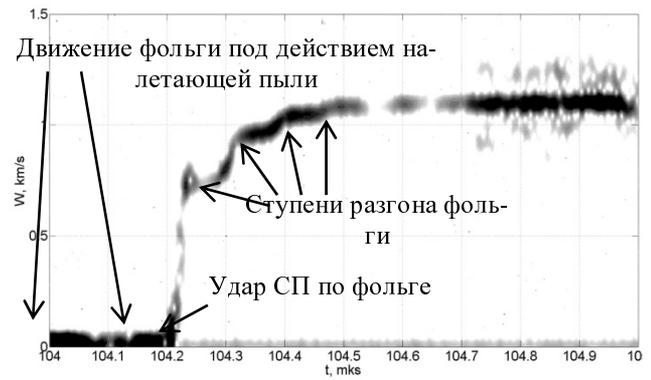
С помощью индикаторных фольг получены зависимости удельной массы пыли, накопленной на фольгах, от времени и относительной скорости, представленные на рис. 3. Скорость СП для датчика, закрытого кварцевым стеклом, бралась непосредственно из спектрограммы, для датчика, закрытого танталовой фольгой определялась по моменту удара СП по фольге. Полная удельная масса пыли составила ~ 3 мг/см².

Результаты опытов с образцом в жидком (смешанном) фазовом состоянии

Характерные спектрограммы, полученные с помощью датчиков PDV в опытах с давлением нагружения образца ~ 30 ГПа, представлены на рис. 4. На спектрограмме, полученной с помощью датчика, закрытого кварцевым стеклом (рис. 4, а),

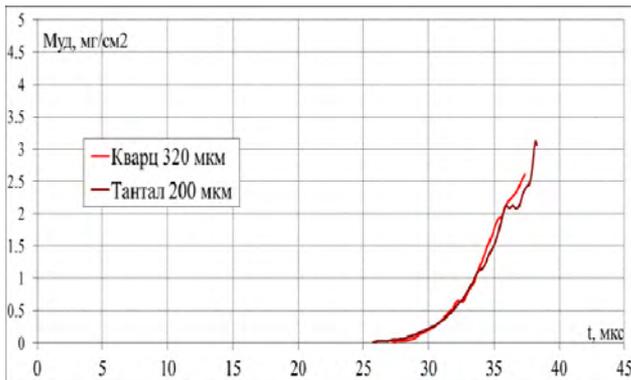


а) Спектрограмма, полученная с помощью кварцевого стекла

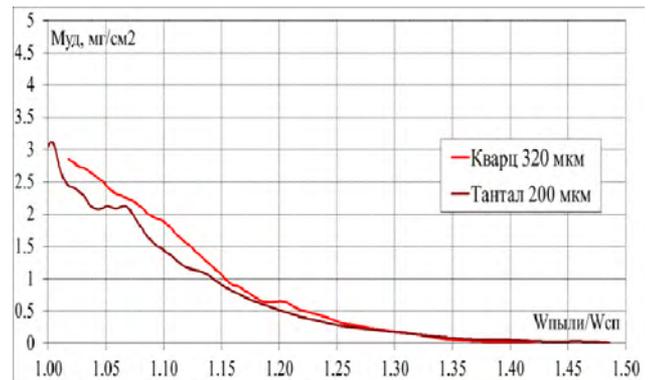


б) Спектрограмма движения танталовой фольги

Рис. 2. Спектрограммы, полученные в опыте с давлением нагружения 18 ГПа, $Ra \sim 3,2$ мкм

