

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-2-236-246

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО СЖАТИЯ ПАКЕТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕТЕННЫХ СЕТОК*

© 2022 г. **Модин И.А.¹, Кочетков А.В.¹, Повереннов Е.Ю.²**

¹*Научно-исследовательский институт механики*

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

²*АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Российская Федерация*

kochetkov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 18.02.2022

Приведены результаты численного моделирования в вычислительной системе ANSYS LS-DYNA упругопластического сжатия симметричных фрагментов пакета из плетеных стальных сеток толщиной в один и два слоя при динамическом режиме нагружения. Пакет сеток формируется путем наложения слоев друг на друга с сохранением направления проволоки. Пакет имеет квазипериодическую структуру, следовательно, можно выделить симметричные фрагменты. Для двух слоев сетки принимается фрагмент с учетом сдвига слоя в боковых направлениях на половину размера ячейки. Сжатие проводилось парой абсолютно жестких пластин, движущихся симметрично навстречу друг другу с постоянной скоростью в течение заданного интервала времени в соответствии с данными экспериментальных исследований. В расчете описания поведения материала использовалась мультилинейная модель пластичности с изотропным упрочнением. При превышении в расчете максимальной заданной деформации диаграмма автоматически продолжается с малым линейным модулем упрочнения. Проведен сравнительный анализ численных решений сжатия симметричных фрагментов из одного и двух слоев плетеной сетки. При сжатии фрагментов возникает сильно неравномерное напряженно-деформированное состояние в проволоках, особенно большие необратимые деформации возникают в узлах плетения. Кривые деформирования фрагментов имеют характерные перегибы, связанные с тем, что в процесс деформирования включаются не только узлы плетения, но и деформации обжатия проволоки по всей ее длине. Численные результаты сопоставлены с экспериментальной кривой динамического сжатия многослойного пакета сеток. Кривые сжатия отличаются для одного и двух слоев. Для двух слоев сеток кривая деформирования при малом давлении более соответствует экспериментальным данным, наблюдаются две стадии поведения диаграммы деформирования при малых и больших степенях обжатия, характерный перегиб образуется несколько раньше, чем в численном решении для одного слоя. Получены численные зависимости относительной площади нормального и бокового проходного сечений симметричного фраг-

*Выполнено при финансовой поддержке РФ (грант №20-79-00108).

мента пакета сеток от деформации обжатия. Эти данные могут быть использованы при моделировании распространения ударных волн через пакеты многослойных плетеных сеток.

Ключевые слова: плетеные сетки, многослойный пакет, симметричный фрагмент, упругопластическое сжатие, эксперимент, численное моделирование, динамическое нагружение, трехмерная задача.

Введение

В целях снижения импульсных и вибрационных нагрузок в ряде конструкций применяют пористые элементы в виде гранулированных слоев, проволочных решеток, экранов, сеток, перфорированных перегородок и т.д. [1–9]. В частности, для защиты силовых корпусов взрывных камер от осколочного повреждения применяются многослойные металлические сетки тканого плетения [10–12]. Защитный пакет сеток обычно формируется путем наложения слоев друг на друга. При этом даже при предварительном обжатии сохраняется свободное пространство, поэтому многослойный пакет можно считать высокопористым деформируемым неанізотропным элементом конструкций [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 для диаграмм деформирования характерны нелинейность и необратимость.

Экспериментальные исследования [15] показали существенные отличия кривых деформирования пакетов сеток в статическом и динамическом режимах сжатия. Динамические испытания для многослойных пакетов сеток с диаметром проволоки 0,5 мм и размером ячейки 2×2 мм, изготовленной из стали 3, были проведены на газовых пушках в системе разрезного стержня по экспериментальным методикам [18–21]. Полученные динамические кривые обжатия по нормали располагаются значительно выше статической кривой. Ранее в [16] было рассмотрено статическое сжатие одного слоя плетеной сетки.

С целью выявления эффектов межслойного взаимодействия и влияния поверхностного трения в настоящей статье дан сравнительный анализ численных решений динамического сжатия симметричных фрагментов пакета плетеных сеток, состоящих из одного и двух слоев, и построены численные диаграммы динамического деформирования при сжатии пакета сеток по нормали. Также приведена численная оценка изменения проходных сечений пакета плетеных сеток в разных направлениях в зависимости от степени обжатия.

