

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2018-80-4-533-542

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДИНАМИЧЕСКОГО И СТАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ ПАКЕТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕТЕННЫХ СЕТОК\*

© 2018 г.

**Кочетков А.В.<sup>1</sup>, Леонтьев Н.В.<sup>2</sup>,  
Модин И.А.<sup>1</sup>, Повереннов Е.Ю.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Научно-исследовательский институт механики*

*Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

<sup>3</sup>*АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Российская Федерация*

kochetkov@mech.unn.ru

*Поступила в редакцию 06.11.2018*

Многослойные пакеты из металлических сеток используются для защиты корпусов взрывных камер и других конструкций от осколочного повреждения и импульсных воздействий. Пакет сеток формируется, как правило, путем наложения слоев друг на друга с сохранением направлений проволок, поэтому многослойный пакет можно считать высокопористым деформируемым элементом конструкции, обладающим ортотропными свойствами. Ранее в результате экспериментальных исследований были получены кривые деформирования пористых пакетов плетеной сетки при динамическом и статическом сжатии по нормали к слою. С целью выявления факторов, вызывающих отличия динамических и статических кривых деформирования, проведено численное моделирование сжатия по нормали симметричного фрагмента пакета из плетеных сеток при статическом и динамическом режимах нагружения, наблюдаемых в экспериментальных исследованиях. Численное моделирование трехмерных процессов упругопластического деформирования фрагмента плетеной стальной сетки с учетом контактного взаимодействия проволок проводилось в вычислительных системах ANSYS и ANSYS LS-DYNA методом конечных элементов. Расчетная область состояла из четырех трехмерных цилиндрических тел. Сжатие проводилось парой абсолютно жестких пластин, движущихся симметрично навстречу друг другу. Для описания поведения проволок использовалась модель пластичности с изотропным упрочнением. Для получения достоверных результатов расчетов была экспериментально получена статическая диаграмма деформирования стали, из которой изготовлена сетка. Изучалось влияние ограниченности во времени действия нагружающего импульса и влияние отличия статических и динамических диаграмм деформирования материала, из которого изготовлена сетка. Показано, что основное

---

\* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (гранты №18-38-00157 мол\_а, №16-08-00458а) и госзадания Минобрнауки РФ 9.7057.2017/БЧ.

влияние на динамическое поведение фрагмента пористого пакета стальной сетки оказывают динамические свойства материала проволок, то есть отличие динамической диаграммы деформирования от статической. Конечная длительность нагружающего импульса и трение между проволоками для данного вида сеток существенного влияния не оказывают.

*Ключевые слова:* плетеные сетки, упругопластическое сжатие, эксперимент, численное моделирование, статика, динамика, трехмерная задача.

## Введение

Один из способов снижения импульсных и вибрационных нагрузок – это применение в конструкциях пористых элементов в виде гранулированных слоев, проволочных решеток, экранов, сеток, перфорированных перегородок [1–9]. В частности, для защиты силовых корпусов взрывных камер от осколочного повреждения в настоящее время применяются многослойные металлические сетки тканого плетения [10–12]. Защитный пакет сеток обычно формируется путем наложения слоев друг на друга с сохранением направлений проволок, поэтому многослойный пакет можно считать высокопористым деформируемым элементом конструкций, обладающим ортотропными свойствами [12]. В [13–17] приведены некоторые результаты экспериментальных исследований деформационных свойств многослойных пакетов сеток на сжатие по направлению нормали к слоям сеток. Показано, что при интенсивных нагрузках диаграммы деформирования нелинейны и необратимы.

Экспериментальные исследования [15] показали существенные отличия кривых деформирования пакетов сеток в статическом и динамическом режимах сжатия. Динамические испытания проводились на газовых пушках в системе разрезного стержня Гопкинсона по методикам Кольского [18–20]. Исследования проведены для сетки диаметром 0,5 мм и шагом плетения 2,5 мм, изготовленной из стали Ст 3. Скорость деформации в экспериментах изменялась в пределах 1500–3500 с<sup>-1</sup>. Деформирование образца проходило в несколько циклов, связанных с распространением волн сжатия и растяжения в мерных стержнях. На рис. 1 показаны диаграммы деформирования образцов при сжатии по нормали к слоям сеток, включающие в себя участки активного нагружения и разгрузки (1 – образец из 10 слоев; 2 – образец из 20 слоев, 3 – результаты статических испытаний [15]).

