

УДК 539.3

DOI 10.17223/19988621/52/6

А.В. Кочетков, Н.В. Леонтьев, И.А. Модин, А.О. Савихин**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕТЕННЫХ СЕТОК¹**

Металлические сетки в виде многослойных пакетов используются как высокопористые легкодеформируемые элементы для защиты силовых корпусов взрывных камер и других конструкций от осколочного повреждения и других 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. В результате экспериментальных исследований были получены кривые деформирования многослойных пакетов и одного слоя плетеной металлической сетки при испытаниях на сжатие по нормали к слою и растяжение вдоль проволок, вплоть до разрушения образцов. Экспериментально показан эффект увеличения силы растяжения предварительно обжатого одного слоя плетеной сетки, характерный для многослойных пакетов. Математическое моделирование деформирования одного слоя плетеной сетки подтверждает эффект увеличения силы при растяжении вдоль линий проволок после предварительного обжатия слоя по нормали. По результатам математического моделирования выявлены два механизма увеличения растягивающей силы. Первый – связан с упрочнением материала в окрестности узла сетки, вызванного сильным его обжатием и развитым пластическим течением. Второй – с тем, что в результате обжатия растягиваемые проволоки находятся преимущественно в сжатом состоянии и для их растяжения требуются дополнительные силы.

Ключевые слова: *плетеные сетки, ортотропия, упругопластическое сжатие, растяжение, разрушение, эксперимент, численное моделирование.*

Использование в конструкциях пористых элементов в виде проволочных решеток, экранов, сеток, перфорированных перегородок является одним из способов снижения импульсных и вибрационных нагрузок [1–3]. Например, для защиты корпусов взрывных камер от осколочного повреждения в настоящее время применяются многослойные металлические сетки тканого плетения. Подобные преграды используются как в виде плоских, так и осесимметричных пакетов, скрученных в рулон для укладки их перед стенками цилиндрических камер [4–6]. 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 [6]. Пакеты сеток сопротивляются деформированию при сжатии по нормали к слоям и растяжению вдоль проволок. Для проектирования подобных демпфирующих элементов необходимо знать их деформационные и

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (задание 9.7057.2017/БЧ в части экспериментальных исследований на растяжение) и грантов РФФИ № 16-19-10237 в части испытаний на сжатие, № 17-79-20161 в части численного моделирования.

прочностные свойства. В [7–9] приведены некоторые результаты экспериментальных исследований деформационных свойств многослойных пакетов сеток на квазистатическое и динамическое сжатие по направлению нормали к слоям сеток и на растяжение вдоль проволок в плоскости слоя. Показано, что при интенсивных нагрузках диаграммы деформирования носят нелинейный и необратимый характер. В квазистатическом режиме нагружения, в отличие от динамического, выявлена зависимость степени предварительного обжатия многослойных пакетов по нормали к плоскости слоя на характеристики растяжения пакета в плоскости слоя по направлениям проволок. В данной работе приводятся результаты экспериментальных и численных исследований выявленного эффекта на одном слое стальной плетеной сетки.

1. Экспериментальные исследования предварительно обжатой металлической сетки на растяжение

Квазистатические испытания на сжатие по нормали и растяжение вдоль одного из направлений проволок сетки проводились на сервогидравлической установке Zwick/Roell Amsler HA 100. Управление и регистрация процесса нагружения осуществлялась с помощью программного обеспечения «Test Xpert II». Экспериментальные исследования были проведены для сетки диаметром 0,5 мм и шагом плетения 2,5 мм, изготовленной из Ст3. Ранее проведенные исследования квазистатического деформирования пакетов сеток из 10 и 20 слоев при растяжении [9] выявили нелинейный характер и существенную зависимость диаграмм растяжения от степени предварительного обжатия. По мере увеличения степени предварительного обжатия пакетов сеток по нормали к слоям происходит увеличение напряжения, необходимого для растяжения образцов по направлению проволок и их разрушения. Предельные характеристики разрушения ($\sigma_{\text{пред}}$ – напряжение разрушения, $\varepsilon_{\text{пред}}$ – деформация разрушения) при растяжении в зависимости от степени обжатия $\sigma_{\text{сж}}$ приведены в таблице.