1. Численное моделирование динамического сжатия

Пористый пакет сеток формируется, как правило, путем наложения слоев с сохранением направлений проволок. Такой пакет имеет квазипериодическую структуру, и можно выделить некоторые симметричные фрагменты. Для сравнения были выбраны типовые симметричные ячейки для одного слоя (рис. 1а) и для двух слоев (рис. 1б) плетеной сетки. Численное моделирование процесса динамического деформирования плетеной металлической сетки при ее сжатии перпендикулярно плоскости слоя проводилось в вычислительной системе ANSYS LS-DYNA (явная схема интегрирования по времени, лицензия Customer #244793). Ранее был рассмотрен и численно исследован симметричный фрагмент, состоящий из одного слоя [16]. Рас-

четная область из одного слоя состояла из четырех трехмерных цилиндрических тел. В силу симметрии рассматривалась половина поперечного сечения проволок. На торцах проволок также выполнялись условия симметрии. В начальный момент времени напряжения и деформации отсутствовали. В этой задаче использовался алгоритм расчета идеального симметричного контакта тел с учетом трения и без учета трения. 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). Сжатие проводилось до 0,7 начальной толщины фрагмента, далее возникала неустойчивость при пластическом деформировании.

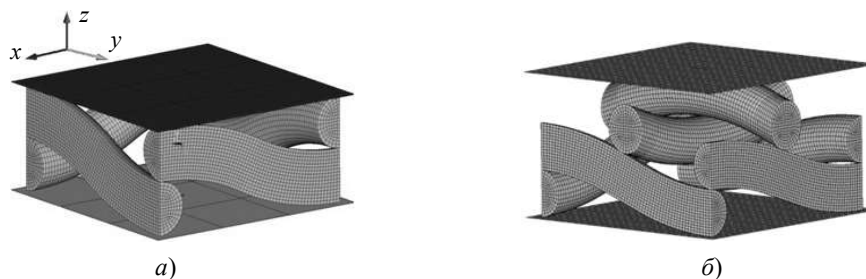


Рис. 1. Расчетные модели: *a* – 1 слой, *б* – 2 слоя

Геометрия проволоки получена вытягиванием полукруглого сечения вдоль оси проволоки. Для построения конечно-элементной модели использовался 20-узловой конечный элемент (КЭ) второго порядка SOLID185 с сокращенным ($2 \times 2 \times 2$) интегрированием. Общее количество неизвестных – 321660. Задача решалась на последовательности сеток до тех пор, пока различие в вычислении напряжений не превосходило 5%.

Для численного моделирования сжатия симметричного фрагмента из двух слоев сетки с теми же параметрами полная толщина модели составила три диаметра проволоки (1,5 мм). При этом соседние слои были сдвинуты на половину ячейки сетки, что привело к более плотной (более реальной) упаковке слоев в пакете. На торцах проволок выполняются условия симметрии и в начальный момент времени напряжения и деформации отсутствуют. Для построения конечно-элементной модели используется 20-узловой КЭ второго порядка. Модель состоит из 50000 элементов и 59000 узлов.

Нагружение симметричных фрагментов проводилось с постоянной скоростью 1,25 м/с в течение 1,2 мс. Характеристики импульса и скорости нагружения соответствовали экспериментально наблюдаемым и измеряемым воздействиям [15]. В статьях [22, 23] при обобщении известных экспериментальных данных по зависимостям характеристик деформирования металлов и их сплавов от скорости нагружения и экспериментальных работах [24–30] показано, что наибольшую зависимость от изменения скорости деформирования от 10^{-2} до 10^5 с $^{-1}$ проявляет предел текучести, который может измениться в несколько раз. В частности, для стали 3 предел текучести при скорости деформации 10^5 с $^{-1}$ достигает 500 МПа [22]. Другие характеристики ведут себя относительно стабильно. В динамических расчетах использовалась диаграмма деформирования материала сталь 3 [31, 32] на растяжение (рис. 2, сплошная линия), которая была получена в статических экспериментах (рис. 2, штриховая линия) путем увеличения предела текучести с 200 МПа до 300 МПа, как это

наблюдается при динамическом нагружении при скоростях деформации $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$. Модуль упругости равен 200 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,3, предел текучести – 300 МПа, предел прочности – 482 МПа, максимальное относительное удлинение составляет 20%.

