

Определение порога регистрации минимальной удельной массы частиц при исследовании ударно-волнового пыления поверхности материалов методом лазерного гетеродин-интерферометра. Регистрация эффекта многократного сдвига частоты доплеровского сигнала

**А. В. Федоров, А. Л. Михайлов, С. А. Финюшин,
Д. А. Калашников, Е. А. Чудаков, Е. И. Бутусов,
И. С. Гнутов**

Известно, что в условиях ударно-волнового нагружения с поверхности материалов происходит выброс частиц. Приведены результаты экспериментов по определению минимальных значений удельной массы частиц, при которых скорость их движения возможно зарегистрировать с помощью методики гетеродин-интерферометра [1, 2]. Описан эффект многократного сдвига частоты доплеровского сигнала при отражении лазерного излучения от поверхности металлов и полупрозрачного слоя пылевых частиц.

Введение

Определение характеристик потоков частиц при ударно-волновом пылении материалов в последние годы является предметом исследования многих научных работ [3–11]. Новые результаты в этой области получают в т. ч. с помощью лазерного гетеродин-интерферометра (методика PDV). Гетеродин-интерферометр позволяет регистрировать спектр скоростей частиц, оценивать

их размер по закону торможения в газе, с использованием индикаторных фольг – определять их удельную массу. Однако данная методика имеет и ряд особенностей, требующих детального анализа. Важно знать: как глубоко проникает зондирующее излучение в пылевой поток, как интерпретировать появление на спектрограммах треков скорости, каковы минимальные значения удельной массы частиц, при которых метод эффективно регистрирует дисперсию скорости пылевого облака.

Постановка экспериментов

Минимальная удельная масса частиц, регистрируемая методикой гетеродин-интерферометра, определялась с использованием никелевых частиц размером ≤ 3 мкм и насыпной плотностью $\rho = 1,35$ г/см³. Они наносились на поверхность стальных дисков ($\varnothing 90 \times 3$ мм) двумя способами. В первом случае частицы ровным слоем насыпались в кольцо $\varnothing 20 \times 0,35$ мм. Удельная масса частиц в этих опытах составила 50 мг/см² (рис. 1, а). Во втором случае для создания на поверхности дисков равномерного распределения частиц с удельной массой от 0,2 до 20 мг/см² использовалась следующая методика. Сначала в емкости с этанолом известного объема помещались никелевые частицы заданной массы, затем полученная взвесь тщательно перемешивалась и заливалась в кольцо из оргстекла $\varnothing 20 \times 10$ мм, закрепленное на поверхности стального диска (рис. 1, б). После высыхания этанола на поверхности металлических дисков оставался слой никелевых частиц известной удельной массы. Распределение этих частиц по поверхности дисков не всегда было равномерным. Для опытов готовилось несколько образцов и из них для проведения эксперимента выбирались лучшие по указанному признаку. Одним из факторов неравномерного распределения частиц, например, являлось то, что при малых удельных массах частиц (0,2–1 мг/см²) в конечной стадии испарения жидкий слой разбивается на капли, которые