Таблица предельных характеристик растяжения
(пакет плетеных сеток, материал сталь 3)

$-\sigma_{\text{сж}}$, МПа	0	5	20	40	80
$\sigma_{\text{пред}}$, МПа	23	32	54	75	84
$\varepsilon_{\text{пред}}$	0,45	0,3	0,2	0,09	0,06

Для изучения эффекта увеличения силы на растяжение при возрастании степени предварительного обжатия проведены испытания на растяжение одного слоя аналогичной сетки. Образец был изготовлен в размере 110 × 20 мм, рабочая база образца составляла 14 мм, на растяжение образца вдоль нитей работало 8 проволок. На рис. 1 приведены кривые в пересчете на одну из восьми растягиваемых проволок на один шаг плетения (для последующего сравнения с численными исследованиями). Отмечены следующие кривые: 1 – сетка без предварительного статического обжатия; 2 – обжатие сетки до $0.5h$, где h – начальная толщина слоя, равная двум диаметрам проволоки ($h = 1$ мм); 3 – обжатие до $0.3h$. По результатам экспериментов качественно был выявлен тот же эффект, что и при испытании многослойного пакета [9]. Кривые растяжения при увеличении предварительного обжатия располагаются выше. Разрушающее напряжение увеличивается с ростом силы предварительного обжатия, а разрушающее перемещение уменьшается.

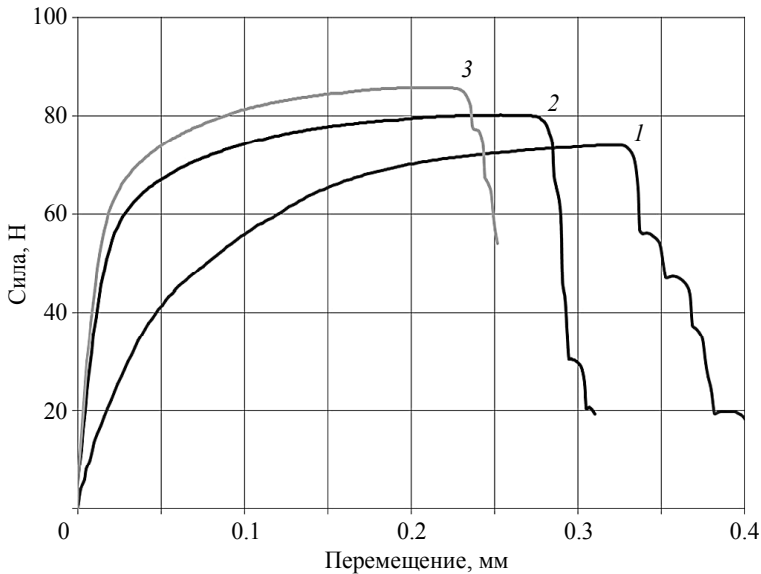


Рис. 1. Диаграммы растяжения сетки в зависимости от степени обжатия
Fig. 1. Diagrams of the grid extension as a function of reduction rate

После предварительного обжатия слоя сетки был визуально рассмотрен узел плетения под микроскопом (рис. 2) для обжатия 0,5*h*. Видно пятно контакта с обжимаемой плоскостью. Оно одинаково по форме и площади для обеих проволок узла плетения. Замерены параметры проволоки в обжатом состоянии, ее максимальная ширина составила 0,75 мм, толщина – 0,25 мм в узле плетения при начальном диаметре проволоки 0,5 мм. Растяжение сетки завершается ее разрушением – образованием шейки и разрывом. Необжатая сетка разрушается в окрестности узла плетения (рис. 3, справа – здесь одна поперечная проволока выпала после разрыва), для обжатой сетки меняется характер разрушения, образование шейки и разрыв происходит между узлами плетения (рис. 3, слева).