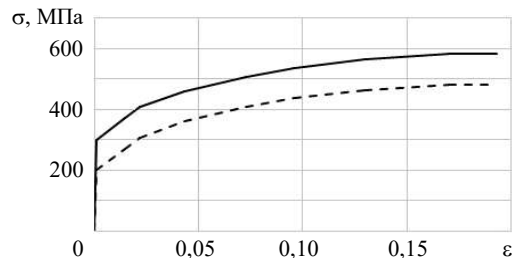


Рис. 2. Статическая и динамическая диаграммы деформирования материала

В расчете поведения материала использовалась мультилинейная модель пластичности с изотропным упрочнением (Piecewise Linear Plasticity). При превышении в расчете максимальной заданной деформации (20%) диаграмма автоматически продолжается с линейным модулем упрочнения, равным 1 ГПа.

На рис. 3 в целях сравнения приведено распределение эквивалентных пластических деформаций после снятия нагрузки для фрагментов из одного слоя (рис. 3а) и двух слоев (рис. 3б). Наблюдается развитое пластическое течение во всех проволоках, максимальные значения эквивалентных пластических деформаций в некоторых точках узла плетения достигают величины 1,6. Имеет место высокая неоднородность деформированного состояния, особенно в окрестности сжатых узлов плетения. Сравнение результатов моделирования с учетом и без учета трения на контактных поверхностях показало незначительное влияние сил трения.

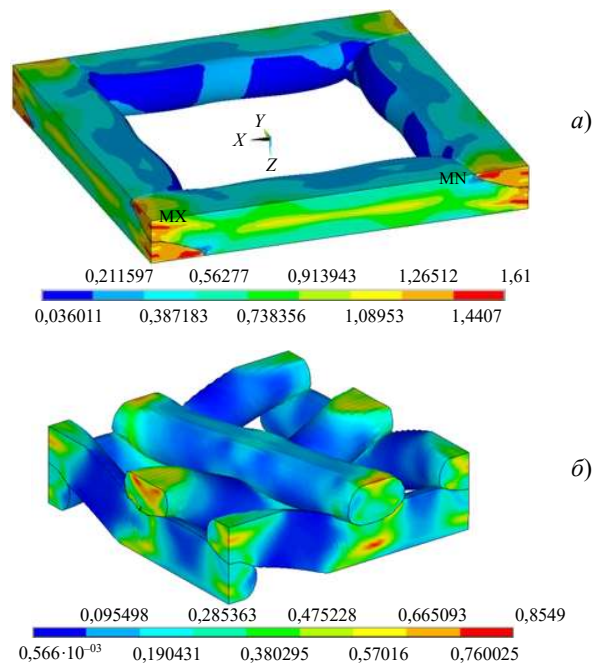


Рис. 3. Эквивалентные пластические деформации для одного и двух слоев

На рис. 4 приведено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу к концу обжатия, когда смещение нагружающих пластин максимально (a – для одного слоя, b – для двух слоев). Эквивалентные напряжения во всех проволоках, за исключением небольших локализованных зон, превышают 440 МПа для симметричного фрагмента (рис. 4а), что свидетельствует о высоком уровне внутренних напряжений и об их неоднородном распределении, неоднородность усиливается для симметричного фрагмента из двух слоев (рис. 4б).

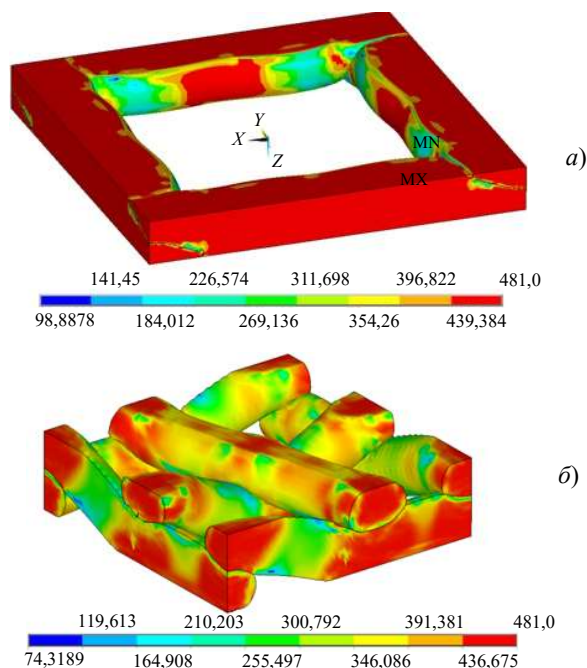


Рис. 4. Эквивалентные напряжения по Мизесу для одного и двух слоев

Численные диаграммы динамического деформирования фрагментов пакета плетеных сеток по нормали (вдоль оси Z) показаны на рис. 5: 1 – экспериментальная диаграмма, 2 – для одного слоя, 3 – для двух слоев [15].