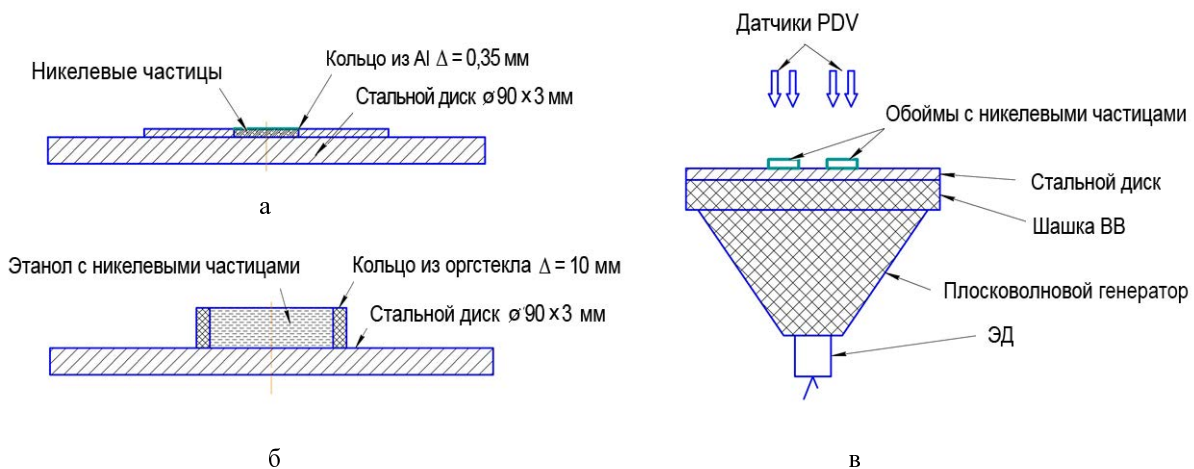


Рис. 1. Нанесение частиц на поверхность стальных образцов и постановка экспериментов: а – 50 мг/см², б – 0,2–20 мг/см², в – постановка экспериментов

при высыхании стягивают за собой никелевые частицы и формируют области их концентрации в виде круглых пятен размером $\sim 0,1$ мм. Такая полупрозрачная сетчатая структура слоя частиц позволила зарегистрировать новые физические эффекты, о чем речь пойдет далее.

Всего было проведено восемь экспериментов: семь из них со сборками с удельной массой частиц от 0,2 до 20 мг/см² (причем, в каждом опыте исследовались по четыре сборки с двумя разными удельными массами, т. е. в центральной части стального диска размещалось четыре кольца с никелевыми частицами) и один опыт с удельной массой частиц 50 мг/см² (см. рис. 1, а). Схема постановки экспериментов представлена на рис. 1, б. Пыление никелевых частиц происходило при нагружении плоской ударной волной от заряда ВВ из октогена или ТГ 5/5 Ø90 и толщиной 5–25 мм, инициируемого плосковолновым генератором (ПГ) Ø90 (рис. 1, в). Давление ударной волны в стальных образцах составило 10–40 ГПа. В ряде экспериментов для уменьшения давления УВ в стальных образцах Ø90 ($P < 20$ ГПа) нагружение стального диска происходило через слой пенопласта толщиной 30 мм.

Кольца из оргстекла (см. рис. 1, б) перед опытами удалялись для исключения их откольного разрушения и формирования дополнительных источников пыления. Так как плотность никелевых частиц ($\rho = 1,35$ г/см³) меньше плотности стальной подложки, то частицы заведомо должны отлетать от нее после выхода ударной волны на свободную поверхность (СП).

Экспериментальные результаты

Результаты экспериментов с никелевым порошком в порядке уменьшения удельной массы частиц (от 50 до 0,2 мг/см²) представлены в таблице, где $W_{СП}$ – скорость движения СП стального образца (км/с), P – давление в стальном образце (ГПа), d – диаметр никелевых частиц (мкм), рассчитанный по закону их торможения в газе [9–12].

Таблица 1

Результаты экспериментов

Рисунок	$M_{уд}$, мг/см ²	$W_{ФП}^{max}$, м/с	$W_{СП}$, км/с	P , ГПа	d , мкм
2, а	50	0,82	0,65	10,8	1,6
2, б	20	4,15	1,85	38,4	1,3
2, в	10	3,05	1,45	28,1	1,0
2, г	2	4,15	1,85	38,4	1,4
2, д	2	4,15	1,85	38,4	1,4
2, е	1	3,65	1,73	35,2	1,1
2, ж	0,5	1,05	1,05	18,9	–
2, з	0,2	1,05	1,05	18,9	–

На рис. 2 приведены характерные спектрограммы опытов. В ряде экспериментов зарегистрированы характерные откольные импульсы для материала подложки – сталь 20. Величина откольной прочности составила $\sigma_{отк} = 3,1–3,4$ ГПа.