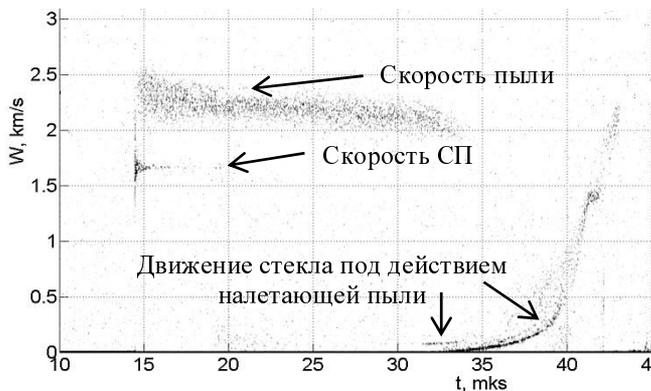


а) зависимость удельной массы пыли, накопленной на фольге, от времени

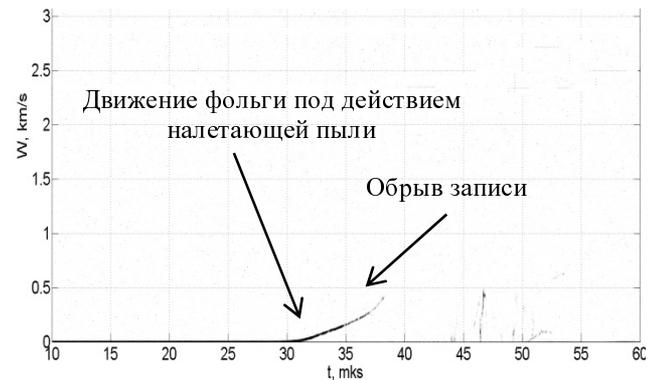


б) зависимость удельной массы пыли, накопленной на фольге, от ее относительной скорости

Рис. 3. Зависимости удельной массы пыли, полученные в опыте с давлением нагружения 18 ГПа, $Ra \sim 3,2$ мкм



а) Спектрограмма, полученная с помощью датчика, закрытого кварцевым стеклом



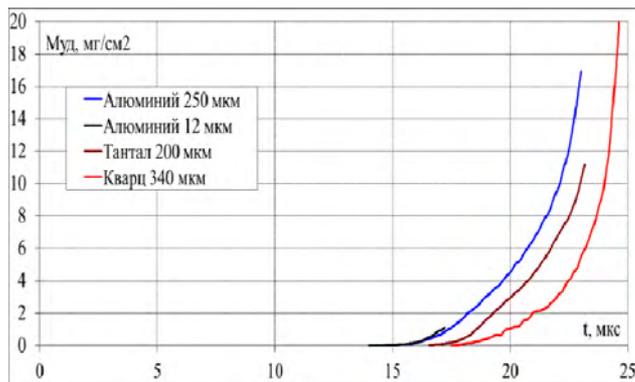
б) Спектрограмма, полученная с помощью датчика, закрытого алюминиевой фольгой

Рис. 4. Спектрограммы, полученные в опыте с давлением нагружения 30 ГПа, $Ra \sim 3,2$ мкм

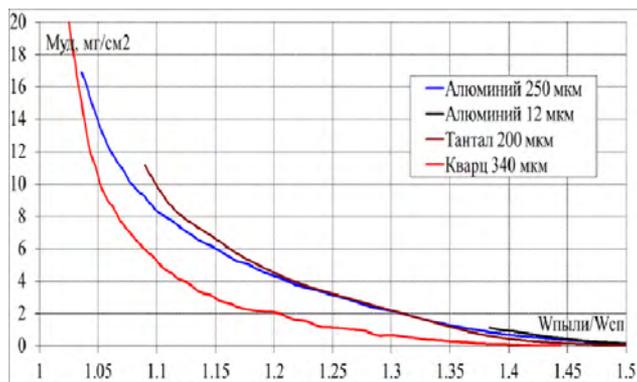
видна запись скорости СП длительностью ~ 5 мкс (скорость составила 1,66 км/с). Зарегистрированная скорость пыли в момент выхода составила 2,0–2,6 км/с с последующим падением до значений 1,9 – 2,2 км/с на момент подлета к приемнику. Момент подлета СП к стеклу однозначно не выражен, регистрируется достаточно плавный набор

скорости стеклом под действием налетающей на него пыли.