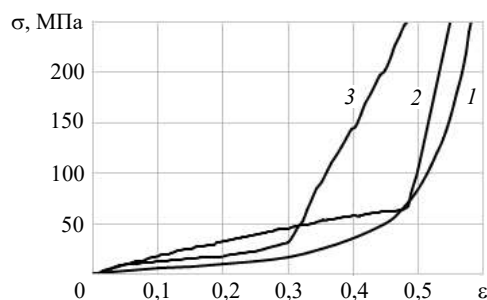


Рис. 5. Кривые деформирования динамического сжатия симметричных фрагментов плетеных сеток

Диаграмма связывает среднее вертикальное напряжение со средней деформацией фрагмента. Характерный перегиб диаграммы на рис. 5 при деформации 50% (кривая 2) связан с тем, что произошло локальное сжатие узлов плетеной металлической сетки и далее происходит сжатие проволок по всей их длине. Перегиб в

окрестности 30% на рис. 5 (кривая 3) для двухслойного симметричного фрагмента связан с началом контакта сдавливающей плоскости с нижним слоем проволок, что с каждым шагом резко увеличивает пятно контакта плоскости и двух слоев проволок.

Численные диаграммы сжатия фрагментов пакетов сеток отличаются для одного и двух слоев. Для двух слоев сеток кривая деформирования при малом давлении лучше соответствует экспериментальным данным, ее перегиб образуется несколько раньше, чем для одного слоя. Для более тщательного анализа причин такого поведения требуются дополнительные исследования сжатия большего количества слоев с анализом механизмов межслойного взаимодействия.

2. Изменение проницаемости пакетов плетеных сеток от степени их обжатия

Пакеты сеток являются газопроницаемыми элементами, поэтому большой интерес вызывают характеристики их проницаемости, связанные с изменением площадей проходных сечений вследствие их деформации. На рис. 6 показана геометрия проходного сечения для однослойного фрагмента сетки (перпендикулярного оси Z) до начала сжатия (левая часть рисунка) и после его окончания. Относительная площадь проходного сечения изменяется вследствие пластического деформирования проволок от 0,64 до 0,4. Относительная площадь боковых проходных сечений изменяется от 0,41 до нуля.

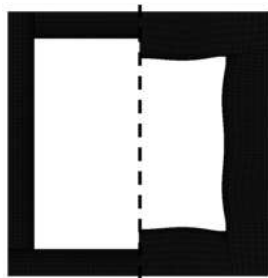


Рис. 6. Начальная и конечная формы вертикального проходного сечения для однослойного фрагмента

Вычисление относительной площади минимального проходного сечения проводилось по формуле:

$$\alpha_1 = \frac{S_{св}}{S_{яч}}.$$

Здесь $S_{св}$ – свободная площадь в плане, которая рассчитывается как $S_{св} = S_{яч} - S_{пр}$, где $S_{яч}$ – полная площадь симметричного фрагмента в плане, $S_{пр}$ – площадь деформированных проволок в плане.

На рис. 7 показано изменение относительной площади минимальных проходных сечений от вертикальной средней по объему деформации сжатия одного слоя плетеной металлической сетки (1 – изменение проницаемости в сечении, перпендикулярном оси Z ; 2 – изменение проницаемости в боковых сечениях).

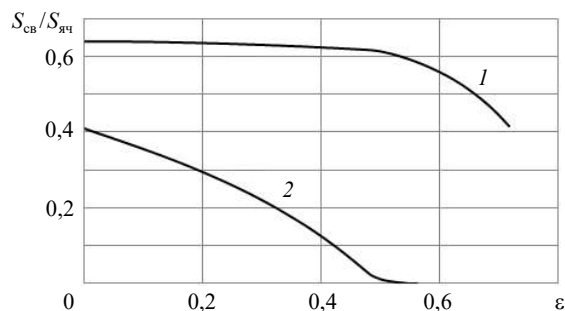


Рис. 7. Зависимость относительной площади проходных сечений от деформации обжатия

Заключение

В результате численных исследований динамического сжатия симметричных фрагментов плетеной сетки для двух вариантов (один слой сетки и два слоя сетки) были получены расчетные кривые упругопластического сжатия. Трение при моделировании контактного взаимодействия проволок сетки при сжатии симметричных фрагментов существенного влияния на результаты не оказывает. Кривые сжатия отличаются для одного и двух слоев. Для двух слоев сеток кривая деформирования при малом давлении лучше соответствует экспериментальным данным, ее перегиб образуется несколько раньше, чем для одного слоя. Для более тщательного анализа причин такого поведения требуются дополнительные исследования с большим количеством слоев.

