

УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕТЕННЫХ СЕТОК ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ*

© 2017 г. Кочетков А.В.¹, Леонтьев Н.В.², Модин И.А.¹

¹Научно-исследовательский институт механики
Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация
²Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

kochetkov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 09.12.2016

Приведены результаты экспериментальных исследований на растяжение газопроницаемых пакетов из металлических плетеных сеток, формируемых путем свободного наложения слоев друг на друга с сохранением направлений проволок.

Существенное влияние на деформационные характеристики сеток оказывает их предварительное обжатие по нормали к слоям сеток, при этом происходит увеличение силы на растяжение предварительно обжатого пакета. Этот эффект наблюдался и для одного слоя сетки. С целью выявления механизма увеличения силы произведено численное моделирование обжатия и растяжения одного слоя сетки в трехмерной постановке. По результатам численного моделирования выявлено, что в сечениях проволок предварительно обжатых сеток присутствуют обширные области остаточных сжимающих напряжений, которые приводят к увеличению силы при растяжении образца в плоскости слоя.

Ключевые слова: плетеная сетка, ортотропия, статическое сжатие, растяжение, нелинейность, упругопластичность, численное моделирование, эксперимент, контакт, метод конечных элементов.

Введение

Многослойные пакеты из металлических плетеных сеток являются перспективным демпфирующим элементом, защищающим конструкции от ударных и взрывных воздействий [1–5]. Пакет сеток конструктивно формируется путем наложения слоев друг на друга с сохранением направлений двух семейств нитей, поэтому пакет можно считать высокопористой деформируемой средой, обладающей ортотроп-

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (гранты №16-08-00458а, №15-48-02333р_поволжье_a) и Минобрнауки РФ (госзадание 9.7057.2017/БЧ в части численных исследований).

ными свойствами. Как показано в [6], пакет сопротивляется сжатию по нормали к слоям сеток и растяжению вдоль нитей в плоскости сеток. В [7, 8] приведены результаты экспериментальных исследований, в которых выявлена существенная зависимость степени предварительного обжатия по нормали к слоям сеток на деформационные характеристики при растяжении сетки вдоль нитей. С целью выявления причин этого эффекта проведены экспериментальные и численные исследования сжатия и последующего растяжения одного слоя сетки.

1. Экспериментальные исследования деформирования плетеных сеток

Экспериментальные исследования статического упругопластического деформирования ортотропных многослойных пакетов из плетеной металлической сетки [7, 8] проводились на экспериментальной машине Zwick Z030 [9]. Образцы были изготовлены из сетки НУ ГОСТ 3826-82. Размер ячейки $l = 2$ мм, диаметр проволоки $d = 0,5$ мм (рис. 1). Размеры образца: 110 мм по длине и 20 мм по ширине.

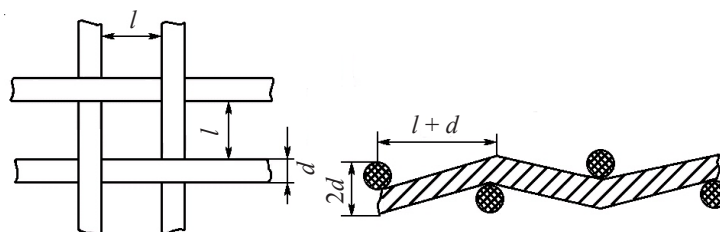


Рис. 1. Металлическая сетка тканого плетения

Экспериментальные исследования на растяжение были проведены при длине рабочей части образца 14 мм. Образцы, предварительно статически обжатые по нормали к слоям, подвергались растяжению вдоль нитей в плоскости слоев. На рис. 2 показаны характерные кривые при разных уровнях статического обжатия: 1 – $\sigma_{сж} = 0$ (без обжатия), 2 – $\sigma_{сж} = 5$ МПа, 3 – $\sigma_{сж} = 25$ МПа, 4 – $\sigma_{сж} = 50$ МПа, 5 – $\sigma_{сж} = 150$ МПа. Пакеты сеток проявляют при растяжении нелинейные свойства и испытывают необратимые деформации. Наблюдается своеобразный эффект «упрочнения» – по мере возрастания уровня статического обжатия растут силы, необходимые для растяжения образца.

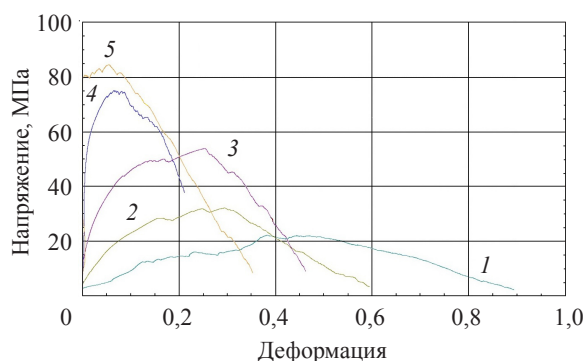


Рис. 2. Диаграммы статического растяжения вдоль проволок сетки

Для исследования выявленного эффекта упрочнения проведены эксперименты на одном слое металлической сетки. Исследовались образцы тех же размеров, что и для многослойных пакетов. Слой предварительно обжимался по нормали, разгружался, затем растягивался по направлению нитей. Обжатие проводилось до размеров: $0,5h$, $0,3h$, где $h = 2d$ – начальная толщина слоя. Кривые деформирования на растяжение «сила–перемещение» показаны на рис. 3, кривая h соответствует растяжению без обжатия. На ширину образца принятого размера приходилось 8 проволок по направлению растяжения.

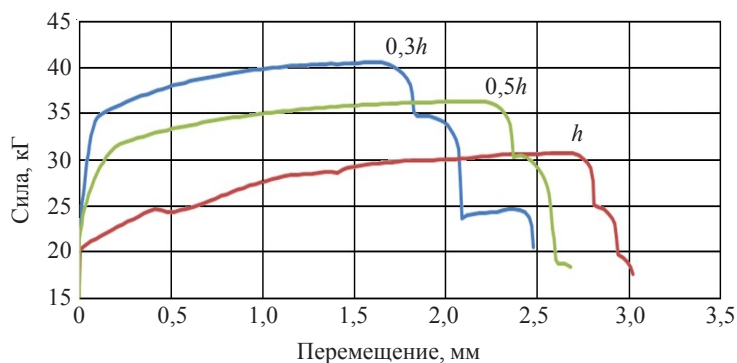


Рис. 3. Кривые статического растяжения одного слоя сетки

После предварительного обжатия был рассмотрен под микроскопом узел плетения (рис. 4). Наблюдаются большие формоизменения и деформации проволок в окрестности узла. В результате обжатия ширина проволоки увеличилась в 1,5 раза (рис. 4а), а толщина уменьшилась в 2 раза (рис. 4б) от начального диаметра.

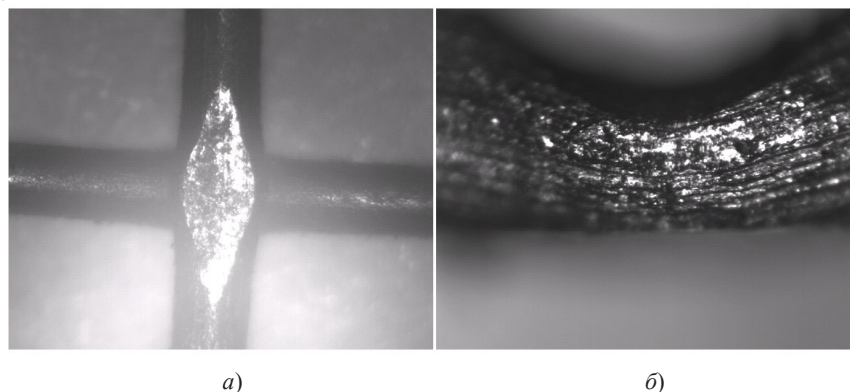


Рис. 4. Деформированный узел плетения под микроскопом

2. Численное моделирование

С целью выявления причин, вызывающих эффект упрочнения предварительно обжатых сеток при растяжении, проведено численное моделирование процессов деформирования. Моделирование проводилось в вычислительной системе ANSYS v17.2 методом конечных элементов. Для моделирования была выбрана типовая ячейка плетеной сетки (рис. 5). Расчетная область состоит из четырех трехмерных тел (проволок). В силу симметрии берется половина сечения проволок. На торцах про-

волокон выполняются условия симметрии. В начальный момент времени напряжения и деформации отсутствуют. В задаче использовался алгоритм расчета идеального симметричного контакта тел без трения, когда в каждой контактной области рассматриваются две контактные пары. Сжатие проводилось парой абсолютно жестких плоскостей, движущихся в направлении оси Z симметрично навстречу друг другу. Выбран вариант сжатия до половины начальной толщины слоя (до одного диаметра проволоки $d = 0,5h$). Весь процесс нагружения был разбит на три этапа:

- 1) обжатие сетки перпендикулярно плоскости слоя вдоль оси Z ,
- 2) снятие нагрузки с обжатого образца,
- 3) растяжение по направлению нитей вдоль оси X в плоскости сетки движением боковых плоскостей симметрии аналогично обжатию.

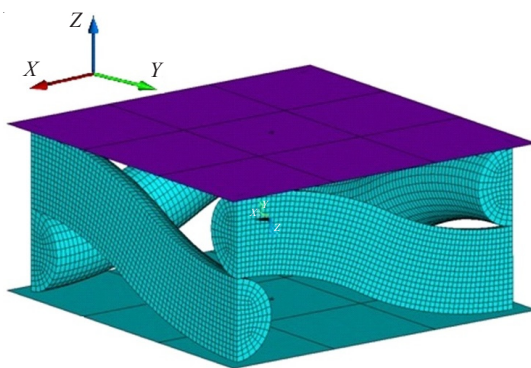


Рис. 5. Расчетная модель

Геометрическая модель проволоки получена вытягиванием полукруглого сечения вдоль оси. Ось проволоки состоит из двух сопряженных дуг окружности. Для построения конечно-элементной модели использовался двадцатиузловой конечный элемент второго порядка SOLID185 с сокращенным ($2 \times 2 \times 2$) интегрированием. Модель каждой из проволок состоит из 6144 элементов, всего 24576 элементов. Общее количество неизвестных составило 321660. Для описания поведения материала использовалась мультилинейная модель пластичности с изотропным упрочнением. Для получения более достоверных результатов расчетов использовалась полученная авторами экспериментально диаграмма деформирования, соответствующая материалу сталь 3, из которого изготовлена сетка (рис. 6).

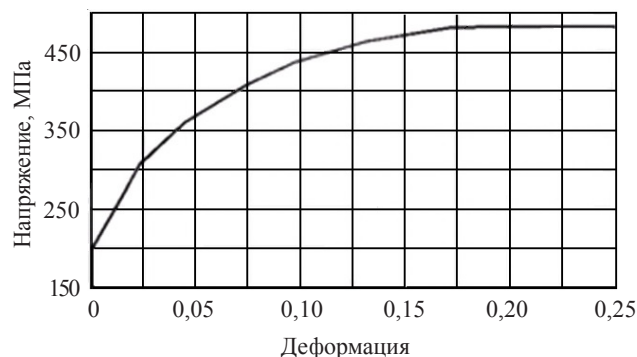


Рис. 6. Диаграмма деформирования материала

Первый этап моделирования (сжатие) был реализован за 200 шагов без изменения величины шага. Это обусловлено необходимостью уменьшить искажения формы конечных элементов при большом формоизменении. 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 восьми ядрах вычислительного кластера. Время, затраченное на решение, составило около 8 часов. На рис. 7 и 8 приведено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу и эквивалентных пластических деформаций после первого этапа.

