

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2023-85-4-539-550

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНИКОВ С ГРАНУЛИРОВАННЫМИ СЛОЯМИ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ШАРИКОВ*

© 2023 г.

Модин И.А., Баландин Вл.Вл.

*Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

mianet@mail.ru

Поступила в редакцию 21.04.2023

Представлены результаты экспериментальных исследований статических и динамических механических свойств слоев из стальных и свинцовых шариков. В результате проведенных экспериментов были построены динамические диаграммы деформирования и зависимости силы сопротивления внедрению. Динамические диаграммы деформирования были получены с использованием модифицированного метода Кольского для испытаний малосвязных сред в жесткой обойме. Силы сопротивления внедрению определялись с помощью обращенного эксперимента: контейнер, заполненный шариками, разогнался в стволе газовой пушки и ударялся по мерному стержню с головной частью полусферической или конической геометрии. При ударе контейнера по мерному стержню в стержне формируется упругая волна деформации, которая регистрируется с помощью тензорезисторов, наклеенных на боковой поверхности стержня. Наряду с динамическими проводились и статические испытания с использованием сервогидравлической испытательной машины Zwick/Roell Amsler HA 100. Гранулированный слой засыпался в жесткую обойму и сдавливался сжимающим поршнем. Полученные результаты усреднялись по количеству проведенных экспериментов для каждого вида испытания. Сопротивление гранулированной среды из стальных шариков оказалось значительно выше, чем среды из свинцовых шариков. Существенное влияние на поведение сил сопротивления оказывает форма ударника. Для кривых деформирования, полученных с применением модифицированного метода Кольского и с использованием испытательной машины Zwick/Roell Amsler HA 100, при всех режимах нагружения свинцовых шариков характерны нелинейность и необратимость; при высоких нагрузках происходит не только переукладка частиц, но и сильное пластическое течение материала, а для стальных шариков в рассмотренном диапазоне нагрузок сильного пластического течения материала не наблюдается. Результаты экспериментов могут быть использованы для численного моделирования проникания ударников различной формы в гранулированные слои из металлических шариков.

Ключевые слова: гранулированный слой, упругопластическое сжатие, обращенный эксперимент, диаграмма деформирования, методика Кольского, статическое нагружение, динамическое нагружение.

* Выполнено при финансовой поддержке РФФ (грант №22-79-10076).

Введение

Снижение импульсных и вибрационных нагрузок в ряде конструкций достигается за счет применения пористых элементов в виде гранулированных слоев, проводочных решеток, экранов, сеток, перфорированных перегородок и т.д. [1–16]. По своему функциональному назначению пористые защитные элементы разделяются на две группы. Первая группа – проницаемые элементы. Их назначение – снижение газодинамических нагрузок от проходящих волновых нагрузок. Вторая группа – пористые элементы, ослабляющие действие взрывных и ударных нагрузок за счет более развитого деформирования. Демпфирующие свойства пористых проницаемых преград рассмотрены в трудах С.М. Фролова, М.В. Сильникова, Б.С. Кругликова, Б.Е. Гельфанда, А.Н. Поленова [2–4, 9]. В них даются оценки параметров проходящих ударных волн. При малых интенсивностях падающих волн пористые преграды можно считать недеформируемыми. Далее при повышении уровня нагрузки необходимо учитывать их деформационные свойства. Основными методами исследования деформирования пористых сред являются экспериментальные методы, некоторые аналитические оценки, основанные на экспериментах, а также численное моделирование. При моделировании деформируемых пористых преград под действием высоких нагрузок инженеры сталкиваются с отсутствием в научной литературе систематических деформационных и прочностных данных по многим пористым материалам. Свойства материалов получают, как правило, экспериментальным путем. Цикл исследований динамических деформационных и прочностных свойств природных и искусственных пористых материалов (грунтов, горных пород, бетонов, керамики) при различных скоростях деформации проведены А.М. Браговым, А.К. Ломуновым, В.В. Баландиным, А.Ю. Константиновым и др. [8, 12]. Результаты экспериментальных исследований и построенные на их основе модели деформирования пористых сред при статических и динамических нагрузках представили W. Herrmann, D.C. Drucker, J.K. MacKenzie, Б.Е. Гельфанд [1–4]. Пористые среды проявляют многообразие свойств (вязкие, упругопластические, упруго-вязкопластические свойства, высокую зависимость от скорости деформирования, анизотропные свойства и т.д.). Учет деформирования гранулированных проницаемых слоев из сплошных шариков при воздействии ударных волн небольшой интенсивности провели А. Britan, А.А. Губайдуллин, G. Ben-Dor, Д.Н. Дудко, О. Igra и др. [5, 6, 9]. К примеру, для защиты силовых корпусов взрывных камер от осколочного повреждения могут применяться защитные элементы в виде гранулированных слоев, окружающие зону возможного энерговыделения или взрыва. Гранулированные слои при сжатии легко разрушаются на отдельные гранулы без образования крупных осколков и, кроме того, вследствие проницаемости они могут снижать амплитуды газодинамической нагрузки на стенки камер. Гранулированный слой с точки зрения деформационных свойств можно считать высокопористой изотропной средой [17–20]. В указанных публикациях приведены некоторые результаты экспериментальных и численных исследований деформационных свойств пористых гранулированных слоев. Показано, что при интенсивных нагрузках для диаграмм деформирования характерны нелинейность и необратимость кривых, они зависят от скорости деформирования. Исследования пористых сред [21–28] показали существенные отличия кривых деформирования в статическом и динамическом режимах нагружения. Целью настоящей статьи является экспериментальные исследования пористых материалов в виде насыпных слоев из свинцовых и стальных шариков и получение новых резуль-