С помощью фольг из тантала и алюминия получены записи скорости, обрывающиеся незадолго до расчетного момента подлета СП к фольге (рис. 4, б). Зависимости удельной массы пыли, накопленной на фольгах, от времени и относитель-

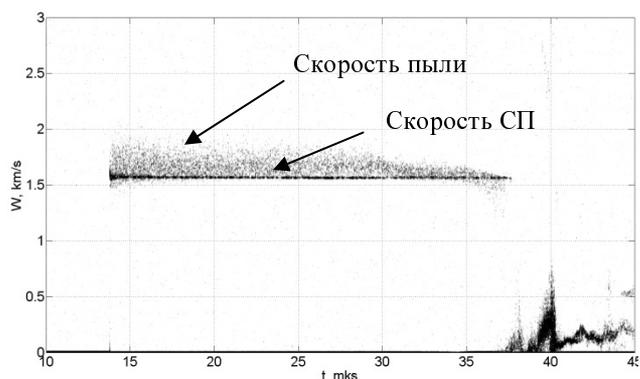


а) зависимость удельной массы пыли, накопленной на фольге, от времени

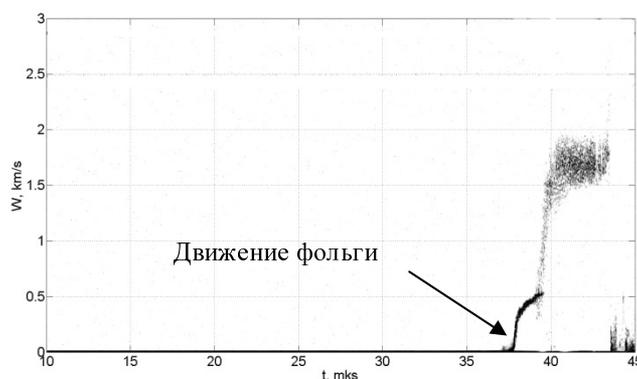


б) зависимость удельной массы пыли, накопленной на фольге, от ее относительной скорости

Рис. 5. Зависимости удельной массы пыли, полученные в опыте с давлением нагружения 30 ГПа, Ra ~ 3,2 мкм



а) Спектрограмма, полученная с помощью открытого датчика



б) Спектрограмма, полученная с помощью датчика, закрытого танталовой фольгой

Рис. 6. Спектрограммы, полученные в опыте с давлением нагружения 30 ГПа, Ra ~ 0,16 мкм

ной скорости, представленные на рис. 5. В качестве скорости СП для датчиков, закрытых фольгами, бралось среднее значение, полученное с помощью датчиков, закрытых кварцевым стеклом, что вносит дополнительную погрешность при получении зависимостей массы пыли от относительной скорости и, соответственно, при оценке полной удельной массы пыли.

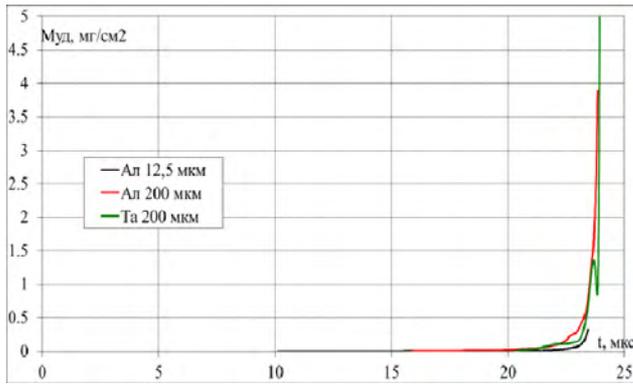
По оценкам авторов работы, ошибка между зарегистрированной усредненной и фактической скоростью движения СП образца для различных точек поверхности в указанной постановке опытов может достигать 1–5%. При этом наибольший прирост удельной массы пыли на фольге приходится как раз на область относительной скорости пыли в интервале 1–1,05 от скорости СП. Тогда, для уменьшения указанной погрешности, под полной массой потока в случае плавления образца будем подразумевать часть частиц, движущаяся быстрее некоторой пороговой скорости относительно скорости СП. В данной работе значение пороговой

скорости пыли выбрано равным 1,05 от скорости поверхности. Полная удельная масса пыли в опыте с давлением нагружения 30 ГПа составила ~12 мг/см².