Получены численные зависимости относительной площади нормального и бокового проходных сечений однослойного симметричного фрагмента пакета сеток от деформации обжатия. Эти зависимости могут быть использованы при моделировании взаимодействия проникаемых пакетов плетеных сеток с интенсивными ударными волнами, вызывающими большие деформации сеток.

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. DOI: 10.1063/1.1658021.
2. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. *Фугасные эффекты взрывов*. СПб.: ООО «Издательство «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. DOI: 10.1016/S0301-9322(00)00048-3.
7. 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. DOI: 10.1063/1.5114277.
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. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2006.01.007.
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. Т. 24. №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. 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.
12. Kochetkov A.V., Modin I.A., Leontev N.V., Turigina I.A., Poverennov E.Y. Numerical modeling of nonlinear dynamic and static compression of the metal mesh. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2019. No 4. P. 106–113. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.4.10.
13. Telegin S.V., Kirillova N.I., Modin I.A., Suleimanov E.V. Effect of particle size distribution on functional properties of Ce0.9Y0.1O2-d ceramics. *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. No 12. P. 17316–17321. DOI: 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. 58. P. 50–51. DOI: 10.1016/j.paerosci.2015.05.005.
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/2017.4.02.
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. DOI: 10.17223/19988621/52/6.
17. Xiao Lijun, Song Weidong. Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: Experiment. *International Journal of Impact Engineering*. 2018. Vol. 111. P. 255–272. DOI: 10.1016/J.IJIMPENG.2017.09.018.
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. 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 quasi-static loading. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2017. No 4. P. 16–27. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.02.
20. Bragov A., Igumnov L., Lomunov A., Konstantinov A., Lamzin D., Kruszka L. Use of the Kolsky method for dynamic tests of brittle media. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 174. No 2. P. 02022-1–02022-10. DOI: 10.1051/mateconf/201817402022.
21. 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.
22. Мержиевский Л.А., Палецкий А.В. Расчет диаграмм динамического деформирования материалов и сплавов. *Физическая мезомеханика*. 2001. Т. 4. № 3. С. 85–96.
23. Брагов А.М. 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. Т. 56. №6. С. 51–58. DOI: 10.15372/PMTF20150607.
24. Lamzin D.A., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu. Investigation of strength and time properties of lime-sand brick under dynamic loading. *Materials Physics and Mechanics*. 2019. Vol. 42. P. 517–521. DOI: 10.18720/MPM.4252019_4.
25. Igumnov L.A., Volkov I.A., Kazakov D.A., Shishulin D.N., Modin I.A. Numerical simulation of the creep process of titanium alloy VT6 under a multi-axis stress state taking into account the influence of an aggressive environment. *Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*. 2021. Vol. 25. No 3. P. 435–456. DOI: 10.14498/vsgtu1873.
26. Igumnov L.A., Kazakov D.A., Shishulin D.N., Modin I.A., Zhegalov D.V. Experimental studies of high-temperature creep of titanium alloy VT6 under conditions of a complex stress state

under the influence of an aggressive medium. *Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*. 2021. Vol. 25. No 2. P. 286–302. DOI: 10.14498/vsgtu1850.

27. Hu D., Meng K., Jiang H. Experimental investigation of dynamic properties of AerMet 100 Steel. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 99. P. 1459–1464. DOI: 10.1016/J.PROENG.2014.12.685.

28. Ruan H.H., Gao Z.Y., Yu T.X. Crushing of thin-walled spheres and sphere arrays. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2006. Vol. 48. Iss. 2. P. 117–133. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2005.08.006.

29. Sadd M.H., Shukla A., Mei H., Zhu C.Y. The effect of voids and inclusions on wave propagation in granular materials. In: *Micromechanics and Inhomogeneity*. Springer-Verlag, 1989. P. 367–383.