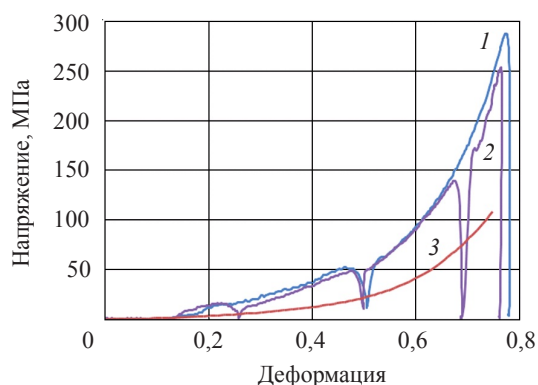


Рис. 1. Диаграммы сжатия плетеной металлической сетки при статическом и динамическом режимах нагружения

Статические испытания на сжатие по нормали проводились на сервогидравлической установке Zwick/Roell Amsler HA 100 для пакетов сеток из 10 и 20 слоев. Видно, что деформирование при активном нагружении имеет нелинейный характер, в то время как разгрузочные ветви близки к прямым линиям. Кривые деформирования для образцов, состоящих более чем из 10 слоев, слабо зависят от количества слоев и формы образца. Полученные при активном нагружении динамические кривые деформирования располагаются значительно выше статической кривой.

В настоящей статье для выяснения факторов, обуславливающих различие кривых деформирования в различных режимах, проведены численные исследования трехмерных процессов упругопластического статического и динамического сжатия симметричных фрагментов многослойного пакета плетеных стальных сеток.

### Результаты численного моделирования статического и динамического сжатия

Пакет сеток формируется, как правило, путем наложения слоев с сохранением направлений проволок. Такой пакет имеет квазипериодическую структуру, в нем можно выделить некоторый симметричный фрагмент. Для моделирования выбрана типовая симметричная ячейка одного слоя плетеной сетки (рис. 2). Предполагается, что эта ячейка является представительным объемом, деформирование которого определяет деформацию многослойного пакета в целом.

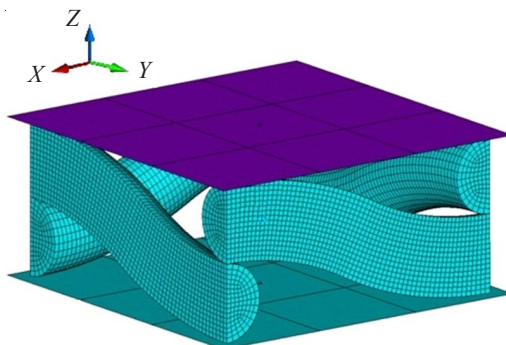


Рис. 2. Расчетная модель

Численное моделирование процесса статического деформирования плетеной металлической сетки при ее сжатии перпендикулярно плоскости слоя проводилось в вычислительной системе ANSYS v. 17.2 методом конечных элементов (лицензия Academic Research, Customer #623640). Расчетная область состоит из четырех трехмерных цилиндрических тел (проволок). В силу симметрии рассматривается половина поперечного сечения проволок. На торцах проволок также выполняются условия симметрии. В начальный момент времени напряжения и деформации отсутствуют. В этой задаче применен алгоритм расчета идеального симметричного контакта тел без трения и с трением, когда в каждой контактной области используются две контактные пары. Коэффициент трения принимался равным 0,3. Сжатие проводилось парой абсолютно жестких пластин (плоскостей симметрии), движущихся в направлении оси  $Z$  навстречу друг другу (кинематическая схема нагружения), и продолжалось до достижения половины начальной толщины фрагмента (до диаметра одной проволоки).

Геометрическая модель проволоки получена вытягиванием полукруглого сечения вдоль оси проволоки. Ось состоит из двух сопряженных дуг окружности. Для построения конечно-элементной модели использовался 20-узловой конечный элемент (КЭ) второго порядка SOLID185 с сокращенным ( $2 \times 2 \times 2$ ) интегрированием. Модель каждой из проволок состоит из 6144 КЭ, всего 24576 КЭ. Общее количество неизвестных составило 321660. Для описания поведения материала применялась модель пластичности с изотропным упрочнением. В расчетах использовалась экспериментальная диаграмма сжатия для стали Ст 3, из которой изготовлена сетка (рис. 3) с параметрами: модуль упругости 200 ГПа, коэффициент Пуассона 0,3, предел текучести 235 МПа, линейный модуль упрочнения при больших деформациях принят равным 1 ГПа. Моделирование сжатия реализовано за 200 шагов. Задача решалась в параллельном режиме на сервере HP ProLiant DL580.

