УДК 53.092

DOI: 10.18384/2310-7251-2021-4-66-74

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ УДАРНЫХ ВОЛН В ПРЕССОВАННОМ ПОРОШКЕ ИЗ НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ

Ростилов Т. А., Зиборов В. С., Долгобородов А. Ю.

*Объединённый институт высоких температур Российской академии наук
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, Российская Федерация*

Аннотация

Цель: экспериментальное исследование особенностей распространения волн ударного сжатия в образцах из спрессованных наночастиц никеля (npNi), получение данных по ударной адиабате вещества и анализ профилей ударных волн в заданном диапазоне давлений.

Процедура и методы. Методом лазерной интерферометрии в условиях одноосного нагружения впервые исследованы особенности распространения волн ударного сжатия в образцах из спрессованных наночастиц никеля при относительно малых давлениях – 1,7 и 4,1 ГПа.

Результаты. Для исследованного вещества получены профили ударных волны и точки на ударной адиабате. Определён предел упругости Гюгонио – 0,48 ГПа.

Теоретическая и/или практическая значимость. Обнаружено, что профили ударных волн в прессованном порошке из наночастиц никеля имеют сложную многоступенчатую структуру, в которой чётко выделяется волна-предвестник. Показано, что профиль волны сжатия можно описать многократным отражением волны-предвестника от исследуемой поверхности образца и следующей за ним пластической волны сжатия. Установлено, что в диапазоне исследованных давлений толщина образца и режим нагружения определяют процесс ударного сжатия. Показано, что разница между состояниями вещества за фронтом пластической ударной волны до первого отражения предвестника и после последнего отражения существенна.

Ключевые слова: ударная волна, предвестник, ударная адиабата, пористость, профиль скорости, VISAR, спрессованный порошок, наноникель

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-15-2020-785 от 23 сентября 2020 г.)

EXPERIMENTAL STUDY OF THE STRUCTURE OF SHOCK WAVES IN A COMPRESSED POWDER OF NIKEL NANOPARTICLES

T. Rostilov, V. Ziborov, A. Dolgoborodov

*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Science
13 build. 2 ulitsa Ijorskaia, Moscow 125412, Russian Federation*

Abstract

Aim. Features of propagation of shock compression waves in samples of compressed nickel nanoparticles have been studied for the first time by laser interferometry under uniaxial loading conditions at relatively low pressures of 1.7 and 4.1 GPa.

Methodology. Shock wave profiles of a compressed nickel nanopowder loaded by a one-dimensional shock compression wave are measured by a laser interferometry method.

Results. Shock wave profiles and points of the shock Hugoniot of the material are obtained. The Hugoniot elastic limit is determined to be 0.48 GPa.

Research implications. It is found that shock wave profiles of pressed nickel nanoparticles have a complex multi-stage structure in which the precursor wave is clearly distinguished. It is shown that the compression wave profile can be described by multiple reflection of the precursor wave from a sample surface and an oncoming plastic shock wave. It is established that in the range of studied pressures, the sample thickness and the loading regime determine the process of shock compression. It is demonstrated that the difference between the states of matter behind the plastic shock wave front before the first precursor reflection and after the last reflection is significant.

Keywords: shock wave, precursor, shock Hugoniot, porosity, velocity profile, VISAR, compressed powder, nanonickel

Acknowledgments. This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement with the JIHT RAS No. 075-15-2020-785 of September 23, 2020)

Введение

Широкое применение пористых материалов в современных технологиях требует изучения их свойств в условиях ударных нагрузок [1-4]. В последнее время вырос интерес к материалам из спрессованного нанопорошка, параметры которых отличаются от хорошо изученных веществ с микропорами. Это обстоятельство также указывает на необходимость в надёжных данных об их свойствах при ударном сжатии.

Полученные экспериментально ударные адиабаты необходимы для создания уравнений состояния вещества, на базе которых разрабатываются численные модели свойств материалов в широком диапазоне параметров.