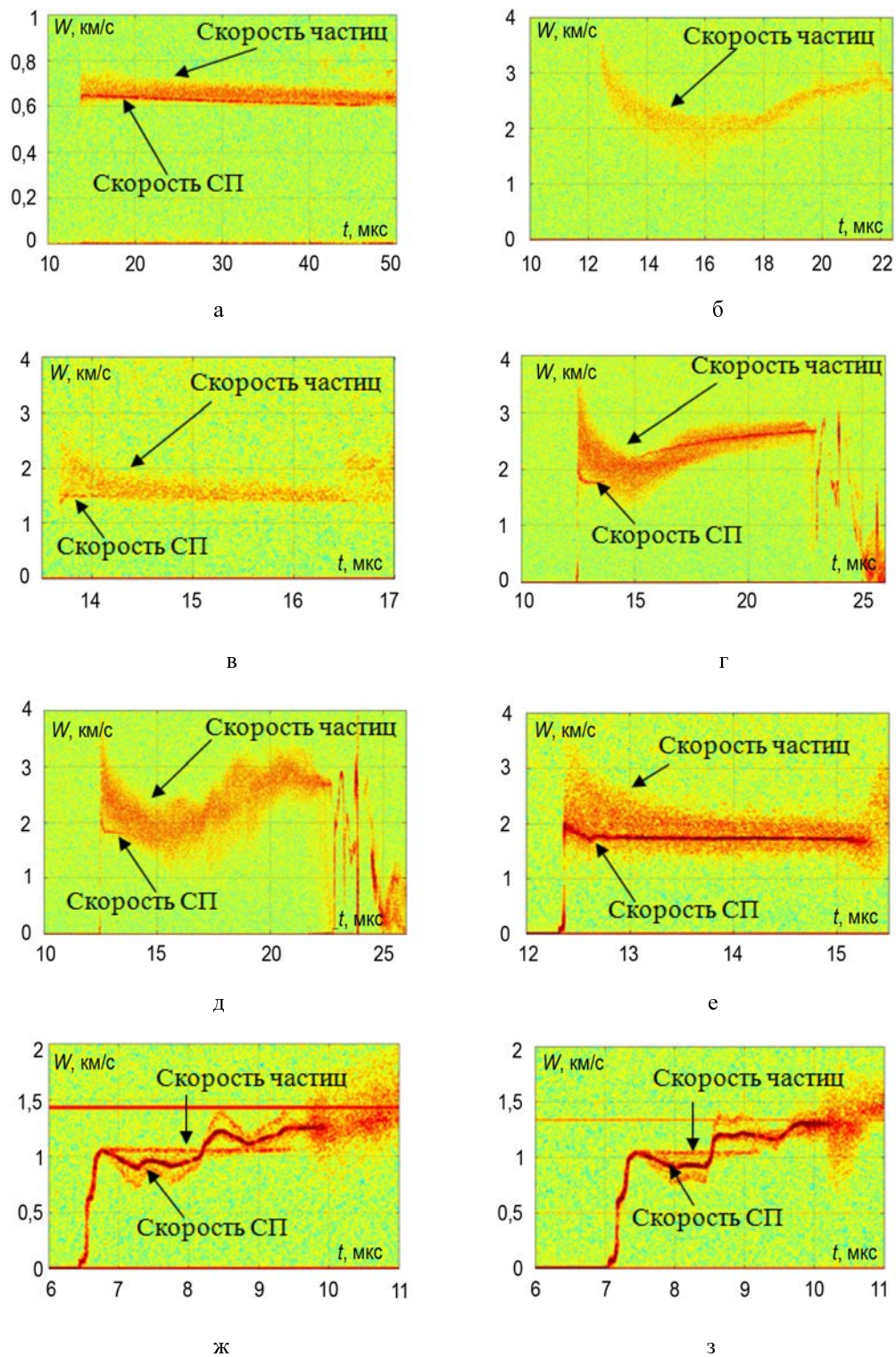


Рис. 2. Спектрограммы экспериментов

В экспериментах (см. рис. 2, *a–e*) на спектрограммах зарегистрированы скорости облака никелевых частиц. Спад скорости частиц обусловлен их торможением на воздухе. Максимальные значения скорости фронта потока частиц при выходе ударной волны на СП могут достигать 3–3,5 км/с (см. рис. 2, *б–e*). На рис. 2, *ж,з* представлены результаты экспериментов с удельной массой 0,5 и 0,2 мг/см². Видно, что зарегистрирована постоянная скорость частиц. Однако, предел порога регистрации удельной массы частиц еще не достигнут. Это видно из спектрограмм опытов (см. рис. 2, *e–з*), где скорость частиц регистрируется в виде достаточно яркой линии или облака. Таким образом, имеются запас по интенсивности отраженного сигнала и проведенные по большой серии экспериментов по ударно-волновому пылению материалов [9–11] оценки показывают, что минимальный предел может составлять 0,02–0,05 мг/см². По результатам экспериментов данной работы мы можем утверждать, что методика гетеродин-интерферометра надежно регистрирует удельную массу частиц 0,2 мг/см².