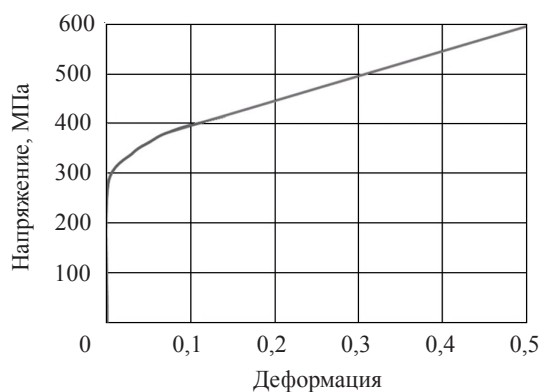


Рис. 3. Диаграмма деформирования материала

На рис. 4 приведено распределение эквивалентных пластических деформаций после снятия нагрузки. Наблюдается развитое пластическое течение во всех проволоках, максимальные значения эквивалентных пластических деформаций в узле плетения достигают 1,3. Имеет место высокая неоднородность деформированного состояния, особенно в окрестности сжатого узла плетения. Сравнение результатов моделирования с учетом и без учета трения на контактных поверхностях показало незначительное влияние сил трения.

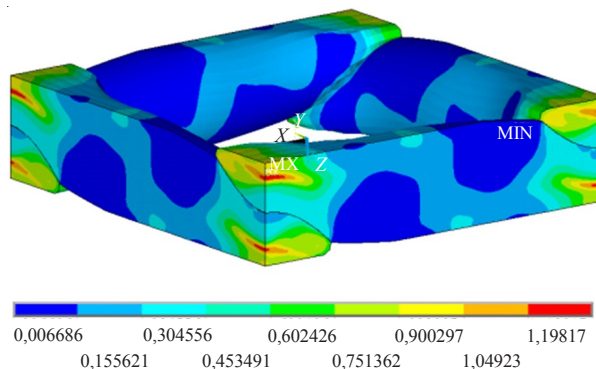


Рис. 4. Распределение эквивалентных пластических деформаций

На рис. 5 приведено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в конце обжатия, когда смещение нагружающих пластин максимально. Эквивалентные напряжения во всех проволоках, за исключением небольших локализованных зон, превышают 450 МПа, что свидетельствует о высоком уровне внутренних напряжений и об их неоднородном распределении.

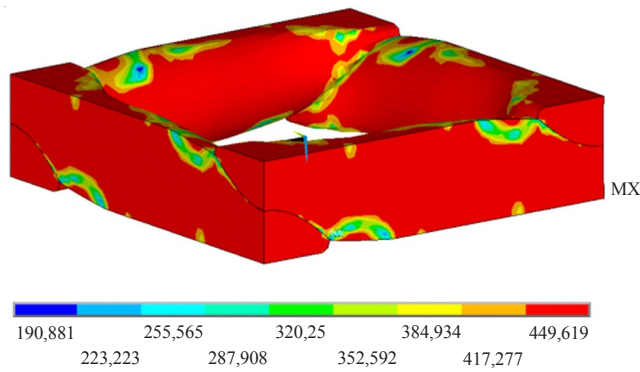


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу

Численная диаграмма деформирования пористого фрагмента пакета плетеных сеток вдоль оси  $Z$  в квазистатическом режиме нагружения показана на рис. 6 (красная линия с цифрой 1). Диаграмма связывает среднее вертикальное напряжение с деформацией фрагмента. Вычисление средних напряжений проводилось по формуле:

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{1}{V_{c.cell}} \sum_e \sigma_{ij}^e V_c^e,$$

где угловые скобки обозначают среднее значение;  $V_{c.cell}$  – текущий объем деформируемой области вместе с пустотами, равный  $(2d - U_z)l^2$ ;  $U_z$  – смещение вертикальной плоскости;  $\sigma_{ij}^e$  – напряжения в конечном элементе;  $V_c^e$  – текущий объем конечного элемента,  $l = 2,5$  мм – шаг плетения,  $d = 0,5$  мм – диаметр проволоки. Резкий излом диаграммы связан с возрастающим сопротивлением сжимающихся проволок при смещениях, сравнимых с их диаметром.