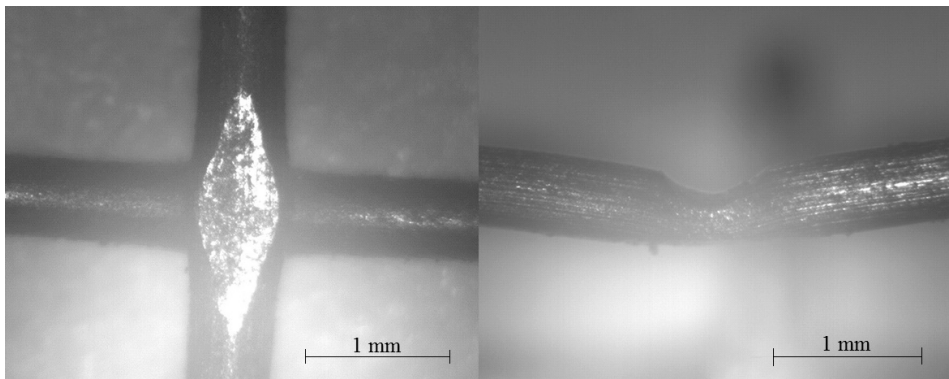


Рис. 2. Формы проволок в узле плетения после обжатия
Fig. 2. Shape of the wires in a knot after reduction

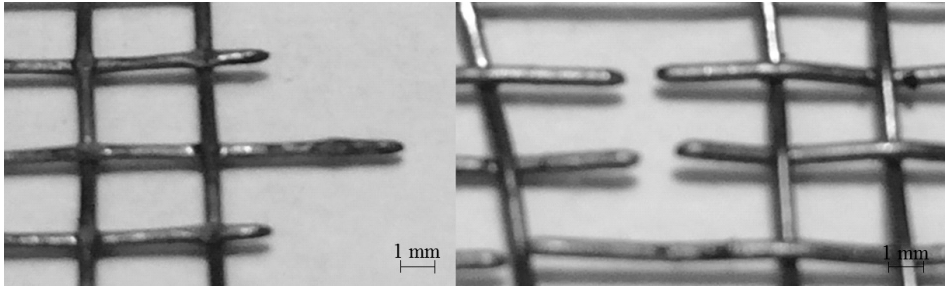


Рис. 3. Вид разрушенной сетки после растяжения (слева – обжатая сетка, справа – сетка без обжатия)

Fig. 3. Pattern of a destructed grid after tension (on the left – reduced grid, on the right – grid without reduction)

2. Результаты численного моделирования

С целью выявления причин, вызывающих экспериментально наблюдаемый эффект увеличения сил растяжения от степени предварительного обжатия сеток, проведено численное моделирование процессов деформирования. Моделирование проводилось в вычислительной системе ANSYS v 17.2 методом конечных элементов (лицензия Academic Research, Customer #623640). Для моделирования была выбрана типовая ячейка плетеной сетки (рис. 4). Расчетная область состоит из четырех трехмерных цилиндрических тел (проволок). В силу симметрии берется половина сечения проволок. На торцах проволок также выполняются условия симметрии. В начальный момент времени напряжения и деформации отсутствуют.

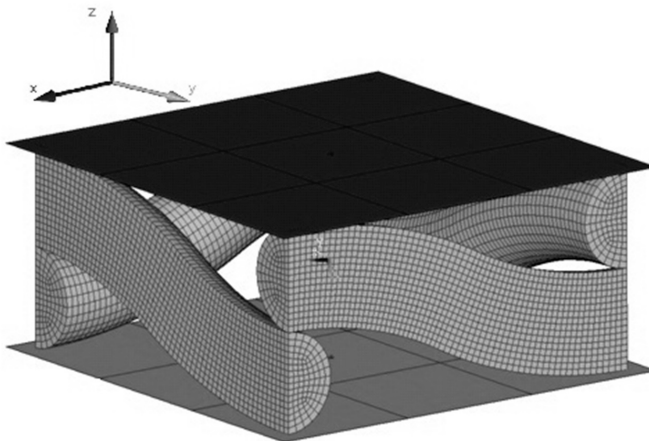


Рис. 4. Конечно-элементная модель объекта исследования

Fig. 4. Finite-element model of the test sample

В данной задаче использовался 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 плоскостей, движущихся в направлении оси Z симметрично навстречу друг другу. Выбран один из вариантов сжатия в

проведенных выше экспериментах – до половины начальной толщины слоя $0.5h$. Весь процесс моделируемого нагружения был разбит на три этапа:

1. Обжатие сетки, перпендикулярно плоскости слоя по оси Z .
2. Снятие нагрузки с обжатого образца.