30. Shukla A., Damania C. Experimental investigation of wave velocity and dynamic contact stresses in an assembly of disks. *Experimental Mechanics*. 1987. Vol. 27. Iss. 3. P. 268–281.

31. Кочетков А.В., Леонтьев Н.В., Модин И.А., Повереннов Е.Ю. Численное моделирование упругопластического динамического и статического сжатия пакетов металлических плетеных сеток. *Проблемы прочности и пластичности*. 2018. Т. 80. №4. С. 533–542. DOI: 10.32326/1814-9146-2018-80-4-533-542.

32. Кочетков А.В., Леонтьев Н.В., Модин И.А., Турьгина И.А., Чекмарев Д.Т. Численное моделирование деформирования гранулированного слоя при сжатии. *Проблемы прочности и пластичности*. 2018. Т. 80. №3. С. 359–367.

References

1. Hermann W. Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials. *J. Appl. Phys.* 1969. Vol. 40. Iss. 6. P. 2490–2499. DOI: 10.1063/1.1658021.

2. Gelfand B.E., Silnikov M.V. *Fugasnye efekty vzryvov [The Explosive Effects of Explosions]*. Saint-Petersburg. Poligon Publ. 2002. 272 p. (In Russian).

3. Gelfand B.E., Gubanov A.V., Timofeev E.I. Vzaimodeystvie vozdukhnykh udarnykh voln s poristym ekranom [Interaction of air shock waves with a porous screen]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya: Mekhanika zhidkostey i gazov [Fluid Dynamics]*. 1983. No 4. P. 79–84 (In Russian).

4. Gelfand B.E., Medvedev S.P., Polenov A.N., Frolov S.M. Peredacha udarno-volnovoy nagruzki nasybnymi sredami [Transmission of shock wave load in bulk media]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [J. Appl. Mech. Tech. Phys.]*. 1988. No 2. P. 115–121 (In Russian).

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. DOI: 10.1016/S0301-9322(00)00048-3.

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. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2006.01.007.

7. 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. DOI: 10.1063/1.5114277.

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. Vol. 24. No 1. P. 115–118 (In Russian).

10. Abakumov A.I. et al. Chislennaya model deformirovaniya protivoookolnoy setki pri vzryvnom nagruzhenii [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. Glazova E.G., Turygina I.A., Modin I.A. Modelirovanie vzaimodeystviya udarnoy volny s deformiruемым pronitsaemym 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).

12. Kochetkov A.V., Modin I.A., Leontev N.V., Turigina I.A., Poverennov E.Y. Numerical modeling of nonlinear dynamic and static compression of the metal mesh. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2019. No 4. P. 106–113. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.4.10.
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. No 12. P. 17316–17321. DOI: 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. 58. P. 50–51. DOI: 10.1016/j.paerosci.2015.05.005.
15. Bragov A.M., Zhegalov D.V., Konstantinov A.Yu., Kochetkov A.V., Modin I.A., Savikhin A.O. Eksperimentalnoe issledovanie deformatsionnykh kharakteristik paketov pletenykh metallicheskikh setok pri dinamicheskom i kvazistaticheskom nagruzhenii [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).
16. Kochetkov A.V., Leont'ev 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 (In Russian).
17. Xiao Lijun, Song Weidong. Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: Experiment. *Int. J. Impact Eng.* 2018. Vol. 111. P. 255–272. DOI: 10.1016/J.IJIMPENG.2017.09.018.
18. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *Int. J. of Impact Eng.* 1995. Vol. 16. No 2. P. 321–330.
19. 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. P. 16–27. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.02.
20. Bragov A., Igumnov L., Lomunov A., Konstantinov A., Lamzin D., Kruszka L. Use of the Kolsky method for dynamic tests of brittle media. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 174. No 2. P. 02022-1–02022-10. DOI: 10.1051/mateconf/201817402022.
21. 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.
22. 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).
23. Bragov A.M. 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. Vol. 56. No 6. P. 51–58 (In Russian).
24. Lamzin D.A., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu. Investigation of strength and time properties of lime-sand brick under dynamic loading. *Mater. Phys. Mech.* 2019. Vol. 42. P. 517–521. DOI: 10.18720/MPM.4252019_4.
25. Igumnov L.A., Volkov I.A., Kazakov D.A., Shishulin D.N., Modin I.A. Numerical simulation of the creep process of titanium alloy VT6 under a multi-axis stress state taking into account the influence of an aggressive environment. *Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*. 2021. Vol. 25. No 3. P. 435–456. DOI: 10.14498/vsgtu1873.
26. Igumnov L.A., Kazakov D.A., Shishulin D.N., Modin I.A., Zhegalov D.V. Experimental studies of high-temperature creep of titanium alloy VT6 under conditions of a complex stress state under the influence of an aggressive medium. *Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*. 2021. Vol. 25. No 2. P. 286–302. DOI: 10.14498/vsgtu1850.
27. Hu D., Meng K., Jiang H. Experimental investigation of dynamic properties of AerMet 100 Steel. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 99. P. 1459–1464. DOI: 10.1016/J.PROENG.2014.12.685.