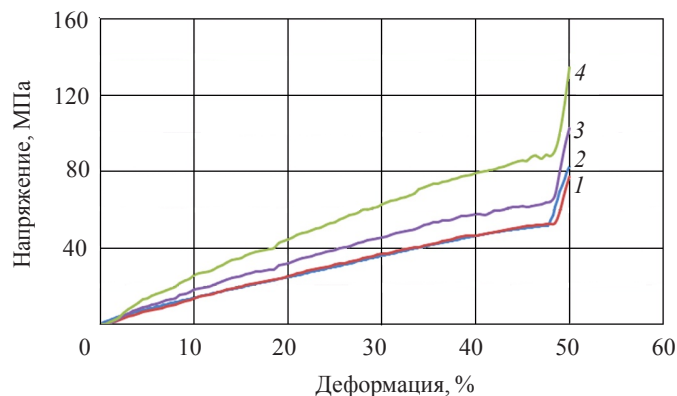


Рис. 6. Кривые деформирования статического и динамического сжатия симметричного фрагмента плетеной сетки

Численное моделирование динамического деформирования фрагмента плетеной сетки выполнено в программном обеспечении ANSYS LS-DYNA (явная схема интегрирования по времени, лицензия Customer #244793). Нагружение аналогичного фрагмента пакета сетки (см. рис. 2) проводилось с постоянной скоростью 1,25 м/с в течение времени 0,4 мс. Характеристики импульса и скорости нагружения соответствуют экспериментально наблюдаемым и измеряемым воздействиям в исследованиях [15, 20]. При численном моделировании не воспроизводились циклы разгрузки в динамическом эксперименте, связанные с пробегом и отражением волн в мерных стержнях, нагружение было непрерывным. Модель деформирования материала та же, что и при моделировании в статическом режиме. Задача решалась на персональном компьютере Intel(R) Xeon(R) CPU E5 2643, с частотой процессора 3,3 ГГц, объемом оперативной памяти 8 Гб и 8 ядрами. Время, затраченное на решение трехмерной задачи, составило 20 минут.

На рис. 6 показаны зависимости среднего по расчетной области вертикального (по оси сжатия  $Z$ ) напряжения от средней вертикальной деформации, статическая кривая отмечена цифрой 1, динамическая – цифрой 2. Эти кривые практически совпадают. Таким образом, для одной и той же статической диаграммы сжатия стали Ст 3 влияние режима нагружения оказывается незначительным. Материал успевает необратимо деформироваться в течение действия нагружающего импульса.

Другим фактором, который может повлиять на изменение характера деформирования фрагмента, является отличие динамической диаграммы материала (сталь Ст 3) от статической. В статье [21] при обобщении известных экспериментальных данных по зависимостям характеристик деформирования от скорости нагружения показано, что для многих металлов и их сплавов наибольшую зависимость от изменения скорости деформирования от  $10^{-2}$  до  $10^4$  с $^{-1}$  проявляет предел текучести, который может измениться в несколько раз. Другие характеристики ведут себя относительно стабильно. С целью учета этого фактора проведены численные исследования сжатия фрагмента стальных плетеных сеток с повышенным пределом текучести стали: 300 МПа и 500 МПа. На кривой деформирования стали (см. рис. 3) изменяется только значение предела текучести, угол наклона упругого участка и поведение участков кривой деформирования выше предела текучести не изменяются. На рис. 6 цифрами 3 и 4 показаны полученные в результате численных расчетов динамические диаграммы деформирования фрагмента пакета сеток, как пористой среды. Наблюдается сильная зависимость кривых деформирования от значений предела текучести и, следовательно, от скорости деформирования. С ростом динамического предела текучести материала кривые деформирования фрагмента качественно изменяются в соответствии с поведением, наблюдаемым в статических и динамических экспериментах. Таким образом, основным фактором, который обуславливает отличие динамических диаграмм деформирования от статических для пористых пакетов плетеных сеток, является отличие динамической и статической диаграмм материала, из которого изготовлена сетка.

На рис. 7 и 8 приведены распределения эквивалентных напряжений по Мизесу и эквивалентных пластических деформаций в момент времени 0,4 мс (окончание действия импульса). Распределение напряжений и деформаций в целом соответствует распределению при статическом нагружении за небольшим исключением областей в окрестности узлов плетения.