3. Растяжение по направлению проволок по оси X в плоскости сетки, движением боковых плоскостей симметрии аналогично обжатию.

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 КЭ второго порядка SOLID185 с сокращенным ($2 \times 2 \times 2$) интегрированием. Проводилось сравнение численных решений на последовательности конечно-элементных сеток; результаты оказались сходящимися и близкими. Итоговая сетка передает все особенности процессов нагружения и упругопластической деформации. Модель каждой из проволок состоит из 6144 конечных элементов (КЭ), всего 24576 КЭ. Общее количество неизвестных составило 321660. Для описания поведения материала рассматривалась мультилинейная модель пластичности с изотропным упрочнением. Для получения достоверных результатов расчетов использовалась полученная авторами экспериментальная диаграмма деформирования для Ст3, из которой изготовлена сетка (рис. 5). В качестве меры деформации принимается логарифмическая мера. Модуль упругости равен 200 ГПа, коэффициент Пуассона – 0.3, предел текучести – 235 МПа, линейный модуль упрочнения при больших деформациях равен 1 ГПа.

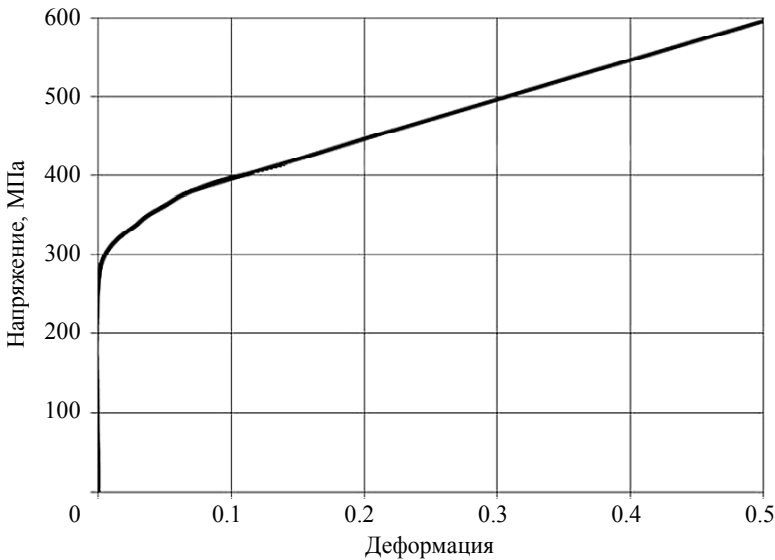


Рис. 5. Диаграмма деформирования материала
 Fig. 5. Material deformation diagram

Первый этап моделирования (сжатие) был реализован за 200 шагов без изменения величины шага. Это обусловлено необходимостью уменьшить искажения формы конечных элементов при больших деформациях. На втором и третьем этапах нагружения применялась автоматическая коррекция величины шага, что позволило адаптивно увеличить шаг и сократить временные затраты на решение.

Второй этап пройден за 25 шагов, третий – за 22 шага. Задача решалась в параллельном режиме на сервере HP ProLiant DL585, процессор AMD Opteron 6176SE – 2.3GHz, на восьми ядрах. Время, затраченное на решение, составило около 8 ч. На рис. 6 приведено распределение эквивалентных пластических деформаций после второго этапа нагружения. Наблюдается развитое пластическое течение во всех проволоках, максимальное значение эквивалентных пластических деформаций в узле плетения достигает 1,3.