татов для дальнейшего численного моделирования их влияния на защищаемые ими поверхности.

1. Исследование деформационных свойств гранулированных слоев в статическом и динамическом режимах нагружения

Сжатие насыпного слоя из металлических шариков при статическом режиме нагружения проведено на сервогидравлической машине Zwick/RoellAmsler HA 100. Используемая оснастка состояла из двух элементов – толстостенного цилиндра и сжимающего поршня. Размеры цилиндра: высота 40 мм, внутренний диаметр 40 мм; поршень высотой 70 мм, диаметром 39,8 мм. Гранулированный слой из свинцовых и стальных шариков засыпался в цилиндр и сжимался поршнем. Использовались шарики, диаметр которых составлял 2 мм, толщина слоя 35 мм. Экспериментально были получены кривые напряжение–деформация для каждого рассматриваемого слоя. Активное пластическое течение для свинцовых шариков развивалось после достижения напряжением величины 1,45 МПа, а для стальных шариков наблюдалось слабое пластическое течение даже до напряжений 150 МПа.

Динамические испытания проводились с использованием газовой пушки калибра 20 мм по методике разрезного стержня Гопкинсона [29–32]. Как и при статических испытаниях, были выбраны свинцовые и стальные шарики диаметром 2 мм. Гранулированный слой в обойме размещался между двумя мерными стержнями и нагружался трапециевидным импульсом сжатия. В процессе эксперимента с помощью тензодатчиков регистрировались деформации в сечениях нагружающего и опорного мерных стержней. Зарегистрированная информация позволила с помощью формул Кольского [29] рассчитать зависимость изменения длины образца от времени, а также действующую на него при этом силу. В обойму с внутренним диаметром 20,2 мм засыпался гранулированный слой, затем с обеих сторон слой поджимался мерными стержнями диаметром 20 мм. Толщина слоя из металлических шариков составляла 10 мм. Скорость вылета ударника варьировалась от 5 до 17 м/с.

На рис. 1 представлены синхронизированные импульсы в мерных стержнях и обойме, полученные из эксперимента со стальными шариками (I – падающий импульс, R – отраженный импульс, T – прошедший импульс, $T - R$ – разность прошедшего и отраженного импульсов, O – импульс окружного напряжения).

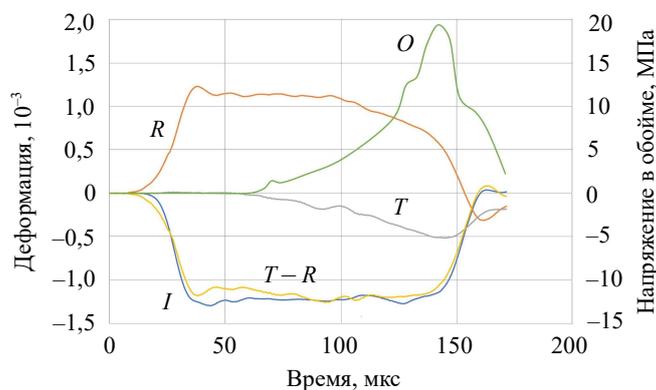


Рис. 1. Синхронизированные импульсы в мерных стержнях и обойме для стальных шариков

Видно, что условие динамического равновесия в образце выполняется достаточно хорошо, разность деформации прошедшего и отраженного импульсов практически равна деформации в падающем импульсе. В обойме также возникают деформации и напряжения синхронно с началом прошедшего импульса. В начале нагружения образца прошедшего импульса нет. Он появляется только через 40 мкс после начала нагружения и синхронно с ним появляется импульс в обойме. До этого момента в образце происходит выборка зазоров и переукладка шариков (без заметной деформации) с уменьшением порового пространства между ними. Затем происходит уплотнение дроби со значительной деформацией, что вызывает ее поперечную раздачу и появление деформаций и напряжений в обойме.

На рис. 2 приведены результаты аналогичных испытаний, но в качестве испытуемого образца использовались свинцовые шарики (обозначения на рисунке такие же, как на рис. 1). На рис. 2 показаны синхронизированные импульсы в мерных стержнях и обойме. Характер протекания процессов в экспериментах со свинцовыми и стальными шариками одинаков. Однако следует отметить, что напряжения в обойме, вызванные ее раздачей, значительно меньше, чем в случае стальной дроби, хотя напряжения в падающем импульсе в эксперименте со свинцовыми шариками больше, чем в эксперименте со стальными шариками. Это объясняется малой величиной предела текучести свинца.