NODAL SOLUTION

STEP = 1  
SUB = 101  
TIME = 0,4  
SEQV (AVG)  
DMX = 0,248242  
SMN = 45,3359  
SMX = 581,97

SEP 13 2018  
07:43:44

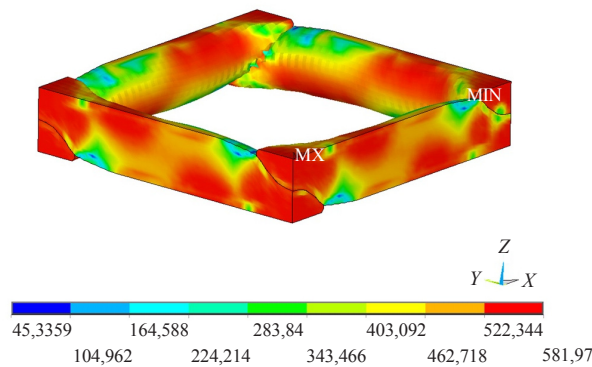


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу

NODAL SOLUTION

STEP = 1  
SUB = 101  
TIME = 0,4  
SEQV (AVG)  
DMX = 0,248242  
SMN = 0,009208  
SMX = 1,11229

SEP 13 2018  
07:46:55

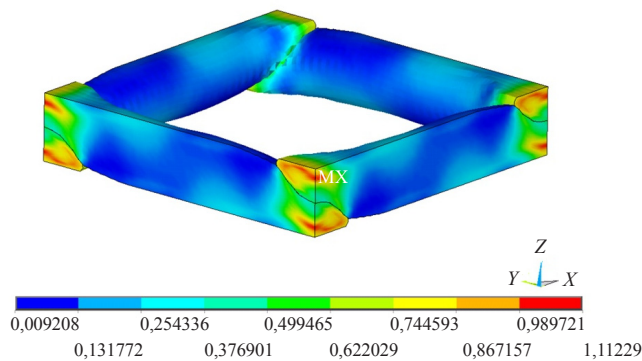


Рис. 8. Распределение эквивалентных пластических деформаций

### Заключение

В ходе численных исследований деформирования фрагмента плетеной сетки как пористой среды были получены кривые упругопластического сжатия фрагмента сетки и сопоставлены с результатами ранее проведенных экспериментов, в которых наблюдалось сильное отличие динамических диаграмм от статических. Исследовались два фактора, которые могли бы вызвать отличия в поведении кривых, – конечная длина воздействующего импульса и отличия динамической и статической диаграммы сжатия исходного материала сетки. Показано, что главное влияние на динамическое поведение фрагмента пористого пакета стальной сетки оказывает динамическая диаграмма деформирования материала проволок. Конечная длительность нагружающего импульса для данного вида сеток существенного влияния не оказывает. Трение при моделировании контактного взаимодействия проволок сетки при сжатии симметричного фрагмента существенного влияния на результаты также не оказывает.

### Список литературы

1. Herrmann W. Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials. *Journal of Applied Physics*. 1969. Vol. 40. No 6. P. 2490–2499.

2. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. *Фугасные эффекты взрывов*. СПб.: Изд-во «Полигон», 2002. 272 с.
3. 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.
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.
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.
7. 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. Iss. 9. DOI: 10.1063/1.2197028.
8. Konstantinov A.Yu., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Smirnov I.V. Simulation the dynamics of a composite cylindrical shell with a gas-permeable layer under the internal impulse loading. *Materials Physics and Mechanics*. 2016. Vol. 28. No 1/2. P. 39–42.
9. Кругликов Б.С., Кутушев А.Г. Ослабление ударных волн экранирующими решетками. *ФГВ*. 1998. Т. 24. №1. С. 115–118.
10. Абакумов А.И., Заикин С.Н., Мальцев В.Ю. и др. Численная модель деформирования противоосколочной сетки при взрывном нагружении. *Тр. ВНИИЭФ. Математическое моделирование физических процессов*. 2006. №10. С. 16–30.
11. Абузяров М.Х., Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Крылов С.В., Романов В.И., Сырунин М.А. Моделирование взаимодействия ударных волн с деформируемыми газопроницаемыми преградами. *Проблемы прочности и пластичности*. 2010. Вып. 72. С. 120–129.
12. Глазова Е.Г., Константинов А.Ю., Кочетков А.В., Крылов С.В. Взрывное нагружение деформируемых газопроницаемых осесимметричных элементов конструкций. *ПМТФ*. 2016. №5. С. 119–126. DOI: 10.15372 / PMTF20160513.
13. Горохов А.Н., Казаков Д.А., Кочетков А.В., Модин И.А., Романов В.И. Исследование деформационных свойств пакетов плетеных металлических сеток при квазистатическом сжатии и растяжении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2014. Т. 76. №3. С. 251–254.
14. 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. 104–117.
15. 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.
16. Кочетков А.В., Леонтьев Н.В., Модин И.А., Савихин А.О. Исследование деформационных и прочностных свойств металлических плетеных сеток. *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2018. №52. С. 53–62.
17. Xiao Lijun, Song Weidong. 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.
18. 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 No 2. P. 321–330.
19. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Кочетков А.В., Модин И.А., Савихин А.О. Экспериментальное исследование деформационных свойств насыпного слоя при динамическом и квазистатическом нагружении. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2017. №4. С. 16–27. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.02.
20. Брагов А.М., Ломунов А.К. *Использование метода Кольского для исследования процессов высокоскоростного деформирования материалов различной физической природы*. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2017. 148 с.