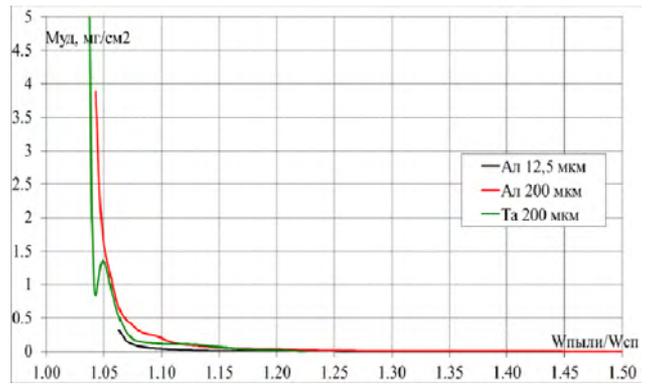
Результаты опыта с шероховатостью поверхности 0,16 мкм

Спектрограммы, полученные в опыте с давлением нагружения образца 30 ГПа и шероховатостью поверхности близкой к зеркальной (Ra ~ 0,16 ± 0,05 мкм) с помощью фронтальных датчиков, представлены на рис. 6.

На спектрограммах, полученных с помощью фронтальных датчиков, регистрируется запись скорости свободной поверхности в течение всего движения (средняя скорость составила 1,61 км/с), а также дисперсия скорости пылевого потока величиной 0,3 км/с. В данном опыте впервые с помощью методики PDV зарегистрировано движение откольного слоя свинца, находящегося в смешанной фазе, на всей базе полета в течение времени более 23 мкс (обычно длительность реги-



а) Зависимости удельной массы пыли от времени



б) Зависимости удельной массы пыли от относительной скорости

Рис. 7. Зависимости удельной массы пыли, полученные в опыте с давлением нагружения 30 ГПа, Ra ~ 0,16 мкм

страции скорости откольного слоя в смешанной фазе не превышает нескольких микросекунд). Зарегистрированная скорость пыли в момент выхода составила 1,6–1,9 км/с с последующим падением до значений 1,6–1,7 км/с на момент подлета к приемнику.

С помощью индикаторных фольг получены зависимости удельной массы пыли, от времени и относительной скорости, представленные на рис. 7.

В качестве скорости СП для датчиков, закрытых фольгами, бралось среднее значение, полученное с помощью датчиков, закрытых кварцевым стеклом. При этом на рис. 7, б видно, что удельная масса пыли начинает асимптотически возрастать при величине относительной скорости ~ 1,04*W_{сп}. Это означает, по всей видимости, что скорость СП в проекциях точек установки индикаторных фольг выше средней, зарегистрированной с помощью фронтальных датчиков. Масса пыли при пороговой скорости 1,05 от скорости поверхности составила 1,4 мг/см².

Обсуждение результатов

Удельная масса пыли, выброшенная с поверхности свинца с шероховатостью Ra ~ 3,2 мкм, λ ~ 60 мкм для опытов с давлением нагружения 18 ГПа и 30 ГПа отличается в четыре раза (3 мг/см² и 12 мг/см², соответственно). Также качественно отличается форма импульса, прописываемого индикаторными фольгами – для образца, находящегося в твердом состоянии момент удара СП по фольге обычно явно виден на спектрограмме, что позволяет определить скорость движения СП непосредственно в точке расположения фольги и точно рассчитать как полную удельную массу, так и ее зависимость от относительной скорости.

Для тех же опытов когда образец начинает плаваться на волне разгрузки ожидаемый импульс от удара СП, воспринимаемый фольгами, оказывается размыт во времени и момент удара поверхности по фольге не удается однозначно определить, запись скорости различных фольг также зачастую обрывается незадолго до ожидаемого момента подлета. Указанные факторы не позволяют с необходимой точностью рассчитать зависимость удельной массы пыли от относительной скорости и определить полную удельную массу выбрасываемой пыли. Для уменьшения возможной ошибки выбирается пороговое значение относительной скорости (в данной работе 1,05*W_{сп}), для которого и вычисляется указанная масса, что, однако, не может в полной мере быть точной характеристикой выбрасываемого потока частиц.

Необходимо отметить, что для опытов с давлением нагружения 30 ГПа и различными шероховатостями поверхности свинца (Ra 3,2 мкм и 0,16 мкм) были получены качественно отличающиеся данные как с помощью фронтальных датчиков, так и с помощью индикаторных фольг. Так, при соответствующем уменьшении шероховатости с помощью фронтальных датчиков скорость СП регистрируется на всей базе полета, частицы не экранируют поверхность; зарегистрировано отражение от низкоскоростной части пылевого потока. Обрыв записей движения фольг происходит гораздо позже и практически все фольги полностью прописывают импульс налетающих частиц.