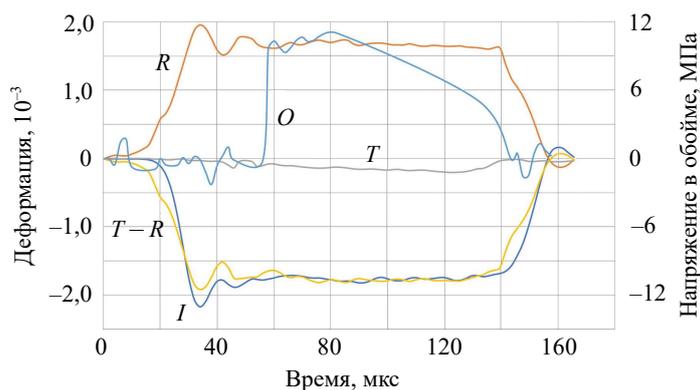


Рис. 2. Синхронизированные импульсы в мерных стержнях и обойме для свинцовых шариков

Показаны экспериментальные диаграммы деформирования с разгрузками для стальных (рис. 3) и свинцовых (рис. 4) шариков в статическом и динамическом режимах нагружения при различных скоростях деформирования.

При статическом нагружении скорость деформации составляла 10^{-3} с^{-1} , а при динамическом режиме скорость деформации варьировалась от $1,2 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. При статическом режиме нагружения проведено три идентичных испытания, в которых разброс экспериментальных данных составил не более 4%. Значения модуля разгрузки в предположении его постоянства находятся в интервале от 2,5 до 6 ГПа для свинцовых шариков и от 9 до 11 ГПа для стальных. Кривые при всех режимах нагружения свинцовых шариков имеют нелинейный и необратимый характер, при высоких нагрузках происходит не только переукладка частиц, но и сильное пластическое течение материала шариков, а для стальных шариков в рассмотренном диапазоне нагрузок сильного пластического течения материала не наблюдается. Полученные диаграммы могут быть использованы для численного моделирования проникания ударников различной формы в гранулированные слои из металлических шариков.

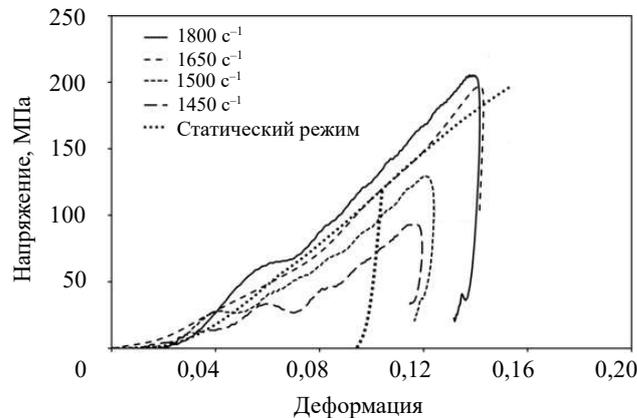


Рис. 3. Экспериментальные диаграммы деформирования слоя из стальных шариков в статическом и динамическом режимах нагружения с разгрузками

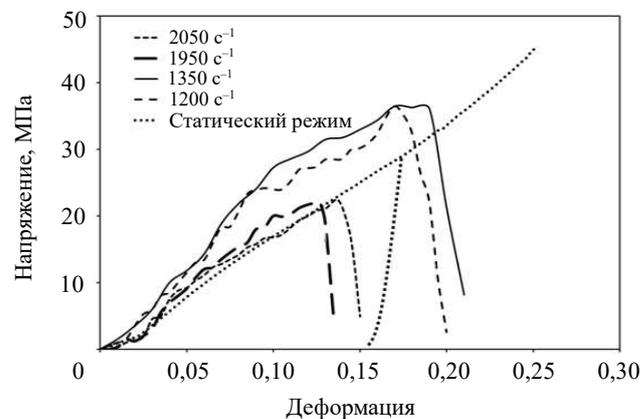


Рис. 4. Экспериментальные диаграммы деформирования слоя из свинцовых шариков в статическом и динамическом режимах нагружения с разгрузками

2. Силы сопротивления слоев в обращенном эксперименте

С помощью методики обращенного эксперимента было проведено исследование ударного взаимодействия тел с гранулированными слоями [33]. Эта методика предназначена для определения силы сопротивления внедрению ударника путем определения интегральных нагрузок на начальном участке проникания. Контейнер требуемых размеров заполняется гранулированной средой из свинцовых или стальных шариков, затем он разгоняется до требуемой скорости и наносит удар по неподвижному оголовку полусферической или конусной формы с полным углом раствора 60°, закрепленному на мерном стержне. Материал стержня и оголовка не должен испытывать пластических деформаций при выбранной скорости удара. При этом в стержне возникает упругий импульс сжатия с деформацией $\varepsilon(t)$. Силу сопротивления прониканию F , действующую на ударник при взаимодействии с гранулированным слоем, можно определить по результатам регистрации импульса сжатия и известному соотношению $F(t) = E\varepsilon(t)S$, где E – модуль упругости стержня, S – площадь его поперечного сечения. В этом методе задача измерения сил сопротивления сводится к регистрации продольного импульса упругих деформаций в мерном стержне.