Площадь поверхностей пор в материалах из нанопорошков на три порядка величины и более превышает площадь поверхности пор в материалах из микрочастиц. Известно, что схлопывание пор при ударном сжатии сопровождается тепловым эффектом, вызванным скольжением частей внутренних поверхностей, который тем сильнее, чем больше площадь поверхности пор [5; 6]. В этой связи определение ударных адиабат приобретает особое значение.

Метод лазерной интерферометрии в условиях одноосного нагружения позволяет измерить профиль скорости исследуемой поверхности образца при выходе на неё ударной волны. Форма профиля скорости содержит информацию о вязких свойствах материала и механизме процесса сжатия, влиянии пористости и теплового эффекта на него, в частности.

Профили ударных волн в неоднородных материалах имеют сложную структуру [7; 8]. Выделяют волну-предвестник и волну пластической деформации (пластическую ударную волну).

Целью данной работы было экспериментальное исследование особенностей распространения волн ударного сжатия в образцах из спрессованных наночастиц никеля (pnNi), получение данных по ударной адиабате вещества и анализ профилей ударных волн в заданном диапазоне давлений.

Эксперимент

Образцы были изготовлены из порошка наночастиц никеля размером 35×55 нм путём прессования в атмосфере аргона. Через сутки пребывания на воздухе масса образца увеличивалась на 2% и далее не менялась. Вероятно, это связано с окислением образцов кислородом из атмосферы. Образцы имели плотность $4,72 \text{ г/см}^3$, пористость ($k = 1,98$).

Рис. 1 / Fig. 1. Схема эксперимента / Experiment scheme.

Источник: по данным авторов.

Эксперименты проведены на метательной установке Стрела-2М, оснащённой интерферометром VISAR [7; 8]. Плоский ударник известной толщины из заданного материала ускорялся в одномерном канале. Его скорость при выходе из канала и отклонение его нормали к поверхности от оси движения измерялись с точностью 1% четырьмя игольчатыми контактными датчиками, установленными на сборке, содержащей образец (рис. 1). Интерферометрические измерения проводились на границе образец – водяное окно. В эксперименте 1 использован медный ударник, в эксперименте 2 ударник из сплава Д16Т (см. табл. 1). Существенная толщина ударника ~ 10 мм обеспечивала необходимую задержку прихода волны разгрузки, чтобы надёжно определить ширину фронта волны ударного сжатия.

Таблица 1 / Table 1

Параметры ударного сжатия pnNi / Shock compression parameters pnNi.

№	V_i , м/с	h_s , мм	Предвестник			Пластическая ударная волна			
			D_1 , км/с	p_1 , ГПа	u_{p1} , км/с	D_2 , км/с	$\bar{D}_2$, км/с	p_2 , ГПа	u_{p2} , км/с
1	296	2,10	2,441	0,463	0,040	-	1,249	1,672	0,249
2	837	2,06	2,604	0,490	0,040	1,486	1,442	4,108	0,579

Источник: по данным авторов

Временное разрешение в измерениях профилей скорости интерферометром было порядка ~ 1 нс. В табл. 1 приведена толщина образцов и условия экспериментов. Погрешность измерений скоростей волн составила несколько процентов.

Профили скорости границы образец – водяное окно в экспериментах показаны на рис. 2. На начальной стадии хорошо виден быстрый рост скорости, который можно связать с волной-предвестником. В обоих экспериментах темп нарастания скорости предвестников практически совпал. Следующая за предвестником заметная фаза нарастания скорости связана с выходом пластической ударной волны на исследуемую поверхность (особенно заметно в эксперименте 2 на рис. 2). Её фронт в эксперименте 1 имеет ярко выраженную волнообразную форму.

Рис. 2 / Fig. 2. Профили скорости границы образец – водяное окно в экспериментах с pnNi. В качестве начала отсчёта выбрано первое появление предвестника на исследуемой границе / Velocity profiles of the sample – water window interface in experiments with pnNi. The first appearance of the precursor at the studied boundary was chosen as the starting point.

Источник: по данным авторов.

Анализ профилей скорости и обсуждение

В основе анализа сложной многоволновой формы пластической ударной волны лежит тот факт, что упругая часть ударной адиабаты pHnNi сильно отличается от ударной адиабаты материала окна – воды (рис. 3в). Из-за их различия переотражения предвестника весьма существенно влияют на форму измеряемого профиля. Предвестник достигает границы образец – вода, частично от неё отражается в виде волны разрежения и движется навстречу фронту пластической ударной волны, отражается от него в виде волны сжатия и вновь движется к свободной поверхности (рис. 3 а, б). Такие реверберации происходят до тех пор, пока фронт пластической волны не достигнет исследуемой границы.

Монотонное возрастание скорости на профиле после точек А и В (рис. 3б) можно связать с прочностными свойствами среды [9] или же с тем, что неоднороден отклик частиц разного размера (образующих, в свою очередь, поры разного размера) на упругое сжатие в предвестнике, из-за чего предвестник имеет «дисперсный» вид.

Для оценки скорости пластической УВ до её первого взаимодействия с предвестником будем полагать, что скорость первых отражений предвестника внутрь образца и от фронта пластической УВ обратно на исследуемую поверхность равны: $D_{-1} = D_1 - u_{p1}$ и $D_{1'} = D_1 + \bar{u}_{i1}$, соответственно [10]. Определив по профилю времена первого и второго появлений предвестника на исследуемой поверхности, проведём из соответствующих мест на x т-диаграмме траектории волн,двигающихся со скоростями – D_{-1} и $D_{1'}$ (рис. 3а). На этой диаграмме пересечение этих линий даст точку первого взаимодействия пластической УВ с первым отражением предвестника. Линия, проведённая от начала отсчёта до этой точки, позволяет оценить истинную скорость пластической ударной волны D_2 . В эксперименте 2 она равна 1,486 км/с, что больше на 3% наблюдаемой скорости пластической волны $\bar{D}_2$, определённой по формуле:

$$\bar{D}_2 = \frac{h_s + \bar{u}_i(t_2 - t_1)}{(t_2 - t_0)}.$$

В этом соотношении учитывается, что пластической УВ необходимо догнать границу образец – вода, движущуюся со средней скоростью $\bar{u}_i$.

Первое взаимодействие предвестника и пластической УВ происходит на расстоянии порядка 1,5 мм от плоскости соударения. Это означает, что ударное нагружение образца не однородно – до 1,5 мм оно должно быть более сильным. Такое нагружение может приводить к тому, что при определённых режимах нагружения остаточная пористость образца будет различна на разной толщине образца [11].

Для определения предела упругости Гюгонио (точка А' на рис. 3в) необходимо задать среднее значение скорости предвестника на профиле u_{i1} (точка А на рис. 3б). Среднее значение скорости определялось как точка пересечения прямых, которыми можно описать участок резкого роста и следующий за ним участок монотонного роста скорости.

Рис. 3 / Fig. 3. Иллюстрация к анализу волновой структуры в pnNi на примере эксперимента 2: (а) xt -диаграмма, совмещённая с профилем скорости (б); (в) p - u -диаграмма. Обозначения на (б) и (в) не равнозначны / Illustration for the analysis of the wave structure in pnNi using the example of experiment 2: (а) xt -diagram combined with the velocity profile (б); (в) p - u -diagram. The designations for (б) and (в) are not equivalent.

Источник: по данным авторов.

На xt -диаграмме скорости предвестника на втором и третьем цикле ревербераций полагались равными D_{-1} и D_1' в зависимости от направления движения волны (рис. 3а). Времена второго и третьего появлений предвестника на исследуемой поверхности, полученные с использованием такого приближения, несколько не соответствовали времени, измеренному по профилю скорости. Третье появление предвестника различимо очень слабо на фоне последующего выхода пластической УВ. Для дальнейшего анализа необходимы более точные оценки для скоростей предвестника на каждом этапе его ревербераций.

Заключение

Исследована структура ударной волны в 1,7 и 4,1 ГПа в прессованном порошке из наночастиц никеля. Сложная структура профиля ударной волны, наблюдаемая в экспериментах, объяснена с помощью рассмотрения ревербераций волны-предвестника между исследуемой поверхностью и фронтом пластической ударной волны. Из-за этих ревербераций ударное нагружение образца неоднородно, поскольку скорость ударной волны понижается при каждом взаимодействии с отражённым предвестником. Таким образом, ударное сжатие pnNi в области давлений, при которых формируется двух-волновая конфигурация, определяется не только свойствами материала и режимом нагружения, но и толщиной образца, которая напрямую задаёт количество ревербераций. Определён предел упругости Гюгонио для прессованного наноникеля – 0,48 ГПа.

Статья поступила в редакцию 27.09.2021 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Медведев А. Б., Трунин Р. Ф. Ударное сжатие пористых металлов и силикатов // Успехи физических наук. 2012. Т. 182. № 8. С. 829–846. DOI: 10.3367/UFNr.0182.201208b.0829.
2. Dattelbaum D. M., Coe J. D. Shock-driven decomposition of polymers and polymeric foams // Polymers. 2019. Vol. 11. Iss. 3. P. 493. DOI: 10.3390/polym11030493.
3. Davison L. Shock-wave structure in porous solids // Journal of Applied Physics. 1971. Vol. 42. Iss. 13. P. 5503–5512. DOI: 10.1063/1.1659971.
4. Linde R. K., Schmidt D. N. Shock propagation in nonreactive porous solids // Journal of Applied Physics. 1966. Vol. 37. Iss. 8. P. 3259–3271. DOI: 10.1063/1.1703192.
5. Ударная сжимаемость смесей микро- и наноразмерных порошков никеля и алюминия / Якушев В. В., Ананьев С. Ю., Уткин А. В., Жуков А. Н., Долгобородов А. Ю. // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54. № 5. С. 45–50. DOI: 10.15372/FGV20180506.
6. Скорость звука в ударно-сжатых образцах из смеси микро- и нанодисперсных порошков никеля и алюминия / Якушев В. В., Ананьев С. Ю., Уткин А. В., Жуков А. Н., Долгобородов А. Ю. // Физика горения и взрыва. 2019. Т. 55. № 6. С. 108–114. DOI: 10.15372/FGV20190615.
7. Зиборов В. С., Канель Г. И., Ростиллов Т. А. Экспериментальное исследование характера деформации сферопластиков при ударном сжатии // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56. № 2. С. 124–129. DOI: 10.15372/FGV20200215.
8. Rostilov T. A., Ziborov V. S. Experimental study of shock wave structure in syntactic foams under high-velocity impact // Acta Astronautica. 2021. Vol. 178. P. 900–907. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.10.022.
9. Bonnan S., Hereil P. L., Collombet F. Experimental characterization of quasi static and shock wave behavior of porous aluminum // Journal of Applied Physics. 1998. Vol. 83. Iss. 11. P. 5741–5749. DOI: 10.1063/1.367430.
10. Ahrens T. J., Gust W. H., Royce E. B. Material Strength Effect in the Shock Compression of Alumina // Journal of Applied Physics. 1968. Vol. 39. Iss. 10. P. 4610–4616. DOI: 10.1063/1.1655810.
11. Butcher B. M., Karnes C. H. Dynamic compaction of Porous Iron // Journal of Applied Physics. 1969. Vol. 40. Iss. 7. P. 2967–2976. DOI: 10.1063/1.1658109.

REFERENCES

1. Medvedev A. B., Trunin R. F. [Shock compression of porous metals and silicates]. In: *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physics-Uspekhi], 2012, vol. 182, no. 8, pp. 829–846. DOI: 10.3367/UFNr.0182.201208b.0829.
2. Dattelbaum D. M., Coe J. D. Shock-driven decomposition of polymers and polymeric foams. In: *Polymers*, 2019, vol. 11, iss. 3, p. 493. DOI: 10.3390/polym11030493.
3. Davison L. Shock-wave structure in porous solids. In: *Journal of Applied Physics*, 1971, vol. 42, iss. 13, pp. 5503–5512. DOI: 10.1063/1.1659971.
4. Linde R. K., Schmidt D. N. Shock propagation in nonreactive porous solids. In: *Journal of Applied Physics*, 1966, vol. 37, iss. 8, pp. 3259–3271. DOI: 10.1063/1.1703192.
5. Yakushev V. V., Anan'ev S. Yu., Utkin A. V., Zhukov A. N., Dolgoborodov A. Yu. [Shock compressibility of mixtures of micro- and nano-sized nickel and aluminum powders]. In: *Fizika goreniya i vzryva* [Combustion, Explosion and Shock Waves], 2018, vol. 54, no. 5, pp. 45–50. DOI: 10.15372/FGV20180506.
6. Yakushev V. V., Anan'ev S. Yu., Utkin A. V., Zhukov A. N., Dolgoborodov A. Yu. [Sound velocity in shock-compressed samples from a mixture of micro- and nanodispersed nickel and aluminum powders]. In: *Fizika goreniya i vzryva* [Combustion, Explosion and Shock Waves], 2019, vol. 55, no. 6, pp. 108–114. DOI: 10.15372/FGV20190615.
7. Ziborov V. S., Kanel' G. I., Rostilov T. A. [Experimental study of deformation of spheroplastics under shock compression]. In: *Fizika goreniya i vzryva* [Combustion, Explosion and Shock Waves], 2020, vol. 56, no. 2, pp. 124–129. DOI: 10.15372/FGV20200215.
8. Rostilov T. A., Ziborov V. S. Experimental study of shock wave structure in syntactic foams under high-velocity impact. In: *Acta Astronautica*, 2021, vol. 178, pp. 900–907. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.10.022.
9. Bonnan S., Hereil P. L., Collombet F. Experimental characterization of quasi static and shock wave behavior of porous aluminum. In: *Journal of Applied Physics*, 1998, vol. 83, iss. 11, pp. 5741–5749. DOI: 10.1063/1.367430.
10. Ahrens T. J., Gust W. H., Royce E. B. Material Strength Effect in the Shock Compression of Alumina. In: *Journal of Applied Physics*, 1968, vol. 39, iss. 10, pp. 4610–4616. DOI: 10.1063/1.1655810.
11. Butcher B. M., Karnes C. H. Dynamic compaction of Porous Iron. In: *Journal of Applied Physics*, 1969, vol. 40, iss. 7, pp. 2967–2976. DOI: 10.1063/1.1658109.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ростилев Тимофей Андреевич – младший научный сотрудник лаборатории №6.2. – ударно-волновых воздействий Объединённого института высоких температур Российской академии наук;
e-mail: t.rostilov@ihed.ras.ru;

Зиборов Вадим Серафимович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории №6.2. – ударно-волновых воздействий Объединённого института высоких температур Российской академии наук;
e-mail: ziborov.vs@yandex.ru

Долгобородов Александр Юрьевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией №6.2. – ударно-волновых воздействий Объединённого института высоких температур Российской академии наук;
e-mail: aldol@mail.ihed.ras.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Timofei A. Rostilov – Research Assistant, Laboratory №6.2. – shock-wave effects, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Science;
e-mail: t.rostilov@ihed.ras.ru;

Vadim S. Ziborov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Laboratory №6.2. – shock-wave effects, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Science;
e-mail: ziborov.vs@yandex.ru;

Aleksandr Ju. Dolgoborodov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Laboratory №6.2. – shock-wave effects, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Science;
e-mail: aldol@mail.ihed.ras.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Ростилов Т. А., Зиборов В. С., Долгобородов А. Ю. Экспериментальное исследование структуры ударных волн в прессованном порошке из наночастиц никеля // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2021. № 4. С. 66–74.

DOI: 10.18384/2310-7251-2021-4-66-74.

FOR CITATION

Rostilov T. A., Ziborov V. S., Dolgoborodov A. Yu. Experimental study of the structure of shock waves in a compressed powder of nikel nanoparticles. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2021, no. 4, pp. 66–74.

DOI: 10.18384/2310-7251-2021-4-66-74.