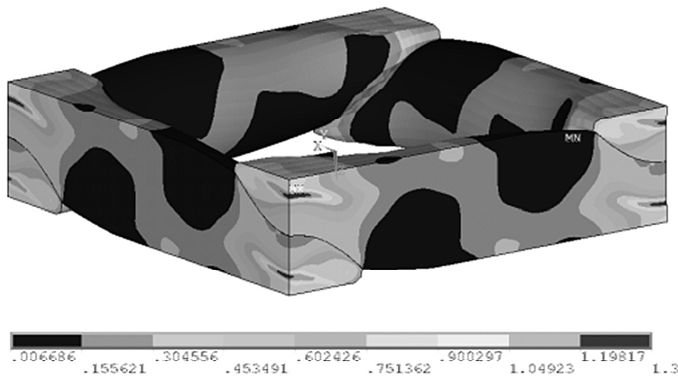


Рис. 6. Распределение эквивалентных пластических деформаций
Fig. 6. Distribution of the equivalent plastic deformations

По результатам расчета была замерена ширина сечения в узле плетения проволок, которая составила 0.77 мм, то есть увеличилась в 1.55 раза, что соответствует экспериментальным данным (рис. 2). Наблюдается высокая неоднородность деформированного состояния, особенно в окрестности сжатого узла плетения. На рис. 7 приведены зависимости силы сжатия на расчетную ячейку сетки от перемещения.

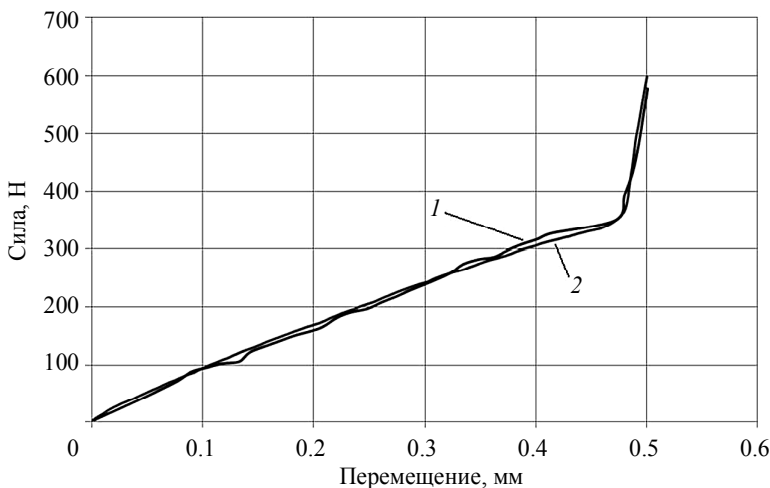


Рис. 7. Зависимость силы от перемещения при сжатии
Fig. 7. Strength as a function of displacement under compression

Зависимость имеет резкий излом, вызванный значительным увеличением площади контакта проволок с обжимающими плоскостями в результате пластического течения материала. Сравнение экспериментальной кривой 1 и кривой, полученной численным моделированием 2, показывает хорошее совпадение результатов, что свидетельствует о достоверности используемой модели. Сравнение результатов моделирования с учетом и без учета трения на контактных поверхностях показало незначительное влияние сил трения.

Численное моделирование третьего этапа на растяжение вдоль оси X проводилось при дополнительных предположениях. Диаграмма упругопластического деформирования с упрочнением (рис. 5) использовалась не для всей длины проволок. Средняя часть проволок подвергалась слабому обжатию, поэтому здесь использовалось линейное продолжение диаграммы деформирования без упрочнения. Кроме того, в середине проволок вводилось линейное возмущение геометрического размера, составляющее 1% от диаметра проволоки. Без этих дополнительных предположений локализация пластических деформаций и образование шейки происходило в окрестности узла плетения. На рис. 8 приведено распределение пластической деформации ϵ_x , которое свидетельствует о локализации пластической деформации в центральных сечениях растягиваемых проволок. Картина деформирования проволоки между узлами качественно соответствует картине, полученной в [10] для цилиндрического образца. Как и в экспериментах, образование шейки и разрушение образца при численном моделировании при дополнительных предположениях происходит между узлами.