Регистрация эффекта многократного сдвига частоты доплеровского сигнала

В опытах с малой удельной массой частиц (см. рис. 2, *ж, з*) на спектрограммах наблюдаются интересные физические эффекты. Первый из них связан со взаимодействием лазерного излучения с полупрозрачным слоем частиц [12]. На спектрограммах (рис. 3) наряду со скоростью СП регистрируется так называемый переотраженный сигнал – удвоенная скорость СП относительно скорости полупрозрачного слоя частиц. Механизм возникновения данного эффекта схематично показан на рис. 4 и заключается в следующем. При отражении зондирующего излучения от СП

происходит сдвиг частоты сигнала $\omega_1 = 2 \frac{V_1}{c} \omega_0$ (1). Далее лазерный луч переотражается назад со

знаком минус от слоя частиц, частота меняется второй раз $\omega_2 = 2 \frac{V_2}{c} \omega_0 > \omega_1$ (2) (V_1 и V_2 – скорость СП и полупрозрачного слоя частиц соответственно). Затем излучение еще раз отражается от СП (происходит трехкратный сдвиг частоты сигнала). В итоге имеем:

$$\omega_3 = 2\omega_1 - \omega_2 = 2\left(2 \frac{V_1}{c} \omega_0\right) - 2 \frac{V_2}{c} \omega_0 < \omega_1 \quad (3).$$