С использованием программы в среде графического программирования Labview проводилась обработка данных, полученных в ходе проведения эксперимента. На рис. 5 построены кривые сил сопротивления полусферического и конусного оголовков, регистрируемых на мерном стержне, в зависимости от времени для насыпного слоя из стальных шариков, а на рис. 6 – аналогичные кривые для насыпного слоя из свинцовых шариков. Для каждого материала и оголовка проведено по два испытания с близкими скоростями полета метаемой гранулированной среды. Полусферический оголовок имеет диаметр закругления 20 мм, а конусный оголовок – полный угол раствора 60°. Скорость полета контейнера с гранулированным слоем изменялась от 117 до 205 м/с, масса слоя была выбрана равной 400 грамм, что соответствовало толщине слоя 26 мм для свинцовых шариков и 38 мм для стальных.

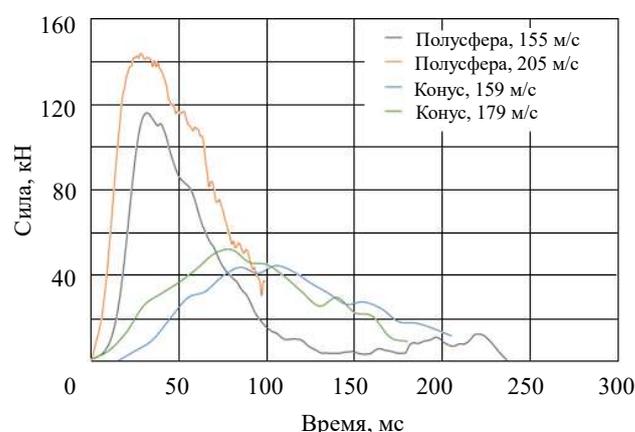


Рис. 5. Зависимости сил сопротивления от времени для слоя из стальных шариков при обращенном эксперименте

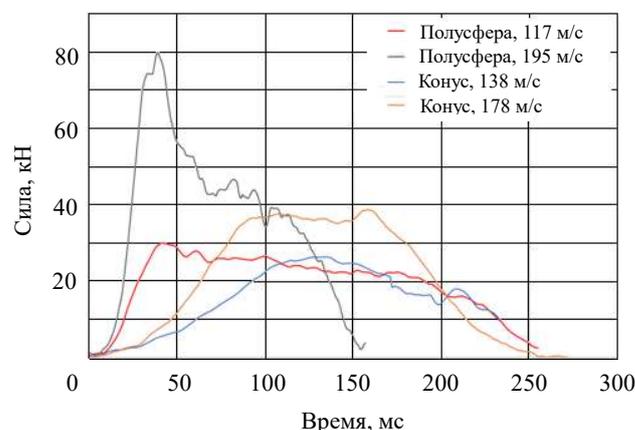


Рис. 6. Зависимости сил сопротивления от времени для слоя из свинцовых шариков при обращенном эксперименте

Сопротивление гранулированной среды из стальных шариков существенно выше, чем среды из свинцовых шариков. Большое влияние на поведение сил сопротивления оказывает форма ударника. Максимальные значения сил сопротивления для конусных оголовков набираются значительно позже, чем для полусферических, а их амплитуды намного ниже. Осмотр оголовков после проведенных экспериментов

показал, что если свинцовые шарики практически не оставляют следов на оголовках, то стальные шарики заметно изменяют поверхности оголовков (рис. 7).



Рис. 7. Вид оголовков после соударения (слева с гранулированным слоем из свинцовых шариков, справа – из стальных)

Заключение

По результатам статических и динамических испытаний образцов пористых насыпных слоев из свинцовых и стальных шариков на сжатие в диапазоне нагрузок до 200 МПа выявлено отличие динамических диаграмм деформирования от статических. Кривые при всех режимах нагружения свинцовых шариков имеют нелинейный характер, при высоких нагрузках происходит не только переукладка частиц, но и сильное пластическое течение материала. Получены экспериментальные зависимости сил сопротивления полусферического и конического ударников от времени на начальной стадии их внедрения в гранулированные среды. Сопротивление гранулированной среды из стальных шариков значительно выше, чем среды из свинцовых шариков. Существенное влияние на поведение сил сопротивления оказывает форма ударника. Полученные результаты могут быть использованы для предсказательного математического моделирования элементов конструкций, содержащих насыпные слои.