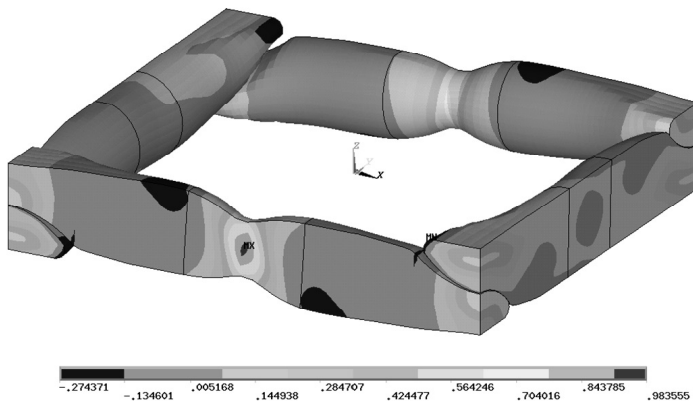


Рис. 8. Распределение пластической деформации ϵ_x при растяжении
Fig. 8. Distribution of the plastic deformation ϵ_x under tension

Для сравнения решалась также задача растяжения необжатой сетки. Результаты численного моделирования необжатой сетки показывают локализацию пластических деформаций и образование шейки, а следовательно, и разрушение в окрестности узла плетения. На рис. 9 приведены кривые «сила – перемещение» на растяжение в плоскости слоя по направлению проволок. Пунктирные кривые 2, 4 – экспериментальные, верхняя пунктирная кривая 2 – с предварительным обжатием по нормали к слою. Кривые 1, 3 получены численным моделированием, кривая 1 – с учетом предварительного обжатия. Поведение численных кривых качественно соответствует поведению экспериментальных. Наблюдается увеличение силы при

растяжении предварительно обжатой сетки. Это увеличение объясняется двумя механизмами. Первый – связан с упрочнением материала в окрестности узла сетки, вызванным сильным его обжатием и развитым пластическим течением. Второй – с тем, что в результате обжатия растягиваемые проволоки находятся преимущественно в сжатом состоянии вдоль оси растяжения. Этот факт подтверждают отрицательные внутренние силы, которые видны на кривой 1 рис. 9 в начале процесса растяжения. Для получения лучшего количественного соответствия требуются дополнительные специальные исследования с применением более адекватной модели поведения материала при сложном нагружении с учетом его поврежденности и изменения его деформационных свойств при больших деформациях [10].

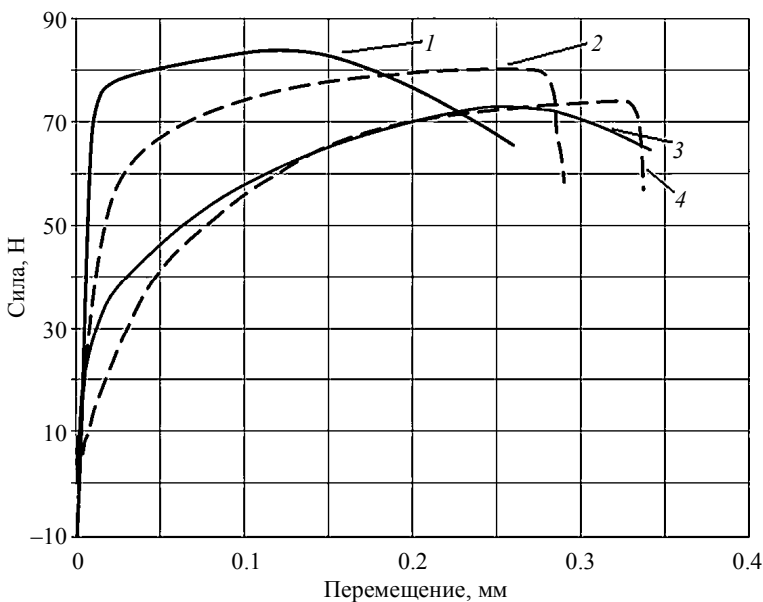


Рис. 9. Кривые растяжения одной проволоки сетки
Fig. 9. Stress-strain curves for a single wire of the grid