28. Ruan H.H., Gao Z.Y., Yu T.X. Crushing of thin-walled spheres and sphere arrays. *Int. J. Mech. Sci.* 2006. Vol. 48. Iss. 2. P. 117–133. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2005.08.006.
29. Sadd M.H., Shukla A., Mei H., Zhu C.Y. The effect of voids and inclusions on wave propagation in granular materials. In: *Micromechanics and Inhomogeneity*. Springer-Verlag, 1989. P. 367–383.
30. Shukla A., Damania C. Experimental investigation of wave velocity and dynamic contact stresses in an assembly of disks. *Exp. Mech.* 1987. Vol. 27. Iss. 3. P. 268–281.
31. Kochetkov A.V., Leontyev N.V., Modin I.A., Poverennov E.Yu. Chislennoe modelirovanie uprugoplasticheskogo dinamicheskogo i staticheskogo szhatiya paketov metallicheskih pletenykh setok [Numerically modeling elastoplastic dynamic and static compression of packages of metallic woven grids]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2018. Vol. 80. No 4. P. 533–542 (In Russian).
32. Kochetkov A.V., Leontyev N.V., Modin I.A., Turygina I.A., Chekmarev D.T. Chislennoe modelirovanie deformirovaniya granulirovannogo sloya pri szhatii [Numerically modeling deformation of a granular bed loaded in compression]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2018. Vol. 80. No 3. P. 359–367 (In Russian).

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY NONLINEAR COMPRESSION PACKAGES OF METAL MESHES

Modin I.A.¹, Kochetkov A.V.¹, Poverennov E.Yu.²

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

²*JSC 'OKBM Afrikantov', Nizhny Novgorod, Russian Federation*

The results of numerical simulation of elastoplastic compression of symmetrical fragments of a package of woven steel meshes are presented. The thickness of the symmetrical fragment is one and two layers. The study was carried out under dynamic loading conditions in the ANSYS LS-DYNA computer system. The mesh package is formed by superimposing layers on top of each other while maintaining the direction of the wires. The packet has a quasi-periodic structure; therefore, symmetrical fragments can be distinguished. For two mesh layers, a fragment is accepted, taking into account the shift of the layer in the lateral directions by half the size of the cell. The compression was carried out by a pair of absolutely rigid plates moving symmetrically towards each other at a constant speed for a given time interval. A multilinear plasticity model with isotropic hardening was used to describe the behavior of the material. If the maximum specified deformation is exceeded in the calculation, the diagram automatically continues with a small linear hardening modulus. A comparative analysis of numerical solutions for the compression of symmetrical fragments from one and two layers of a woven mesh is carried out. When the fragments are compressed, a strongly uneven stress-strain state arises in the wires, especially large irreversible deformations occur in the knots of weaving. The deformation curves of the fragments have characteristic inflections associated with the fact that the deformation process includes not only knots of weaving, but also deformations of wire compression along its entire length. The numerical results are compared with the experimental dynamic compression curve of a multilayer mesh package. The compression curves are different for one and two layers. For two layers of grids, the deformation curve at low pressure is more consistent with the experimental data. Two stages of behavior of the deformation diagram are observed at low and high degrees of compression, the characteristic inflection is formed somewhat earlier than in the numerical solution for one layer. Numerical dependences of the relative area of the normal and lateral passage sections of a symmetrical fragment of a mesh package on the compression strain are obtained. These data can be used to simulate the propagation of shock waves through multilayer woven mesh packages.

Keywords: braided meshes, multilayer package, symmetrical fragment, elastoplastic compression, experiment, numerical simulation, dynamic loading, three-dimensional problem.