Авторы благодарят гл.н.с. А.М. Брагова и в.н.с. В.В. Баландина за помощь в организации экспериментальных работ.

Список литературы

1. Hermann W. Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials. *Journal of Applied Physics*. 1969. Vol. 40. Iss. 6. P. 2490–2499. <https://doi.org/10.1063/1.1658021>.
2. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. *Фугасные эффекты взрывов*. СПб.: Полигон, 2002. 272 с.
3. Гельфанд Б.Е., Губанов А.В., Тимофеев Е.И. Взаимодействие воздушных ударных волн с пористым экраном. *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. 1983. №4. С. 79–84.
4. Гельфанд Б.Е., Медведев С.П., Поленов А.Н., Фролов С.М. Передача ударно-волновой нагрузки насыпными средами. *Прикладная механика и техническая физика*. 1988. №2. С. 115–121.
5. Britan A., Ben-Dor G., Igra O., Shapiro H. Shock waves attenuation by granular filters. *International Journal of Multiphase Flow*. 2001. Vol. 27. Iss. 4. P. 617–634. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(00\)00048-3](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(00)00048-3).
6. Britan A., Ben-Dor G. Shock tube study of the dynamical behavior of granular materials. *International Journal of Multiphase Flow*. 2006. Vol. 32. Iss. 5. P. 623–642. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2006.01.007>.

7. Кочетков А.В., Модин И.А., Леонтьев Н.В., Турыгина И.А., Повереннов Е.Ю. Численное моделирование нелинейного динамического и статического сжатия пакетов металлических плетеных сеток. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2019. №4. С. 106–113. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.4.10>.
8. Balandin V.V., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Modin I.A. Numerical and experimental study of the penetration of a package of woven metal grid by a steel ball. *Journal of Physics Conference Series*. 2019. Vol. 1214. P. 012004-1–012004-6. DOI: 10.1088/1742-6596/1214/1/012004.
9. Кругликов Б.С., Кутушев А.Г. Ослабление ударных волн экранирующими решетками. *Физика горения и взрыва*. 1988. №1. С. 115–118.
10. Абакумов А.И. и др. Численная модель деформирования противоосколочной сетки при взрывном нагружении. *Тр. ВНИИЭФ. Математическое моделирование физических процессов*. 2006. №10. С. 16–30.
11. Кочетков А.В., Леонтьев Н.В., Модин И.А., Савихин А.О. Исследование деформационных и прочностных свойств металлических плетеных сеток. *Вестник ТГУ. Математика и механика*. 2018. №52. С. 53–62. DOI: 10.17223/19988621/52/6.
12. Брагов А.М., Жегалов Д.В., Константинов А.Ю., Кочетков А.В., Модин И.А., Савихин А.О. Экспериментальное исследование деформационных свойств пакетов плетеных металлических сеток при динамическом и квазистатическом нагружении. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2016. №3. С. 252–262. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.17.
13. Telegin S.V., Kirillova N.I., Modin I.A., Suleimanov E.V. Effect of particle size distribution on functional properties of $Ce_{0.9}Y_{0.1}O_{2-d}$ ceramics. *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. Iss. 12. P. 17316–17321. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.043>.
14. Splichal J., Pistek A., Hlinka J. Dynamic tests of composite panels of an aircraft wing. *Progress in Aerospace Sciences*. 2015. Vol. 78. P. 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2015.05.005>.
15. Модин И.А., Кочетков А.В., Повереннов Е.Ю. Численное моделирование деформирования гранулированного слоя при сжатии. *Проблемы прочности и пластичности*. 2022. Т. 84. №2. С. 236–246. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2022-84-2-236-246>.
16. Xiao L., Song W. Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: Experiments. *International Journal of Impact Engineering*. 2018. Vol. 111. P. 255–272. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.09.018>.
17. Kochetkov A.V., Modin I.A. Numerical simulation of the interaction of a shock wave with a permeable granulated layer. In: *Behavior of Materials under Impact, Explosion, High Pressures and Dynamic Strain Rates*. Cham, Switzerland: Springer, 2023. P. 129–143. DOI: 10.1007/978-3-031-17073-7_9.
18. Глазова Е.Г., Турыгина И.А., Модин И.А. Моделирование взаимодействия ударной волны с деформируемым проницаемым гранулированным слоем. *Проблемы прочности и пластичности*. 2020. Т. 82. №3. С. 353–363. DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-3-353-363.
19. Kochetkov A.V., Leontyev N.V., Modin I.A. Numerical simulation of quasistatic and dynamic compression of a granular layer. *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2116. Iss. 1. Article No 270003. <https://doi.org/10.1063/1.5114277>.
20. Модин И.А., Кочетков А.В., Глазова Е.Г. Численное исследование взаимодействия ударной волны с проницаемым деформируемым гранулированным слоем. *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки*. 2022. Т. 26. №1. С. 79–92. <https://doi.org/10.14498/vsgtu1879>.
21. Wang Dan., Liu Enlong, Zhang De et al. An elasto-plastic constitutive model for frozen soil subjected to cyclic loading. *Cold Regions Science and Technology*. 2021. Vol. 189. Article No 103341. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103341>.
22. Wang Caizheng, Wang Hongxu, Shankar Krishna, Hazell P.J. Dynamic failure behavior of steel wire mesh subjected to medium velocity impact: Experiments and simulations. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2022. Vol. 216. Article No 106991. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106991>.
23. Guan J., Zhang X., Chen X. et al. Influence of seasonal freezing-thawing soils on seismic performance of high-rise cap pile foundation in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 199. Article No 103581. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103581>.