Заключение

В результате экспериментальных исследований были получены кривые деформирования одного слоя плетеной металлической сетки при испытаниях на сжатие и растяжение, вплоть до разрушения образца. Экспериментально показан эффект увеличения силы растяжения предварительно обжатого одного слоя плетеной сетки, как и для многослойного пакета. Математическое моделирование деформирования одного слоя плетеной сетки подтверждает эффект увеличения силы при растяжении вдоль линий проволок после предварительного обжатия слоя по нормали. По результатам математического моделирования выявлены два механизма увеличения растягивающей силы. Первый – связан с упрочнением материала в окрестности узла сетки, вызванного сильным его обжатием и развитым пластическим течением. Второй – с тем, что в результате обжатия растягиваемые проволоки находятся преимущественно в сжатом состоянии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Hermann W.* Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials // *J. Appl. Phys.* 1969. V. 40. No. 6.
2. *Гельфанд Б.Е., Сильников М.В.* Фугасные эффекты взрывов. СПб.: Полигон. 2002. 272 с.
3. *Кругликов Б.С., Кутушев А.Г.* Ослабление ударных волн экранирующими решетками // *ФГВ.* 1998. Т. 24. № 1. С. 115–118.
4. *Абакумов А.И. и др.* Численная модель деформирования противоосколочной сетки при взрывном нагружении // *Тр. ВНИИЭФ. Математическое моделирование физических процессов.* 2006. № 10. С. 16–30.
5. *Абузаров М.Х., Глазова Е.Г., Кочетков А.В. и др.* Моделирование взаимодействия ударных волн с деформируемыми газопроницаемыми преградами // *Проблемы прочности и пластичности* – 2010. Вып. 72. С. 120–129.
6. *Глазова Е.Г., Константинов А.Ю., Кочетков А.В., Крылов С.В.* Взрывное нагружение деформируемых газопроницаемых осесимметричных элементов конструкций // *ПМТФ.* № 5. 2016. С. 119–126. DOI: 10.15372 / PMTF20160513.
7. *Горохов А.Н., Казаков Д.А., Кочетков А.В. и др.* Исследование деформационных свойств пакетов плетеных металлических сеток при квазистатическом сжатии и растяжении // *Проблемы прочности и пластичности.* 2014. Т. 76. № 3. С. 251–254.
8. *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.
9. *Брагов А.М., Жегалов Д.В., Константинов А.Ю. и др.* Экспериментальное исследование деформационных свойств пакетов плетеных металлических сеток при динамическом и квазистатическом нагружении // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика.* 2016. № 3. С. 252–262. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.17.
10. *Капустин С.А., Чурилов Ю.А., Горохов В.А.* Моделирование нелинейного деформирования и разрушения конструкций в условиях многофакторных воздействий на основе МКЭ. Н. Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.. 2015. 350 с.

Статья поступила 12.11.2017 г.

Kochetkov A.V., Leont'ev N.V., Modin I.A., Savikhin A.O. (2018) 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]. 52. pp. 53–62

DOI 10.17223/19988621/52/6

Metal grids represented as multilayer packages are used as highly-porous easy-deformable elements to protect pressure vessels of the blasting chambers and other structural components from fragmentation damage and other impulse actions. The package of grids is typically formed by layer stacking with the same directions of the wires providing multilayer package that is considered as a highly-porous deformable structural element with orthotropic properties. As a result of experimental studies, the stress-strain curves were obtained for multilayer packages and single layer of a woven metal grid under compression along the normal to the layer and under tension along the wires up to the sample destruction. Experiments show that the tensile strength of pre-compressed single layer of a woven grid increases which is typical for multilayer packages. Mathematical modeling of the stress-strain of single layer of a woven grid confirms an increase in the tensile strength along the wires after pre-compression along the normal. According to the results of mathematical modeling, two mechanisms providing an increase in the tensile strength are revealed. The first is related to material hardening in the vicinity of grid node caused by strong compression and developed plastic flow. The second is a reason of compression of the tensed wires which are preferably in a compressed state and the addition strength is needed for their tension.