21. Мержиевский Л.А., Палецкий А.В. Расчет диаграмм динамического деформирования материалов и сплавов. *Физическая мезомеханика*. 2001. Т. 4. №3. С. 85–96.

#### References

1. Hermann W. Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials. *J. Appl. Phys.* 1969. Vol. 40. No 6. P. 2490–2499.
2. Gelfand B.E., Silnikov M.V. *Fugasnye efekty vzryvov [Explosive Effects of Explosions]*. Saint-Petersburg, Poligon Publ. 2002. 272 p. (In Russian).
3. Gelfand B.E., Gubanov A.V., Timofeev E.I. Interaction of shock waves in air with a porous screen. *Fluid Dynamics*. 1983. Vol. 18. No 4. P. 561–566.
4. Gelfand B.E., Medvedev S.P., Polenov A.N., Frolov S.M. Transmission of a shock load by bulk media. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 1988. Vol. 29. Iss. 2. P. 268–273.
5. 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.
6. 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.
7. 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. *J. Appl. Phys.* 2006. Vol. 99. Iss. 9. Doi.org/10.1063/1.2197028.
8. Konstantinov A.Yu., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Smirnov I.V. Simulation the dynamics of a composite cylindrical shell with a gas-permeable layer under the internal impulse loading. *Materials physics and mechanics*. 2016. Vol. 28. No 1/2. P. 39–42.
9. Kruglikov B.S., Kutushev A.G. Attenuation of shock waves by shielding grids. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 1988. Vol. 24. Iss 1. P. 106–109.
10. Abakumov A.I., Zaikin S.N., Maltsev V.Yu. et al. Chislennaya model deformirovaniya protivoooskolochnoy setki pri vzryvnom nagruzhении [Numerical model of deformation of anti-shatter net under explosive loading]. *Trudy VNIIEF. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov [Works RFNC. Mathematical Modeling of Physical Processes]*. 2006. No 10. P. 16–30 (In Russian).
11. Abuzyarov M.Kh., Glazova E.G., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Romanov V.I. Syrunin M.A. Modelirovanie vzaimodeystviya udarnykh voln s deformiruemyimi gazopronitsaemyimi pregradami [Modeling of the interaction of shock waves with deformable gas-permeable obstacles]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2010. Iss. 72. P. 120–129 (In Russian).
12. Glazova E.G., Konstantinov A.Yu., Kochetkov A.V., Krylov S.V. Explosive loading of deformable gas-permeable axisymmetric structural elements. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2016. Vol. 57. Iss. 5. P. 866–872. DOI: 10.15372 / PMTF20160513.
13. Gorokhov A.N., Kazakov D.A., Kochetkov A.V., Modin I.A., Romanov V.I. Issledovanie deformatsionnykh svoystv paketov pletenykh metallicheskikh setok pri kvazistaticheskome szhatii i rastyazhenii [Investigating deformational properties of packages of woven metallic grids loaded in quasistatic compression and tension.]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2014. Vol. 76. No 3. P. 251–254 (In Russian).
14. Kochetkov A.V., Leontyev N.V., Modin I.A. Eksperimentalno-chislennoe issledovanie deformirovaniya metallicheskikh pletenykh setok pri kvazistaticheskome nagruzhении [The experimental-numerical analysis of deformation of metallic woven grids under quasi-static loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2017. Vol. 79. No 1. P. 104–117 (In Russian).
15. Bragov A.M., Zhegalov D.V., Konstantinov A.Yu., Kochetkov A.V., Modin I.A., Savikhin A.O. Eksperimentalnoe issledovanie deformatsionnykh svoystv paketov pletenykh metallicheskikh setok pri dinamicheskom i kvazistaticheskome nagruzhении [Experimental study of deformation properties of a package of woven metal mesh under dynamic and quasi-static stressing]. *Vestnik PNIPU. Mekhanika [PNRPU Mechanics Bulletin]*. 2016. No 3. P. 252–262. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.17 (In Russian).
16. Kochetkov A.V., Leontyev N.V., Modin I.A., Savikhin A.O. Issledovanie deformatsionnykh i prochnostnykh svoystv metallicheskikh pletenykh 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. DOI: 10.17223/19988621/52/6 (In Russian).