24. Chunyu Z., Zhu Z., Li B., Li T. Numerical simulation research on impact mechanical properties of frozen soil based on discrete element method. *International Journal of Damage Mechanics*. 2022. Vol. 32. Iss. 3. <https://doi.org/10.1177/10567895221133563>.
25. Ayoub Laoucine, Mourad Bachene, Said Rechak et al. Perforation analysis by punching of metal sheets. *Annales de Chimie: Science des Matériaux*. 2022. Vol. 46. Iss. 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.18280/acsm.460101>.
26. Qiao Yu, Cao Fu-Hua, Chen Yan et al. Impact tension behavior of heavy-drawn nano-crystalline CoCrNi medium entropy alloy wire. *Materials Science and Engineering: A*. 2022. Vol. 856. Article No 144041. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144041>.
27. Chen Yanbin, Liu Enlong, He Peng. A binary-medium-based constitutive model for geological materials based on the statistical meso-breakage concept and mean-field homogenization. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2022. P. 1–24. <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2136763>.
28. Ma Dongdong, Xiang Huasong, Zhou Zhiwei, Tan Yizhong, Wang Xinpeng. Study on energy dissipation characteristic of ice-rich frozen soil in SHPB compression tests. *Geofluids*. 2022. Vol. 2022. P. 1162357-1 – 1162357-9. <https://doi.org/10.1155/2022/1162357>.
29. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *International Journal of Impact Engineering*. 1995. Vol. 16. Iss. 2. P. 321–330. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)93939-G](https://doi.org/10.1016/0734-743X(95)93939-G).
30. 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 ПНИПУ*. 2017. №4. С. 16–27. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.02.
31. Zhu H., Pierron F. Exploration of Saint-Venant's principle in inertial high strain rate testing of materials. *Experimental Mechanics*. 2016. Vol. 56. P. 3–23. <https://doi.org/10.1007/s11340-015-0078-1>.
32. Брагов А.М., Игумнов Л.А., Кайдалов В.Б. и др. Экспериментальное исследование и математическое моделирование поведения сталей марок Ст.3, 20Х13 и 08Х18Н10Т в широких диапазонах скоростей деформаций и температур. *Прикладная механика и техническая физика*. 2015. №6. С. 51–58. DOI: 10.15372/PMTF20150607.
33. Баландин Вл.В., Баландин Вл.В., Брагов А.М., Котов В.Л. Экспериментальное изучение динамики проникания твердого тела в грунтовую среду. *Журнал технической физики*. 2016. Т. 86. Вып. 6. С. 62–70.

References

- Hermann W. Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials. *Journal of Applied Physics*. 1969. Vol. 40. Iss. 6. P. 2490–2499. <https://doi.org/10.1063/1.1658021>.
- Gelfand B.E., Silnikov M.V. *Fugasnye efekty vzryvov [The Explosive Effects of Explosions]*. Saint Petersburg. Poligon Publ. 2002. 272 p. (In Russian).
- Gelfand B.E., Gubanov A.V., Timofeev E.I. Vzaimodeystvie vozdushnykh udarnykh voln s poristym ekranom [Interaction of air shock waves with a porous screen]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza [A Journal of Russian Academy of Sciences. Fluid Dynamics]*. 1983. Iss. 4. P. 79–84 (In Russian).
- Gelfand B.E., Medvedev S.P., Polenov A.N., Frolov S.M. Peredacha udarno-volnovoy nagruzki nasypnymi sredami [Transmission of shock wave load in bulk media]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]*. 1988. Iss. 2. P. 115–121 (In Russian).
- Britan A., Ben-Dor G., Igra O., Shapiro H. Shock waves attenuation by granular filters. *Int. J. Multiph. Flow*. 2001. Vol. 27. Iss. 4. P. 617–634. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(00\)00048-3](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(00)00048-3).
- Britan A., Ben-Dor G. Shock tube study of the dynamical behavior of granular materials. *Int. J. Multiph. Flow*. 2006. Vol. 32. Iss. 5. P. 623–642. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2006.01.007>.
- Kochetkov A.V., Modin I.A., Leontyev N.V., Turygina I.A., Poverennov E.Yu. Chislennoe modelirovanie nelineynogo dinamicheskogo i staticheskogo szhatiya paketov metallicheskikh

pletennykh setok [Numerical modeling of nonlinear dynamic and static compression of the metal mesh]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [PNRPU Mechanics Bulletin]. 2019. No 4. P. 106–113 (In Russian).

8. Balandin V.V., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Modin I.A. Numerical and experimental study of the penetration of a package of woven metal grid by a steel ball. *Journal of Physics Conference Series*. 2019. Vol. 1214. P. 012004-1–012004-6. DOI: 10.1088/1742-6596/1214/1/012004.

9. Kruglikov B.S., Kutushev A.G. Oslablenie udarnykh voln ekraniruyushchimi reshetkami [The attenuation of shock waves by screening gratings]. *Fizika goreniya i vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves]. 1988. No 1. P. 115–118 (In Russian).

10. Abakumov A.I. et al. Chislennaya model deformirovaniya protivoo skolochnoy setki pri vzryvnom nagruzhении [Numerical model of deformation of an antipollamental mesh under explosive loading]. *Trudy VNIIEF. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov* [Proc. Russian Federal Nuclear Center. Mathematical Modeling of Physical Processes]. 2006. No 10. P. 16–30 (In Russian).

11. Kochetkov A.V., Leont'yev N.V., Modin I.A., Savikhin A.O. Issledovanie deformatsionnykh i prochnostnykh svoystv metallicheskh pletennykh setok [Study of the stress-strain and strength properties of the metal woven grids]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 2018. No 52. P. 53–62 (In Russian).

12. Bragov A.M., Zhegalov D.V., Konstantinov A.Yu., Kochetkov A.V., Modin I.A., Savikhin A.O. Eksperimentalnoe issledovanie deformatsionnykh svoystv paketov pletennykh metallicheskh setok pri dinamicheskom i kvazistaticheskom nagruzhении [Experimental study of deformation properties of a package of woven metal mesh under dynamic and quasi-static stressing]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [PNRPU Mechanics Bulletin]. 2016. No 3. P. 252–262 (In Russian).

13. Telegin S.V., Kirillova N.I., Modin I.A., Suleimanov E.V. Effect of particle size distribution on functional properties of $Ce_{0.9}Y_{0.1}O_{2-d}$ ceramics. *Ceram. Int.* 2021. Vol. 47. Iss. 12. P. 17316–17321. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.043>.

14. Splichal J., Pistek A., Hlinka J. Dynamic tests of composite panels of an aircraft wing. *Prog. Aerosp. Sci.* 2015. Vol. 78. P. 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2015.05.005>.

15. Modin I.A., Kochetkov A.V., Poverennov E.Yu. Chislennoe modelirovanie deformirovaniya granulirovannogo sloya pri szhatii [Numerical and experimental study of nonlinear compression packages of metal meshes]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2022. Vol. 84. No 2. P. 236–246 (In Russian).

16. Xiao L., Song W. Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: Experiments. *Int. J. Impact Eng.* 2018. Vol. 111. P. 255–272. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.09.018>.

17. Kochetkov A.V., Modin I.A. Numerical simulation of the interaction of a shock wave with a permeable granulated layer. In: *Behavior of Materials under Impact, Explosion, High Pressures and Dynamic Strain Rates*. Cham, Switzerland. Springer, 2023. P. 129–143. DOI: 10.1007/978-3-031-17073-7_9.

18. Glazova E.G., Turygina I.A., Modin I.A. Modelirovanie vzaimodeystviya udarnoy volny s deformiruemyim pronitsaemyim granulirovannym sloem [Modeling the interaction of a shock wave with a deformable permeable granular layer]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2020. Vol. 82. No 3. P. 353–363 (In Russian).

19. Kochetkov A.V., Leont'yev N.V., Modin I.A. Numerical simulation of quasistatic and dynamic compression of a granular layer. *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2116. Iss. 1. Article No 270003. <https://doi.org/10.1063/1.5114277>.

20. Modin I.A., Kochetkov A.V., Glazova E.G. Chislennoe issledovanie vzaimodeystviya udarnoy volny s pronitsaemyim deformiruemyim granulirovannym sloem [Numerical simulation of the interaction of a shock wave with a permeable deformable granulated layer]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya Fiziko-matematicheskie nauki* [Journal of Samara State Technical University. Ser. Physical and Mathematical Sciences]. 2022. Vol. 26. No 1. P. 79–92 (In Russian).

21. Wang Dan, Liu Enlong, Zhang De et al. An elasto-plastic constitutive model for frozen

soil subjected to cyclic loading. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2021. Vol. 189. Article No 103341. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103341>.

22. Wang Caizheng, Wang Hongxu, Shankar Krishna, Hazell P.J. Dynamic failure behavior of steel wire mesh subjected to medium velocity impact: Experiments and simulations. *Int. J. Mech. Sci.* 2022. Vol. 216. Article No 106991. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106991>.

23. Guan J., Zhang X., Chen X. et al. Influence of seasonal freezing-thawing soils on seismic performance of high-rise cap pile foundation in permafrost regions. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2022. Vol. 199. Article No 103581. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103581>.

24. Chunyu Z., Zhu Z., Li B., Li T. Numerical simulation research on impact mechanical properties of frozen soil based on discrete element method. *Int. J. Damage Mech.* 2022. Vol. 32. Iss. 3. <https://doi.org/10.1177/10567895221133563>.

25. Ayoub Laoucine, Mourad Bachene, Said Rechak et al. Perforation analysis by punching of metal sheets. *Annales de Chimie: Science des Materiaux.* 2022. Vol. 46. Iss. 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.18280/acsm.460101>.

26. Qiao Yu, Cao Fu-Hua, Chen Yan et al. Impact tension behavior of heavy-drawn nanocrystalline CoCrNi medium entropy alloy wire. *Materials Science and Engineering: A.* 2022. Vol. 856. Article No 144041. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144041>.

27. Chen Yanbin, Liu Enlong, He Peng. A binary-medium-based constitutive model for geological materials based on the statistical meso-breakage concept and mean-field homogenization. *European Journal of Environmental and Civil Engineering.* 2022. P. 1–24. <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2136763>.

28. Ma Dongdong, Xiang Huasong, Zhou Zhiwei, Tan Yizhong, Wang Xinpeng. Study on energy dissipation characteristic of ice-rich frozen soil in SHPB compression tests. *Geofluids.* 2022. Vol. 2022. P. 1162357-1–1162357-9. <https://doi.org/10.1155/2022/1162357>.

29. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *Int. J. Impact Eng.* 1995. Vol. 16. Iss. 2. P. 321–330. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)93939-G](https://doi.org/10.1016/0734-743X(95)93939-G).

30. Bragov A.M., Konstantinov A. Yu., Kochetkov A.V., Modin I.A., Savikhin A.O. Eksperimentalnoe issledovanie deformatsionnykh svoystv nasypnogo sloya iz svintsovykh sharikov pri dinamicheskom i kvazistaticheskom nagruzhении [Experimental study of deformation properties of a bulk layer from plumbum balls under dynamic and quasistatic loading]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta [PNRPU Mechanics Bulletin]*. 2017. No 4. P. 16–27 (In Russian).

31. Zhu H., Pierron F. Exploration of Saint-Venant's principle in inertial high strain rate testing of materials. *Exp. Mech.* 2016. Vol. 56. P. 3–23. <https://doi.org/10.1007/s11340-015-0078-1>.

32. Bragov A.M., Igumnov L.A., Kaydalov V.B. et al. Eksperimentalnoe issledovanie i matematicheskoe modelirovanie povedeniya staley marok St. 3, 20Kh13 i 08Kh18N10T v shirokikh diapazonakh skorostey deformatsiy i temperature [Experimental study and mathematical modeling of the behavior of St. 3, 20Kh13 and 08Kh18N10T steels in wide ranges of strain rates and temperatures]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [J. Appl. Mech. Tech. Phys]*. 2015. No 6. P. 51–58 (In Russian).

33. Balandin V.I., Balandin V.I., Bragov A.M., Kotov V.L. Experimental study of the dynamics of penetration of a solid body into a soil medium. *Tech. Phys.* 2016. Vol. 61. P. 860–868. <https://doi.org/10.1134/S1063784216060037>.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE INTERACTION OF STRIKERS WITH GRANULAR LAYERS OF METAL BALLS*

Modin I.A., Balandin V.I.VI.

*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

mianet@mail.ru

Received by the Editor 2023/04/21

The results of experimental studies of the impact interaction of hemispherical and conical heads with a granular layer are presented. The granular layer consists of steel and lead balls. An experimental technique of inverted experiment is used. The technique for measuring the resistance force using a measuring rod is designed to determine the integral loads at the initial penetration site. A container filled with steel or lead balls is accelerated in a gas-dynamic gun to a speed of 100-200 m/s and strikes a fixed head of a hemispherical or conical shape. The material properties of the rod are such that no plastic deformations occur in it. An elastic compression impulse is formed in the rod, which is recorded by glued strain gauges. To prevent the scattering of metal balls and parts of the container, the impact occurs in a vacuum chamber. The presented results are averaged over the number of experiments performed for each type of head. The resistance of steel ball granular media is significantly higher than that of lead ball media. The shape of the striker has a significant influence on the behavior of the resistance forces. Experimentally obtained deformation diagrams of granular layers in static and dynamic loading modes are also presented. The curves for all loading modes of lead balls are non-linear and irreversible. At high loads, not only the repacking of particles occurs, but also a strong plastic flow of the material. For steel balls in the considered load range, strong plastic flow of the material is not observed. In the future, the experimental results will be used for numerical simulation of the penetration of strikers of various shapes into granular layers of metal balls.

Keywords: granular layer, elastoplastic compression, inverted experiment, strain diagram, Kolsky method, static compression, dynamic compression.

*This study was supported by the Russian Science Foundation (RSF 22-79-10076).