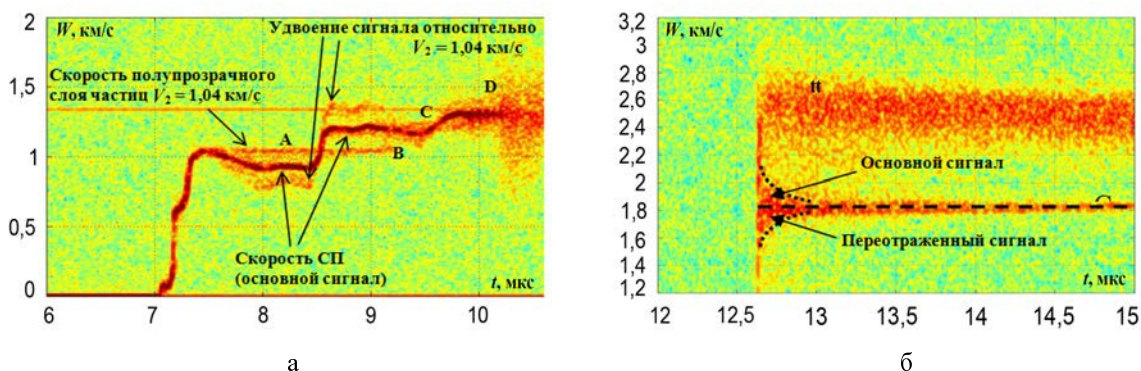


Рис. 3. Удвоение сигнала при отражении от слоя частиц

Например, скорость СП в точке А (см. рис. 3, а) составляет $V_1 = 0,92$ км/с. Лазерное излучение, отраженное от СП ($V_1 = 0,92$ км/с), переотражается от слоя частиц в сторону СП ($V_2 = 1,04$ км/с) и затем снова отражается от СП ($V_1 = 0,92$ км/с). В результате скорость дважды отраженного от СП сигнала составляет: $V_3 = 0,92 + 0,92 - 1,04 = 0,8$ км/с. Удвоенный сигнал с данной скоростью мы и наблюдаем на спектрограмме. СП в точке В догоняет полупрозрачный слой частиц, он приобретает скорость СП, и эффект исчезает.

Данный эффект удвоения скорости часто наблюдается при регистрации торможения выброшенных с поверхности частиц (см. рис. 3, б). В результате переотражения зондирующего излучения между СП и тормозящимися частицами на спектрограмме возникает составляющая, которая лежит ниже скорости СП.

Второй эффект заключается в том, что на спектрограммах опытов с малой удельной массой (см. рис. 2, ж, з) дисперсия скорости частиц практически отсутствует. Вместо скоростей облака частиц регистрируется линия, которая соответствует движению тонкого полупрозрачного слоя со скоростью, равной скорости пика откольного импульса. По нашему мнению, это связано с тем, что время взаимодействия ударной волны, выходящей со стороны металлической подложки с тонким слоем частиц, крайне мало. В результате выброса облака частиц и распределения частиц по скоростям (дисперсия скорости) не происходит, а тонкому слою частиц передается импульс откольного пика. Действительно, исходя, например, из удельной массы $0,5$ мг/см², средняя толщина слоя никелевых частиц плотностью $1,35$ г/см³ должна составлять ~ 4 мкм. Таким образом, ударная волна со скоростью ~ 4 мм/мкс проходит этот слой за одну наносекунду.

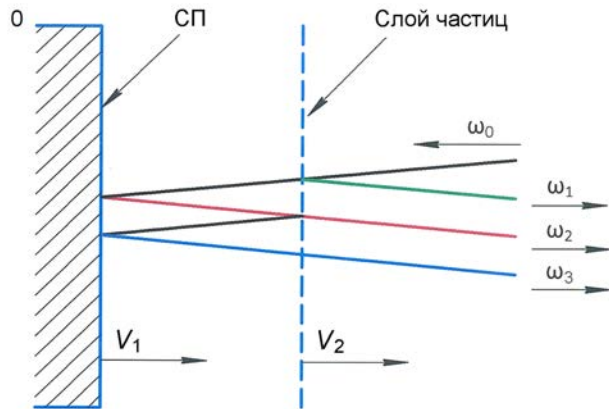


Рис. 4. Удвоение сигнала при отражении от слоя частиц. Доплеровские частотные сдвиги $\omega_1 = 2 \frac{V_1}{c} \omega_0$,

$$\omega_2 = 2 \frac{V_2}{c} \omega_0, \quad \omega_3 = 4 \frac{V_1}{c} \omega_0 - 2 \frac{V_2}{c} \omega_0$$

Заключение

Проведены эксперименты по определению минимальных значений удельной массы частиц, при которых скорость их движения регистрируется методом гетеродин-интерферометра. Показано, что этот метод надежно регистрирует поток частиц с удельной массой $\geq 0,2$ мг/см². Зарегистрирован эффект трехкратного сдвига частоты лазерного излучения, который приводит к удвоению доплеровского сигнала скорости СП относительно скорости полупрозрачного слоя частиц. Данный эффект имеет важное значение при интерпретации результатов по ударно-волновому пылению поверхности материалов. При удельной массе $\leq 0,5$ мг/см² дисперсия скорости частиц не зарегистрирована, тонкий слой частиц летит со скоростью, равной скорости пика откольного импульса.

Список литературы

1. Sorenson D. S., Minich R. W., Romero J. L., Tunnell T. W., Malone R. M. Ejecta particle size distributions for shock-loaded Sn and Al targets // *Shock Compression of Condensed Matter*. 2001.
2. Holtkamp D. B. Survey of Advanced Velocimetry Experiments: A Year (or Two) in the Life of Photon Doppler Velocimetry // *Proc. of Megagauss Magnetic Field Generation*. 2007.
3. Невмержицкий Н. В., Михайлов А. Л., Раевский В. А. и др. Микроскопическая электронно-оптическая регистрация процесса выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженного свинца // *Сб. докл. XIII Харитоновских чтений*. Саров, 2011. С. 604.
4. Sorenson D. S., Minich R. W., Romero J. L., Tunnell T. W., Malone R. M. Ejecta particle size distributions for shock-loaded Sn and Al targets // *Proc. of Shock Compression of Condensed Matter*. 2001.
5. Zellner M. B., Vogan McNeil W., Hammerberg J. E. et al. Probing the underlying physics of ejecta production from shocked Sn samples // *J. Appl. Phys.* 2008. 103, 023502.
6. Chen Yongtao, Hu Haibo et al. Experimental study of ejecta from shock melted lead // *Ibid.* 2012. 111. 053509.
7. Loison D., de Resseguier T. et al. Laser shock-induced melting and fragmentation in metals. *Shock Compression of Condensed Matter*. 2001. P. 1545–1548.
8. Strand O. T., Goosman D. R., Martinez C., Whitworth T. L. Compact system for high-speed Velocimetry using heterodyne techniques // *Rev. Sci. Instrum.* 2006. 77. P. 083108-1–083108-8.
9. Федоров А. В., Михайлов А. Л., Финюшин С. А., Калашников Д. А., Чудаков Е. А., Бутусов Е. И., Гнутов И. С. Регистрация параметров множественного откола и внутренней структуры облака частиц при ударно-волновом нагружении металлов // *ЖЭТФ*. 2016. Т. 149, вып. 2. С. 1–4.
10. 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 // *ФГВ*. 2016. Т. 52, вып. 4. С. 115–121.
11. Федоров А. В., Михайлов А. Л., Антонюк Л. К., Шмелев И. В. Экспериментальные исследования срывного разрушения капель и струй при их выбросе с поверхности жидкостей // *ФГВ*. 2016. Т. 52, вып. 4. С. 122–128.
12. Андрияш А. В., Асташкин М. В., Баранов В. К. др. Оптигетеродинные доплеровские измерения баллистического разлета продуктов разрушения поверхности ударной волны: эксперимент и теория // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2016. Т. 149, вып. 2.

Determination of the Threshold for Detecting the Minimum Specific Mass of Particles in the Study of Shock-Wave Dusting of the Surface of Materials Using a Laser Heterodyne Interferometer. Registration of the Effect of Multiple Doppler Signal Frequency Shift

**A. V. Fedorov, A. L. Mikhailov, S. A. Finyushin, D. A. Kalashnikov,
E. A. Chudakov, E. T. Butusov, I. S. Gnutov**

It is known that under conditions of shock-wave loading, particles are ejected from the surface of materials. This paper presents the results of experiments to determine the minimum values of the specific mass of particles, at which the speed of their movement can be recorded using the heterodyne interferometer (PDV) technique. The effect of a multiple frequency shift of the Doppler signal upon reflection of laser radiation from the surface of metals and a semitransparent layer of dust particles is described. Determining the characteristics of particle flows during shock wave dusting of materials in recent years is the subject of research in many scientific papers. New results in this area are obtained, among other things, using a laser heterodyne interferometer (PDV technique). The heterodyne-interferometer makes it possible to record the spectrum of particle velocities, estimate their size according to the law of deceleration in a gas, and use indicator foils to determine their specific mass. However, this technique also has a number of features that require a detailed analysis. It is important to know: how deeply the probing radiation penetrates into the dust flow, how to interpret the appearance of velocity tracks on the spectrograms, what are the minimum values of the specific mass of particles at which the method effectively registers the velocity dispersion of the dust cloud.