17. Xiao Lijun, Song Weidong. Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: Experiments. *Int. J. Impact Eng.* 2018. No 111. P. 255–272.

18. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *Int. J. Impact Eng.* 1995. Vol. 16. No 2. P. 321–330.

19. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Kochetkov A.V., Modin I.A., Savikhin A.O. Eksperimentalnoe issledovanie deformatsionnykh svoystv nasypnogo sloya pri dinamicheskom i kvazistaticheskom nagruzhении [Experimental study of deformation properties of a bulk layer from plumbum balls under dynamic and quasistatic loading]. *Vestnik PNIPU. Mekhanika [PNRPU Mechanics Bulletin]*. 2017. No 4. P. 16–27. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.02 (In Russian).

20. Bragov A.M., Lomunov A.K. *Ispolzovanie metoda Kolskogo dlya issledovaniya protsessov vysokoskorostnogo deformirovaniya materialov razlichnoy fizicheskoy prirody [Using the Kolsky Method to Study the Processes of High-speed Deformation of Materials of Different Physical Nature]*. Nizhny Novgorod. UNN Publ. 2017. 148 p. (In Russian).

21. Merzhievsky L.A., Paletsky A.V. Raschet diagramm dinamicheskogo deformirovaniya materialov i splavov [Calculations for diagrams of dynamic deformation of metals and alloys]. *Fizicheskaya mezomekhanika [Physical Mesomechanics]*. 2001. Vol. 4. No 3. P. 85–96 (In Russian).

## NUMERICALLY MODELING ELASTOPLASTIC DYNAMIC AND STATIC COMPRESSION OF PACKAGES OF METALLIC WOVEN GRIDS

**Kochetkov A.V.<sup>1</sup>, Leontyev N.V.<sup>2</sup>, Modin I.A.<sup>1</sup>, Poverennov E.Yu.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Research Institute for Mechanics, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

<sup>2</sup>*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

<sup>3</sup>*JSC “OKBM Afrikantov”, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

Multilayered packages of metallic woven grids are used for protecting the vessels of explosion chambers and other structures from fragmentation damage and pulsed effects. A grid package is basically formed by stacking up several layers, observing the direction of the wires; that is why such a package can be considered to be a highly-porous deformable structural element with orthotropic properties. Earlier experimental studies made it possible to construct deformation curves for porous packages of woven grids under dynamic and static compression normal to the layer. To find out factors causing differences in dynamic and static deformation curves, normal compression of a symmetric fragment of woven grids under dynamic and static loading modes observed in the experimental studies was numerically modeled. The 3D processes of elastoplastic deformation of a fragment of a woven metallic grid, accounting for contact interaction between the wires, were numerically modeled with the help of computational systems ANSYS and ANSYS LS-DYNA using FEM. The analyzed area consisted of four 3D cylindrical bodies. Compression was applied with a pair of ideally rigid plates, symmetrically approaching each other. The deformational behavior of the wires was described using the model of plasticity with isotropic hardening. To obtain reliable computational results, a static deformation diagram was constructed for the steel the grid was made of. The effect of time limitation of the loading pulse was studied, as well as the effect of the difference in the static and dynamic deformation diagrams of the material of the grid. It is shown that the main effect on the dynamic behavior of the fragment of a porous package of steel grids is caused by the dynamic properties of the wire material, i.e., by the difference between the dynamic and static deformation diagrams. The final duration of the loading pulse and friction between the wires do not have any significant influence for that type of grids.

*Keywords:* woven grids, elastoplastic compression, experiment, numerical modeling, statics, dynamics, 3D problem.