Keywords: woven grid, orthotropy, elastoplastic compression, tension, destruction, experiment, numerical simulation.

KOCHETKOV Anatoliy Vasil'evich (Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Nizhny Novgorod, Russian Federation). E-mail: kochetkov@mech.unn.ru)

LEONT'EV Nikolay Vasil'evich (Candidate of Technical Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation). E-mail: tam015@mail.ru)

MODIN Ivan Alexandrovich (Nizhny Novgorod, Russian Federation). E-mail: mianet@mail.ru)

SAVIKHIN Andrey Olegovich (Candidate of Physics and Mathematics, Nizhny Novgorod, Russian Federation). E-mail: andrey-savikhin@yandex.ru)

REFERENCES

1. Hermann W. (1969) Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials. *J. Appl. Phys.* 40(6). DOI: 10.1063/1.1658021.
2. Gelfand B.E., Silnikov M.V. (2002) *Fugasnye efekty vzryvov* [High-explosive effects of explosions]. St. Petersburg: Polygon.
3. Kruglikov B.S., Kutushev A.G. (1998) Oslablenie udarnykh voln ekraniruyushchimi reshetkami [Attenuation of shock waves by screening gratings]. *Journal of Combustion, Explosion, and Shock Waves.* 24(1). pp. 115–118.
4. Abakumov A.I. et al. (2006) Chislennaya model' deformirovaniya protivoookolnoy setki pri vzryvnom nagruzhении [Numerical model of the deformation of anti-shatter grid under explosive loading]. *Proc. Russian Federal Nuclear Center. Mathematical Modeling of Physical Processes.* 10. pp. 16–30.
5. Abuzyarov M.Kh., Glazova E.G., Kochetkov A.V. et al. (2010) Modelirovanie vzaimodeystviya udarnykh voln s deformiruemyimi gazopronitsaemyimi pregradami [Simulation of the interaction of shock waves with deformable gas-permeable barriers]. *Problems of Strength and Plasticity.* 72. pp. 120–129.
6. Glazova E.G., Konstantinov A.Yu., Kochetkov A.V., Krylov S.V. (2016) Vzryvnoe nagruzhenie deformiruemykh gazopronitsaemykh osesimmetrichnykh elementov konstruksii [Explosive loading of deformable gas-permeable axisymmetric structural elements]. *PMTF.* 5. pp. 119–126. DOI: 10.15372/PMTF20160513.
7. Gorokhov A.N., Kazakov D.A., Kochetkov A.V. et al. (2014) Issledovanie deformatsionnykh svoystv paketov pletenykh metallicheskiykh setok pri kvazistaticheskom szhatii i rastyazhenii [Investigation of the deformation properties of woven metal grid packages under quasi-static compression and tension]. *Problems of Strength and Plasticity.* 73(3). pp. 251–256.
8. Kochetkov A.V., Leontyev N.V., Modin I.A. (2017) Eksperimental'no-chislennoe issledovanie deformirovaniya metallicheskiykh pletenykh setok pri kvazistaticheskom nagruzhении [Experimental and numerical investigation of the deformation of metallic woven grids under quasi-static loading]. *Problems of strength and plasticity.* 79(1). pp. 104–113.
9. Bragov A.M., Zhegalov D.V., Konstantinov A.Yu., Kochetkov A.V., Modin I.A., Savikhin A.O. (2016) Eksperimental'noe issledovanie deformatsionnykh kharakteristik paketov pletenykh metallicheskiykh setok pri dinamicheskom i kvazistaticheskom nagruzhении [Experimental study of the stress-strain properties of woven metal grid packages under dynamic and quasi-static loading]. *PNRPU Mechanics bulletin.* 3. pp. 252–262. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.17
10. Kapustin S.A., Churilov Yu.A., Gorokhov V.A. (2015) *Modelirovanie nelineynogo deformirovaniya i razrusheniya konstruksiy v usloviyakh mnogofaktornykh vozdeystviy na osnove MKE* [Modeling of non-linear deformation and destruction of the structures under multifactor effects on the basis of the finite-element method]. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky.