

Брагов А.М., Константинов А.Ю., Кочетков А.В., Модин И.А., Савихин А.О. Экспериментальное исследование деформационных свойств насыпного слоя из свинцовых шариков при динамическом и квазистатическом нагружении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 4. – С. 16–27. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.02

Bragov A.M., Konstantinov A.U., Kochetkov A.V., Modin I.A., Savikhin A.O. Experimental study of deformation properties of a bulk layer from plumbum balls under dynamic and quasistatic loading. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2017, no. 4, pp. 16-27. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.02



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2017

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI 10.15593/perm.mech/2017.4.02

УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ НАСЫПНОГО СЛОЯ ИЗ СВИНЦОВЫХ ШАРИКОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ И КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

А.М. Брагов, А.Ю. Константинов, А.В. Кочетков, И.А. Модин, А.О. Савихин

Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 5 сентября 2017 г.
Принята: 21 ноября 2017 г.
Опубликована: 29 декабря 2017 г.

Ключевые слова:

насыпной слой, пористая среда, эксперимент, разрезной стержень Гопкинсона, динамическая деформация, статическая деформация, сжатие, нелинейность, необратимость.

АННОТАЦИЯ

Насыпные слои из металлических шариков являются перспективным демпфирующим элементом, защищающим конструкции от импульсных воздействий. Для оценки их демпфирующих свойств необходимы знания деформационных и прочностных характеристик при статическом и динамическом сжатии. В деформировании насыпных пористых сред можно выделить три этапа: переукладка до плотной упаковки без заметной деформации частиц (ликвидация свободной пористости); деформирование до почти полной компоновки (отсутствие пор); деформирование как сплошного материала без пор. Для получения динамических характеристик слоя использовалась методика Кольского в системе разрезного стержня Гопкинсона. Приведены результаты исследований при различных скоростях деформации, определяемых начальной скоростью вылета бойка. В силу малого сопротивления пористого образца деформированию на стадиях переупаковки и начального этапа деформирования шариков большая часть сформированного при ударе бойка по нагружающему стержню импульса сжатия возвращается в первый мерный стержень. Это приводит к повторному циклическому нагружению образца со всё более убывающей амплитудой нагрузки. Помимо кривых активного нагружения методика позволяет получить кривые разгрузки в процессе одного эксперимента. Показано, что в результате деформирования образцов с ростом нагрузки наблюдается развитое пластическое течение и фрагментация шариков. Статическое сжатие насыпной среды производилось на испытательной машине Zwick.

© **Брагов Анатолий Михайлович** – доктор технических наук, профессор, e-mail: bragov@mech.unn.ru

Константинов Александр Юрьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: constantinov.al@yandex.ru

Кочетков Анатолий Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: kochetkov@mech.unn.ru

Модин Иван Александрович – аспирант, e-mail: mianet@mail.ru

Савихин Андрей Олегович – младший научный сотрудник, e-mail: andrey-savikhin@yandex.ru

Anatoliy M. Bragov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: bragov@mech.unn.ru

Aleksandr Iu. Konstantinov – CSc in Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: constantinov.al@yandex.ru

Anatoliy V. Kochetkov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: kochetkov@mech.unn.ru

Ivan A. Modin – PhD Student, e-mail: mianet@mail.ru

Andrey O. Savikhin – Junior Researcher, e-mail: andrey-savikhin@yandex.ru



Проведенные испытания в широком диапазоне нагрузок показали большие отличия между статическими и динамическими кривыми деформирования, характерные для высокопористых сред. Полученные результаты могут быть использованы для предсказательного математического моделирования элементов конструкций, содержащих насыпные слои.

© ПНИПУ

EXPERIMENTAL STUDY OF DEFORMATION PROPERTIES OF A BULK LAYER FROM PLUMBUM BALLS UNDER DYNAMIC AND QUASISTATIC LOADING

A.M. Bragov, A.Iu. Konstantinov, A.V. Kochetkov, I.A. Modin, A.O. Savikhin

Scientific – Research Institute of Mechanics, National Research Nizhny Novgorod State University
N.I. Lobachevsky, Nizhny Novgorod, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 5 September 2017
Accepted: 21 November 2017
Published: 29 December 2017

Keywords:

bulk layer, porous medium, experiment, Hopkinson bar, dynamic deformation, static deformation, compression, nonlinearity, irreversibility.

ABSTRACT

Bulk layers of metal balls are a promising damping element that protects structures from impulsive actions. To assess their damping properties, the knowledge of the deformation and strength characteristics for static and dynamic compression is required. Three stages can be distinguished in the deformation of bulk porous media: re-stacking to close packing without appreciable deformation of the particles (elimination of free porosity); deformation to almost complete layout (absence of pores); deformation as a continuous material without pores. To obtain the dynamic characteristics of the layer, we used the Kolsky method with the Hopkinson bar system. The results of investigations at various deformation rates determined by the initial speed of the striker's departure are presented. Due to the small resistance of the porous sample to the deformation at the stages of repackaging and the initial stage of the deformation of the balls, most of the compression pulse formed when the striker projectile the loading bar is returned to the first measuring bar. This leads to a repeated cyclic loading of the sample with an increasingly decreasing load amplitude. In addition to the active loading curves, the technique allows obtaining unloading curves in the course of one experiment. It is demonstrated that a developed plastic flow and fragmentation of the balls are observed as a result of deformation of the samples with increasing load. Static compression of the bulk was carried out on a Zwick test machine. The tests carried out in a wide range of loads showed great differences between the static and dynamic deformation curves characteristic of highly porous media. The obtained results can be used for predictive mathematical modeling of elements of structures containing bulk layers.

© PNRPU

Введение

Насыпные слои являются перспективным демпфирующим элементом, защищающим конструкции от импульсных воздействий. В работах Б.Е. Гельфанда, М.В. Сильникова и др. [1–3] приведены результаты экспериментов по определению параметров нагружения жесткой стенки, покрытой слоями различных гранулированных веществ, при действии воздушной ударной волны. Построены зависимости максимального давления на подложке от высоты слоя. Предложена модель, объясняющая усиление ударно-волновой нагрузки, основанная на рассмотрении движения насыпной среды при импульсном нагружении. В работах А. Britan, G. Ben-Dor [4–14] показано, что размещение слоя пористых насыпных слоев перед стенкой мишени уменьшило величину остаточного напряжения и энергии мишени примерно на 30 процентов, в то же время существенно уменьшая скорость приложенной нагрузки. В работах Shukla, Damania [15, 16] исследовалось распространение динамической нагрузки в гранулированных средах, состоящих из дисков, уложенных различными способами. Авторы зафиксировали, что распространение волн при динамиче-

ческой нагрузке зависит от диаметра диска и способа их укладки. Скорость волны значительно падала в первых нескольких дисках (гранулах), после чего скорость волны изменялась незначительно. Основными факторами, влияющими на деформирование образцов, являлись площадь контакта и трение между контактирующими дисками (гранулами). Работы [17, 18] посвящены численному исследованию особенностей отражения волн в насыпных средах. Для исследования волновых процессов в насыщенных пористых средах разработана двухскоростная с двумя тензорами напряжений математическая модель, построенная методами механики многофазных сред. Рассмотрены процессы прохождения волной типа «ступенька» границы раздела «газ–пористая среда» и отражения от жесткой стенки, покрытой пористым материалом, проанализировано влияние упругих параметров пористой среды и воздействующей волны на процесс отражения; выполнено сопоставление численных результатов с экспериментальными данными других авторов, по результатам исследований сделан вывод, что пористый экран может как ослаблять, так и усиливать динамическое воздействие на преграду воздушной ударной волны. Степень усиления также зависит от толщины слоя, его структуры и размера гранул. В работах [19, 20] исследовались демпфирующие свойства гранулированных слоев, состоящих из полых металлических сфер. Механизм демпфирования заключается в поглощении энергии воздействующего импульса вследствие больших деформаций и разрушения сфер. Работы [21–26] посвящены исследованию многослойных пористых газопроницаемых пакетов из металлических плетеных сеток, которые, как и гранулированные слои, способны защищать конструкции от ударных и взрывных воздействий. В монографиях Г.М. Ляхова [27, 28] подробно описаны экспериментально-теоретические исследования волновых процессов в грунтах как пористых многокомпонентных средах. Использовались модели деформирования грунтов как вязкоупругих и вязкопластических сред. Приводится обширный обзор экспериментальных исследований деформирования песчаных грунтов насыпной плотности в плоских, цилиндрических и сферических волнах. Таким образом, за исключением грунтовых сред в научной литературе существует небольшое количество работ посвященных исследованию пористых насыпных слоев в виде шариков или гранул. Полученные результаты ограничиваются малыми нагрузками, которые не вызывают развитое пластическое течение или разрушение материала шариков.

1. Экспериментальные исследования пористого гранулированного слоя при статическом сжатии

Статические исследования сжатия насыпного слоя из свинцовых шариков проведены в лаборатории физико-механических испытаний ННГУ им. Лобачевского, на сервогидравлической машине Zwick Amsler HA 100. Для проведения эксперимента на сжатие была изготовлена оснастка, состоящая из двух элементов (толстостенный цилиндр и сжимающий поршень). Цилиндр высотой 40 мм и внутренним диаметром 40 мм, поршень высотой 70 мм и диаметром 39,8 мм. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

Свинцовые шарики засыпались в цилиндр и сдавливались поршнем. Шарики имели диаметр 2 мм (что соответствует дроби № 9), а толщина слоя варьировалась от 20 до 35 мм. По толщине слоя укладывалось более 10 шариков. По результатам экспериментов была получена кривая напряжение-деформация для слоя с разгрузками (рис. 2). Пластическое течение материала шариков активно развивалось после достижения величины напряже-

ния 1,45 МПа. Разгрузочные линии с высокой точностью можно считать прямыми линиями. Величина остаточных деформаций после нагружения до 70 МПа составила 0,39. Разгрузочный модуль E_r в проведенных испытаниях изменялся от 0,5 до 2 ГПа (модуль упругости свинца $E = 16$ ГПа).

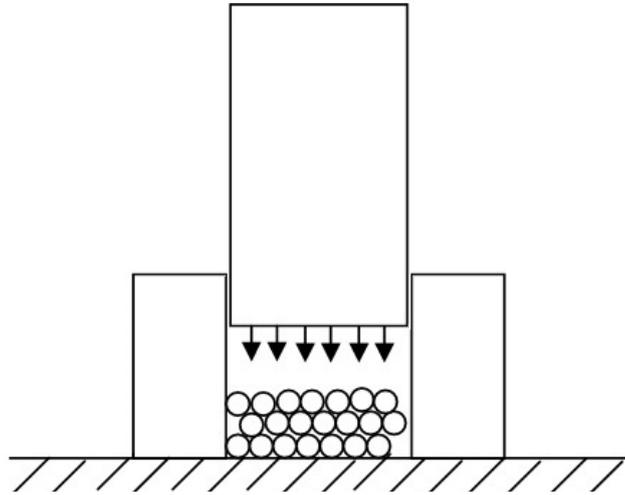


Рис. 1. Схема эксперимента. Статика
Fig. 1. The scheme of the experiment. Statics

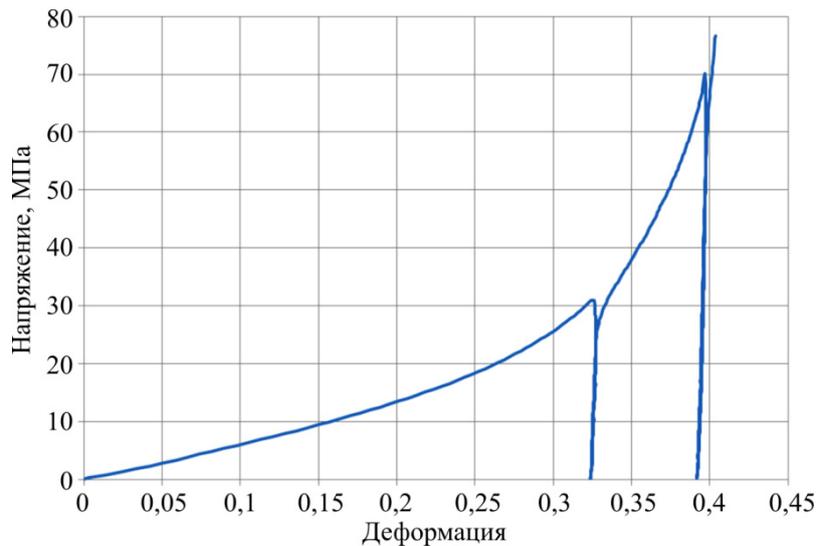


Рис. 2. Диаграмма статического сжатия
Fig. 2. Static compression diagram

По результатам статических испытаний видно, что деформирование слоя из свинцовых шариков по мере увеличения нагрузки сжатия носит выраженный нелинейный необратимый характер, что характерно для пористых сред (см. рис. 2).

2. Экспериментальные исследования пористого гранулированного слоя при динамическом сжатии

Экспериментальные исследования динамических свойств проводились на экспериментальной установке с разрезным стержнем Гопкинсона [29–33] (рис. 3). Испытания

проводились следующим образом. Образец 3 помещался между двумя мерными стержнями 1 (опорный) и 4 (нагружающий). Один из стержней нагружался ударом короткого стержня-ударника 5, движущегося со скоростью V_0 . При этом в стержне 4 формировался прямоугольный импульс сжатия, который нагружал образец. В процессе эксперимента с помощью тензодатчиков 2 регистрировались деформации в сечениях нагружающего и опорного мерного стержней. Данная информация позволяет с помощью формул Кольского [29] рассчитать зависимость изменения длины образца от времени, а также действующую на него при этом силу. Как и для статических испытаний, была выбрана свинцовая дробь диаметром 2 мм.

В оснастку (цилиндр), внутренний диаметр которой составлял 20,2 мм, засыпались шарики, затем с обеих сторон слой поджимался мерными стержнями диаметром 20 мм. Толщина слоя из свинцовых шариков варьировалась от 10 до 20 мм. Разрезной стержень и поджатый им с обеих сторон гранулированный слой нагружался стержнем-ударником диаметром 20 мм, вылетающим из пневматической пушки (см. рис. 3). Скорость вылета ударника варьировалась от 5 до 17 м/с. На рис. 4 показаны деформированные и разрушенные шарики слоя при различных скоростях вылета ударника. Если при напряжении в волнах менее 40–50 МПа наблюдается пластическое течение материала шариков, то при больших напряжениях происходит массовая фрагментация шариков.

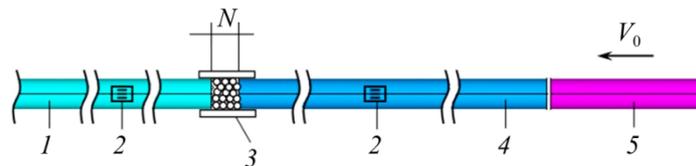


Рис. 3. Схема эксперимента. Динамика
Fig. 3. The scheme of the experiment. Dynamics

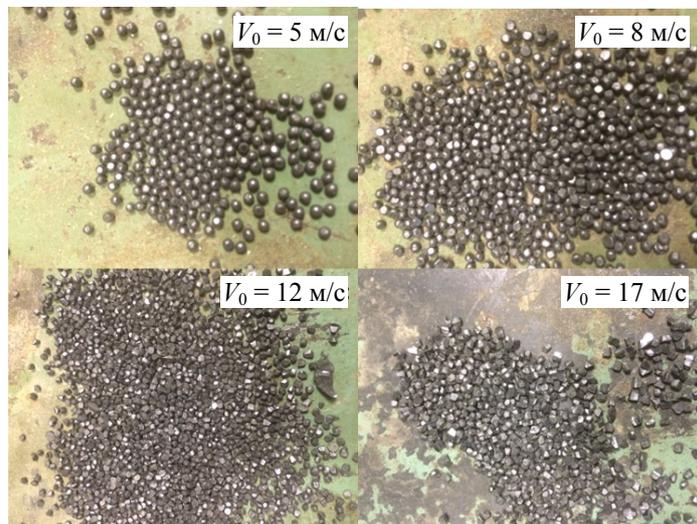


Рис. 4. Деформирование образцов при $V_0 = 5, 8, 12, 17$ м/с
Fig. 4. Deformation of samples $V_0 = 5, 8, 12, 17$ m/s

По результатам экспериментов были построены кривые напряжение-деформация для слоя из свинцовых шариков (рис. 5) (для экспериментов со скоростью вылета ударника: 1 – 17 м/с; 2 – 12 м/с; 3 – 8 м/с; 4 – 5 м/с; 5 – квазистатическая кривая, приведенная для сравнения) и рис. 6 (в увеличенном масштабе для экспериментов со скоростью вылета ударника: 1–8 м/с; 2–5 м/с).

На рис. 6 диаграмма деформирования короче, чем на рис. 5, это связано с тем, что меньшая скорость ударника вызывает менее интенсивное деформирование образца. С увеличением деформации возрастает отличие динамических диаграмм деформирования от квазистатической. На динамических диаграммах помимо участков нагружения, полученных в результате сжатия образца прямыми волнами от ударяемого стержня, видны участки разгрузки в результате действия отраженных волн напряжения от торца стержня при отскоке ударника [21, 29]. Таким образом, происходит процесс динамического нагружения образца в несколько циклов с разгрузками в течение одного эксперимента. Разгрузочные кривые, как и в квазистатическом случае, близки к прямым линиям. Значение модуля разгрузки в предположении его постоянства находятся в интервале от 2,5 до 6 ГПа.

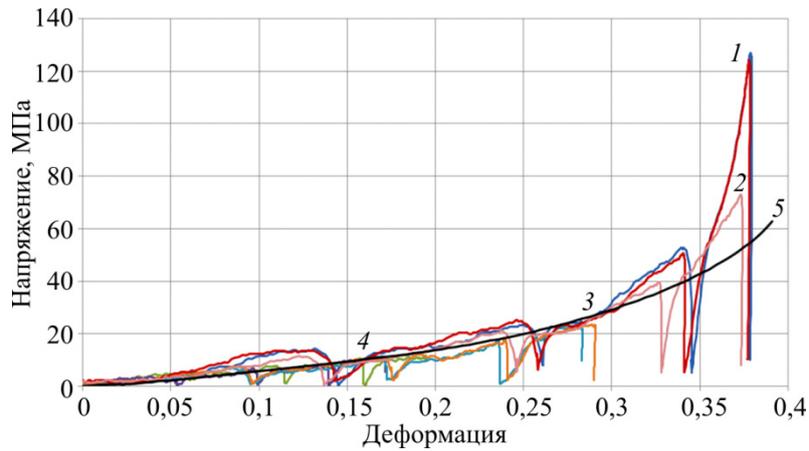


Рис. 5. Диаграммы динамического сжатия
Fig. 5. Dynamic compression diagrams

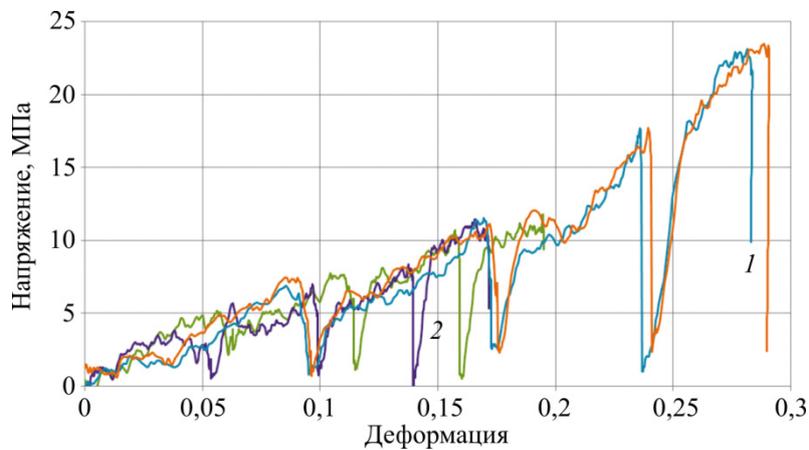


Рис. 6. Диаграммы деформирования
Fig. 6. Deformation diagrams

Следует отметить, что в силу малого сопротивления образца деформированию на стадиях переупаковки и начального этапа деформирования шариков большая часть сформированного при ударе бойка по нагружающему стержню импульса сжатия возвращается в нагружающий мерный стержень. Это приводит к повторному циклическому нагружению образца со всё убывающей амплитудой нагрузки. Так, на рис. 5 и 6 показано по четыре цикла нагрузки-разгрузки образца в каждом эксперименте. Далее происходит накопление ошибок, связанных с наложением и взаимодействием прямых и отраженных волн в стержнях.