Оценки удельной массы пыли, полученные с помощью индикаторных фольг при давлении нагружения 30 ГПа, свидетельствуют о уменьшении массы выбрасываемой пыли при уменьшении шероховатости и более чем в восемь раз (с 12 мг/см² до 1,4 мг/см²). При этом наиболее рез-

ко уменьшается масса более скоростной части потока: если общая масса пыли по порогу $1,05 \cdot W_{сп}$ отличается в восемь раз, то масса части пылевого потока, имеющей скорость более $1,1 \cdot W_{сп}$ от скорости СП отличается уже в семьдесят раз ($7,4 \text{ мг/см}^2$ и $0,1 \text{ мг/см}^2$).

Выводы

Методом гетеродин-интерферометра и индикаторных фольг зарегистрированы скорость и удельная масса потока частиц, выбрасываемых с поверхности свинца при ударно-волновом нагружении.

Показано, что для свинца с шероховатостью поверхности $R_a \sim 3,2 \text{ мкм}$, $\lambda \sim 60 \text{ мкм}$ удельная масса выбрасываемых частиц для образца, находящегося в жидком (смешанном) фазовом состоянии при его ударно-волновом нагружении и последующей разгрузке, возрастает в четыре раза, по сравнению со случаем выброса частиц с поверхности образца, остающегося в твердом фазовом состоянии.

Уменьшение шероховатости поверхности свинца при достижении давления плавления на волне разгрузки со значений $R_a \sim 3,2 \text{ мкм}$ до значений $R_a \sim 0,16 \text{ мкм}$ приводит к уменьшению удельной массы выбрасываемой пыли в восемь раз (с 12 мг/см^2 до $1,4 \text{ мг/см}^2$), при этом наиболее резко уменьшается масса более скоростной части потока.

Список литературы

1. Asay J. R., Mix L. P., Perry F. C. Ejection of material from shocked surfaces // *Appl. Phys. Lett.* 1976. V. 29, № 5. P. 284–287.
2. Михайлов А. Л., Раевский В. А., Сасик В. С., Невмержицкий Н. В. и др. Микроскопическая электронно-оптическая регистрация процесса

выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженного свинца. ВАНТ. Сер. Теор. и прикл. физика. 2010. Вып. 3. С. 3–6.

3. M. B. Zellner, W. Vogan McNeil, J. E. Hammerberg, R. S. Hixson, A. W. Obst et al. Probing the underlying physics of ejecta production from shocked Sn. *Journal of applied physics*, 103, 123502, 2008.

4. Аринин В. А., Ткаченко Б. И., Игонин В. В., Панов К. Н., Лебедева М. О. Рентгенографический метод определения массы вещества, выброшенного со свободной поверхности материала при его ударно-волновом нагружении. Труды XV международной конференции Харитоновские тематические научные чтения. Сборник докладов. Саров. 2013. С. 790–796.

5. Strand O. T. et al. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques // *Rev. Sci. Instr.* 77, 2006.

6. А.В. Федоров, А.Л. Михайлов, С.А. Финюшин, Д.А. Калашников, Е.А. Чудаков, Е.И. Бутусов, И.С. Гнутов. Регистрация параметров множественного откола и внутренней структуры облака частиц при ударно-волновом нагружении металлов // *ЖЭТФ*, т. 149, вып. 2, 2016 г.

7. Федоров А. В., Михайлов А. Л., Финюшин С. А., Калашников Д. А., Чудаков Е. А., Бутусов Е. И., Гнутов И. С. Регистрация спектра скоростей частиц при выходе ударной волны на поверхность жидкостей различной вязкости // *Физика Горения и Взрыва*, 2016. Т. 52, № 4.

8. Фёдоров А. В., Михайлов А. Л., Финюшин С. А., Назаров Д. В., Чудаков Е. А., Калашников Д. А., Бутусов Е. И. Исследование особенностей поведения свинца при ударно-волновом нагружении и последующей разгрузке. XV Харитоновские чтения, Саров, 2013, С. 274.

9. Копышев В. П., Медведев А. Б. Термодинамическая модель сжимаемого ковалюма. Препринт. РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров. 1995. С. 121.