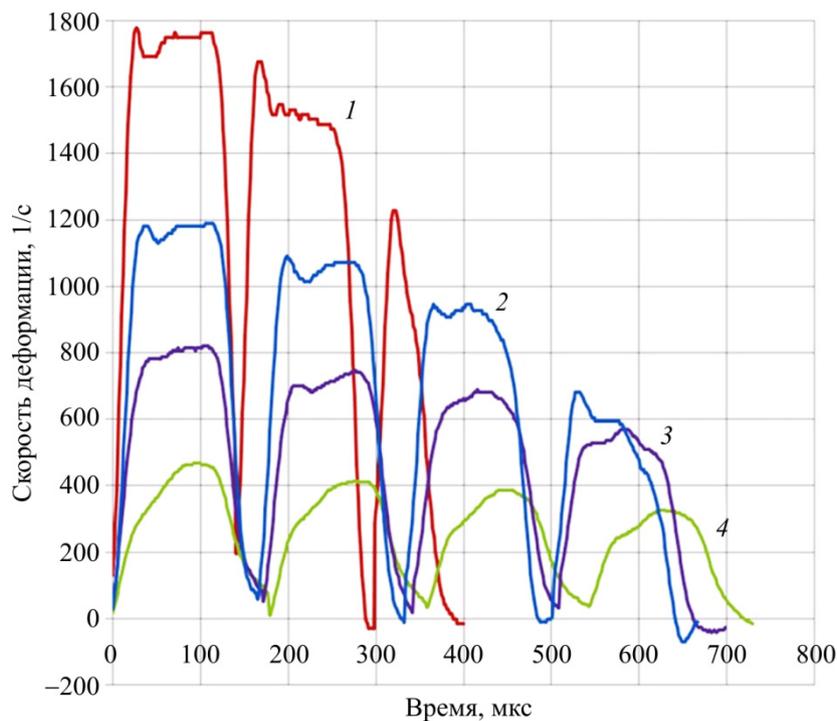


Рис. 7. Кривые изменения скоростей деформации образца
 Fig. 7. Strain rate curves of the sample

На рис. 7 приводятся кривые, характеризующие зависимость изменения скорости деформации образца от времени в экспериментах с разными скоростями ударника. На графике используются следующие обозначения: 1 – скорость вылета ударника 17 м/с; 2 – скорость вылета ударника 12 м/с; 3 – скорость вылета ударника 8 м/с; 4 – скорость вылета ударника 5 м/с. Видно, во-первых, как изменяется скорость деформации в зависимости от начальной скорости ударника, и, во вторых, скорость деформации в каждом последующем цикле нагружения образца становится немного меньше, что связано с особенностями используемой экспериментальной методики. На рис. 8 приведена усредненная кривая деформирования пористого слоя из свинцовых шариков. По результатам

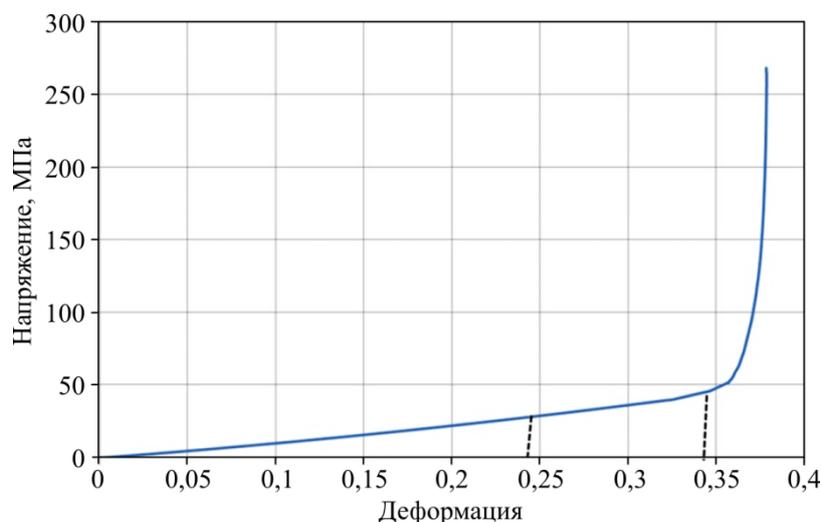


Рис. 8. Диаграмма динамического сжатия
 Fig. 8. Dynamic Compression Diagram

экспериментов видно, что деформирование образца, как и при статических испытаниях, носит выраженный нелинейный и необратимый характер. Штриховыми линиями схематично показаны линии разгрузки, которые, как и в случае квазистатических экспериментов, близки к прямым линиям. Эти данные могут быть использованы в методиках численного моделирования.

Заключение

По результатам статических и динамических испытаний образцов пористых насыпных слоев из свинцовых шариков на сжатие в диапазоне нагрузок до 300 МПа выявлено существенное отличие динамических диаграмм деформирования от статических. Кривые при всех режимах нагружения носят нелинейный и необратимый характер, при высоких нагрузках происходит не только переукладка частиц, но и сильное пластическое течение материала, а при динамическом нагружении помимо пластического течения происходит массовая фрагментация частиц гранулированного слоя. Полученные результаты могут быть использованы для предсказательного математического моделирования элементов конструкций, содержащих насыпные слои.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФ, грант № 16-19-10237 в части результатов динамических испытаний; в части развития методик динамических испытания пористых сред – госзадания Минобрнауки РФ 9.6109.2017/6.7, а в части результатов статических испытаний – госзадания Минобрнауки РФ 9.7057.2017/БЧ.

Acknowledgments

The work has been carried out with a partial financial support from the Russian Science Foundation Grant Nr. 16-19-10237 related to dynamic testing; as for development of methods for dynamic testing of porous media, it has been carried out with the financial support from the State Assignment of the Ministry of Science and Education of the Russian Federation Nr. 9.6109.2017/6.7. The results of static testing have been obtained with the financial support from the State Assignment of the Ministry of Science and Education of the Russian Federation Nr. 9.7057.2017/БЧ.

Библиографический список

1. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Фугасные эффекты взрывов. – СПб.: Полигон, 2002. – 272 с.
2. Гельфанд Б.Е., Губанов А.В., Тимофеев Е.И. Взаимодействие воздушных ударных волн с пористым экраном // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1983. – № 4. – С. 79–84.
3. Передача ударно-волновой нагрузки насыпными средами / Б.Е. Гельфанд, С.П. Медведев, А.Н. Поленов, С.М. Фролов // Прикладная механика и техническая физика. – 1988. – № 2. – С. 115–121.
4. Dynamics of stress wave propagation in a chain of photoelastic discs impacted by a planar shock wave / B. Glam, O. Igra, A. Britan, G. Ben-Dor // Part I. Experimental Investigation, Shock Waves. – August 2007. – Vol. 17. – Iss. 1. – P. 1–14.
5. Mechanism of compressive stress formation during weak shock waves impact with granular materials / G. Ben-Dor, A. Britan, T. Elperin, O. Igra, J.P. Jiang // Experiments in Fluids. – 1997. – Vol. 22. – P. 507–518.

6. Shock waves attenuation by granular filters / A. Britan, G. Ben-Dor, O. Igra, H. Shapiro // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2001. – Vol. 27 (4). – P. 617–634.
7. Experimental investigation of the interaction between weak shock waves and granular layers / G. Ben-Dor, A. Britan, T. Elperin, O. Igra, J.P. Jiang // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1997. – Vol. 22 (5). – P. 432–443.
8. Gas filtration during the impact of weak shock waves on granular layers / A. Britan, G. Ben-Dor, T. Elperin, O. Igra, J.P. Jiang // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1997. – Vol. 23 (3). – P. 473–491.
9. Britan A., Ben-Dor G. Shock tube study of the dynamical behavior of granular materials // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2006. – Vol. 32 (5). – P. 623–642.
10. Development of a general approach for predicting the pressure fields of unsteady gas flows through granular media / A. Britan, G. Ben-Dor, O. Igra, H. Shapiro // *Journal of Applied Physics*. – 2006. – Vol. 99.
11. Levy A., Ben-Dor G., Sorek S. Numerical investigation of the propagation of shock waves in rigid porous materials: development of the computer code and comparison with experimental result // *J. Fluid Mech*. – 1996. – Vol. 324. – P. 163–179.
12. Head-on collision of a planar shock wave with a granular layer / A. Britan, T. Elperin, O. Igra, J.P. Jiang // *Proceedings of the ISCCM Conference, Part. 2*. Eds. W.A. Seattle, S.C. Schmidt, W.C. Tao. – USA, 2017. – P. 971–974.
13. Альтшулер Л.В., Кругликов Б.С. Затухание сильных ударных волн в двухфазных и гетерогенных средах // *ПМТФ*. – 1984. – № 5. – С. 24–29.
14. О механизме усиления давления при увеличении пористости сред, ударно сжимаемых в конических и цилиндрических мишенях / В.В. Милявский, В.Е. Фортов, А.А. Фролова, К.В. Хищенко, А.А. Чарахчян, Л.В. Шуршалов // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. – 2010. – Т. 50, № 12. – С. 2195–2207.
15. The Effect of Voids and Inclusions on Wave Propagation in Granular Materials / M.H. Sadd, A. Shukla, H. Mei, C.Y. Zhu // *Micromechanics and Inhomogeneity*. – 1989. – P. 367–383.
16. Shukla A., Damania C. Experimental investigation of wave velocity and dynamic contact stresses in an assembly of disks // *Experimental Mechanics*. – September 1987. – Vol. 27. – Iss. 3. – P. 268–281.
17. Губайдуллин А.А., Дудко Д.Н., Урманчиев С.Ф. Моделирование взаимодействия воздушной ударной волны с пористым экраном // *Физика горения и взрыва*. – 2000. – Т. 36, № 4. – С. 87–96.
18. Численное исследование передачи ударно-волновой нагрузки экранируемой плоской стенке через слой порошкообразной среды и разделяющий их воздушный зазор / О.Ю. Болдырева, А.А. Губайдуллин, Д.Н. Дудко, А.Г. Кутушев // *Физика горения и взрыва*. – 2007. – Т. 43, № 1. – С. 132–142.
19. Ruan H.H., Gao Z.Y., Yu T.X. Crushing of thin-walled spheres and sphere arrays // *Int. J. Mech. Sci.* – 2006. – No. 48. – P. 117–133.
20. Конечно-элементное решение нелинейных задач деформирования mhs-заполнителя при ударном нагружении / А.В. Демарева, А.И. Кибец, Ю.И. Кибец, И.А. Фролова, Д.В. Шошин, Ю.А. Шушкина // *Проблемы прочности и пластичности*. – 2016. – Т. 78, № 1. – С. 60–69.
21. Экспериментальное исследование деформационных характеристик пакетов плетеных металлических сеток при динамическом и квазистатическом нагружении / А.М. Брагов, Д.В. Жегалов, А.Ю. Константинов, А.В. Кочетков, И.А. Модин, А.О. Савихин // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2016. – № 3. – С. 252–262. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.17
22. Исследование деформационных свойств пакетов плетеных металлических сеток при квазистатическом сжатии и растяжении / А.Н. Горохов, Д.А. Казаков, А.В. Кочетков, И.А. Модин, В.И. Романов // *Проблемы прочности и пластичности*. – 2014. – Т. 73, № 3. – С. 251–256.

23. Экспериментальное исследование динамических и квазистатических деформационных свойств пакетов плетеных сеток / А.М. Брагов, А.Ю. Константинов, А.В. Кочетков, И.А. Модин // Проблемы прочности и пластичности. – 2016. – Т. 78, № 3 – С. 245–251.
24. Кочетков А.В., Леонтьев Н.В., Модин И.А. Экспериментально-численное исследование деформирования металлических плетеных сеток при квазистатическом нагружении // Проблемы прочности и пластичности. – 2017. – Т. 79, № 1. – С. 104–113.
25. Глазова Е. Г., Кочетков А. В. Численное моделирование взаимодействия деформируемых газопроницаемых пакетов сеток с ударными волнами // ПМТФ. – 2012. – № 3. – С. 11–19.
26. Взрывное нагружение деформируемых газопроницаемых осесимметричных элементов конструкций / Е.Г. Глазова, А.Ю. Константинов, А.В. Кочетков, С.В. Крылов // ПМТФ. – 2016. – № 5. – С. 119–126. DOI: 10.15372/PMTF20160513
27. Ляхов Г.М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. – 288 с.
28. Ляхов Г.М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. – М.: Недра, 1974. – 191 с.
29. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method // Int. J. of Impact Engineering. – 1995. – No. 16(2). – P. 321–330.
30. Bragov A.M., Lomunov A.K., Medvedev A.A. A modified Kolsky method for the investigation of the strain-rate history dependence of mechanical properties of materials // J. Physique. – 1991. – Vol. 4. – No. 1. – P. 471–475.
31. Investigations on specimen design and mounting for Split Hopkinson Tension Bar (SHTB) experiments / N. Ledford, H. Paul, G. Ganzenmüller, M. May, M. Höfemann, M. Otto, N. Petrinic // DYMAT. – 2015. – 09.
32. Design and Computational Validation of a Split Hopkinson Pressure Bar for Dynamic Characterization of Materials Under High Strain Rate Tension Loading / A. Sasikumar, N. John, S. Pushpagiri, L. Koithara // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2015. – June. – Vol. 4. – Iss. 6.
33. Nicholas O. Tensile testing of materials at high rates of strain // Exp. Mech. – 1981. – Vol. 21. – No. 5. – P. 177–195.

References

1. Gelfand B.E., Silnikov M.V. Fugasnye efekty vzryvov [The explosive effects of explosions]. *Saint Petersburg, Izdatel'stvo «Poligon»*, 2002, 272 p.
2. Gelfand B.E., Gubanov A.V., Timofeev E.I. Vzaimodeistvie vozdushnykh udarnykh voln s poristym ekranom [Interaction of air shock waves with a porous shield]. *Izvestiia Akademii Nauk SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 1983, no. 4, pp. 79-84.
3. Gelfand B.E., Medvedev S.P., Polenov A.N., Frolov S.M. Peredacha udarno-volnovoï nagruzki nasypnymi sredami [Transmission of shock-wave loading by bulk media]. *Applied Mechanics and Technical Physics*, 1988, no. 2, pp. 115-121.
4. Glam B., Igra O., Britan A., Ben-Dor G. Dynamics of stress wave propagation in a chain of photoelastic discs impacted by a planar shock wave. *Part I, experimental investigation, Shock Waves*, August 2007, vol. 17, Iss.1, pp. 1-14.
5. Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J. P. Mechanism of compressive stress formation during weak shock waves impact with granular materials. *Experiments in Fluids*, 1997, vol.22, pp. 507-518.
6. Britan A., Ben-Dor G., Igra O., Shapiro H. Shock waves attenuation by granular filters. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001, vol. 27 (4), pp. 617-634.
7. Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J. P. Experimental investigation of the interaction between weak shock waves and granular layers. *International Journal of Multiphase Flow*, 1997, vol. 22 (5), pp. 432-443.
8. Britan A., Ben-Dor G., Elperin T., Igra O., Jiang J. P. Gas filtration during the impact of weak shock waves on granular layers. *International Journal of Multiphase Flow*, 1997, vol. 23 (3), pp. 473-491.

9. Britan A., Ben-Dor G. Shock tube study of the dynamical behavior of granular materials. *International Journal of Multiphase Flow*, 2006, vol. 32 (5), pp. 623-642.

10. Britan A., Ben-Dor G., Igra O., Shapiro H. Development of a general approach for predicting the pressure fields of unsteady gas flows through granular media. *Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 99.

11. Levy A., Ben-Dor G., Sorek S. Numerical investigation of the propagation of shock waves in rigid porous materials: development of the computer code and comparison with experimental result. *J. Fluid Mech*, 1996, vol. 324, pp. 163-179.

12. Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J. P. Head-on collision of a planar shock wave with a granular layer. In: Schmidt, S.C., Tao, W.C. (Eds.), *Proceedings of the ISCCM Conference, Part. 2, Seattle, WA, USA*. pp. 971-974.

13. Altshuler L.V., Kruglikov B.S. Zatumkhanie sil'nykh udarnykh voln v dvukhfaznykh i geterogennykh sredakh [Damping of strong shock waves in two-phase and heterogeneous media]. *Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaiia fizika*, 1984, no. 5, pp. 24-29.

14. Milyavsky V.V., Fortov V.E., Frolova A.A., Khishchenko K.V., Charakhchyan A.A., Shurshalov L.V. O mekhanizme usileniia davleniia pri uvelichenii poristosti sred, udarno szhimaemykh v konicheskikh i tsilindricheskikh misheniakh [On the mechanism of pressure enhancement with increasing porosity of media shock-compressed in conical and cylindrical targets]. *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2010, vol. 50, no. 12, pp. 2195-2207.

15. Sadd M. H., Shukla A., Mei H., Zhu C. Y. The Effect of Voids and Inclusions on Wave Propagation in Granular Materials. *Micromechanics and Inhomogeneity*, pp. 367-383

16. Shukla A., Damania C. Experimental investigation of wave velocity and dynamic contact stresses in an assembly of disks. *Experimental Mechanics*, September 1987, vol. 27, Iss. 3, pp. 268-281.

17. Gubaidullin A.A., Dudko D.N., Urmancheev S.F. Modelirovanie vzaimodeistvie vozdushnoi udarnoi volny s poristym ekranom [Modeling the interaction of an air shock wave with a porous screen]. *Journal of Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2000, vol. 36, no. 4, pp. 87-96.

18. Boldyreva O.Yu., Gubaidullin A.A., Dudko D.N., Kutushev A.G. Chislennoe issledovanie peredachi udarno-volnovoi nagruzki ekraniruemoi ploskoi stenke cherez sloi poroshkoobraznoi sredy i razdeliaiushchii ikh vozdushnyi zazor [Numerical study of the transmission of the shock wave load to a shielded plane wall through a layer of a powdery medium and an air gap separating them]. *Physics of Combustion and Explosion*, 2007, vol. 43, no. 1, pp. 132-142.

19. Ruan H.H., Gao Z.Y., Yu T.X. Crushing of thin-walled spheres and sphere arrays. *Int. J. Mech. Sci*, 2006, no. 48, pp. 117-133.

20. Demarova A.V., Kibets A.I., Kibets Yu.I., Frolova I.A., Shoshin D.V., Shushkina Yu.A. Konechno-elementnoye resheniye nelineynykh zadach deformirovaniya mhs-zapolnitelya pri udarnom nagruzhenii [Finite-element solution of non-linear problems of deformation of an mhs-filler under impact loading]. *Problems of strength and plasticity*, 2016, vol. 78, no. 1, pp. 60-69.

21. Bragov A.M., Zhegalov D.V., Konstantinov A.Yu., Kochetkov A.V., Modin I.A., Savikhin A.O. Experimental study of deformation properties of a package of woven metal mesh under dynamic and quasi-static stressing. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2016, no. 3, pp. 252-262. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.17

22. Gorokhov A.N., Kazakov D.A., Kochetkov A.V., Modin I.A., Romanov V.I. Issledovanie deformatsionnykh svoistv paketov pletenykh metallicheskih setok pri kvazistaticheskome szhatii i rastiazhenii [Investigating deformational properties of packages of woven metallic grids loaded in quasistatic compression and tension]. *Problems of strength and plasticity*, 2014, vol. 73, no. 3, pp. 251-256.

23. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Kochetkov A.V., Modin I.A. Eksperimental'noe issledovanie dinamicheskikh i kvazistaticheskikh deformatsionnykh svoistv paketov pletenykh setok [Experimentally investigating dynamic deformational and strength properties of woven grid packages]. *Problems of strength and plasticity*, 2016, vol. 78, no 3, pp. 245-251.

24. Kochetkov A.V., Leontyev N.V., Modin I.A. Eksperimental'no-chislennoe issledovanie deformirovaniia metallicheskih pletenykh setok pri kvazistaticheskome nagruzhenii [The experimental-numerical analysis of deformation of metallic woven grids under quasi-static loading]. *Problems of strength and plasticity*, 2017, vol. 79, no. 1, pp. 104-113.

25. Glazova E.G., Kochetkov A.V. Chislennoe modelirovanie vzaimodeistviia deformiruemykh gazopronitsaemykh paketov setok s udarnymi volnami [Numerical simulation of the interaction of deformable gas-permeable packets of nets with shock waves]. *Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaiia fizika*, 2012, no. 3, pp. 11-19.

26. Glazova E.G., Konstantinov A.Yu., Kochetkov A.V., Krylov S.V. Vzryvnoe nagruzhenie deformiruemykh gazopronitsaemykh osesimmetrichnykh elementov konstruksii [Explosive loading of deformable gas-permeable axisymmetric structural elements]. *Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaiia fizika*, no. 5, 2016, pp. 119-126. DOI: 10.15372 / PMTF20160513.

27. Lyakhov G.M. Volny v gruntakh i poristykh mnogokomponentnykh sredakh [Waves in soils and porous multicomponent media]. *Moscow, Nauka. The main edition of physical and mathematical literature*, 1982, 288 p.

28. Lyakhov G.M. Osnovy dinamiki vzryvnykh voln v gruntakh i gornnykh porodakh [The basis of the dynamics of blast waves in soils and rocks]. *Moscow, Nedra*, 1974, 191 p.

29. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *Int.J. of Impact Engineering*, 1995, no. 16(2), pp. 321-330.

30. Bragov A.M., Lomunov A.K., Medvedev A.A. A modified Kolsky method for the investigation of the strain-rate history dependence of mechanical properties of materials. *J. Physique*, 1991, vol. 4, no. 1, pp. 471-475.

31. Ledford N., Paul H., Ganzenmüller G, May M., Höfemann M., Otto M., Petrinic N. Investigations on specimen design and mounting for Split Hopkinson Tension Bar (SHTB) experiments. *DYMAT*, 09/2015.

32. Sasikumar A., John N., Pushpagiri S., Koithara L. Design and Computational Validation of a Split Hopkinson Pressure Bar for Dynamic Characterization of Materials Under High Strain Rate Tension Loading. *International Journal of Engineering Research & Technology*, June 2015, vol. 4, Iss. 6.

33. Nicholas O. Tensile testing of materials at high rates of strain. *Exp.Mech*, 1981, vol. 21, no. 5, pp. 177-195.