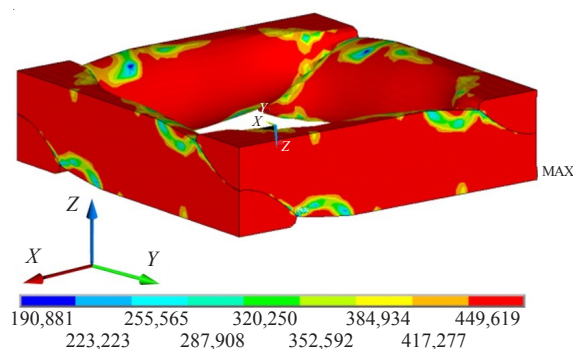


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений после обжатия

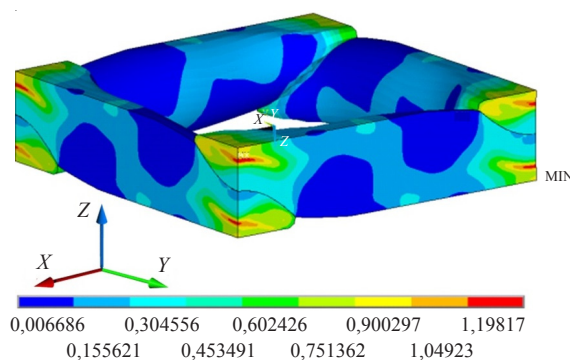


Рис. 8. Распределение эквивалентных пластических деформаций

По результатам расчета была замерена ширина сечения в узле плетения проволоки, которая составила 0,77 мм, то есть увеличилась в 1,55 раза, что соответствует экспериментальным данным (см. рис. 4). Наблюдается высокая неоднородность напряженно-деформированного состояния, особенно в окрестности сжатого узла плетения. Значения эквивалентных пластических деформаций достигают 1,35. На рис. 9 приведены зависимости силы сжатия, действующей на расчетную ячейку сетки, от перемещения. Зависимость имеет резкий излом, вызванный значительным увеличением площади контакта проволок с обжимающими плоскостями в результате пластического течения материала. Красная экспериментальная кривая практически совпадает с синей кривой, полученной численным моделированием, что свидетельствует о достоверности используемых математической и численной моделей.

На рис. 10 приведено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу

после второго этапа нагружения (разгрузка после сжатия). Увеличилась неоднородность распределения остаточных напряжений.

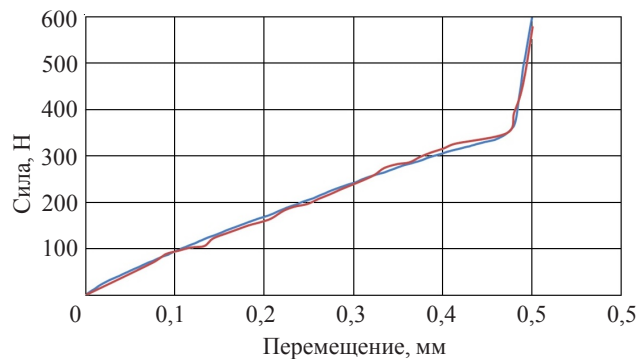


Рис. 9. Зависимость силы, действующей на расчетную ячейку, от перемещения

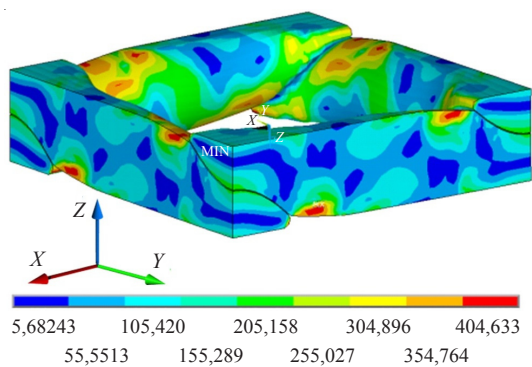


Рис. 10. Распределение эквивалентных напряжений после разгрузки

На рис. 11 показано распределение эквивалентных напряжений по Мизесу при растяжении сетки в направлении оси X . Усилилась неоднородность распределения эквивалентных напряжений. Распределение эквивалентных пластических деформаций изменилось в меньшей степени.

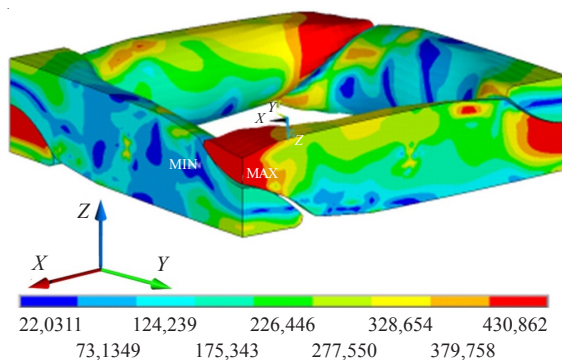


Рис. 11. Распределение эквивалентных напряжений после растяжения

Кроме моделирования растяжения предварительно обжатого слоя проволоки, были получены результаты расчетов растяжения сетки без обжатия. На рис. 12 и

рис. 13 показаны распределения эквивалентных напряжений по Мизесу и эквивалентных пластических деформаций при растяжении сетки в направлении оси X . По сравнению с предварительно обжатой сеткой (см. рис. 11 и рис. 8) напряженно-деформированное состояние необжатых проволок отличается в значительной мере, особенно это видно на распределении эквивалентных пластических деформаций. Вмятины небольшого размера образуются на растягиваемых проволоках, ориентированных вдоль оси X , в месте пересечения проволок.

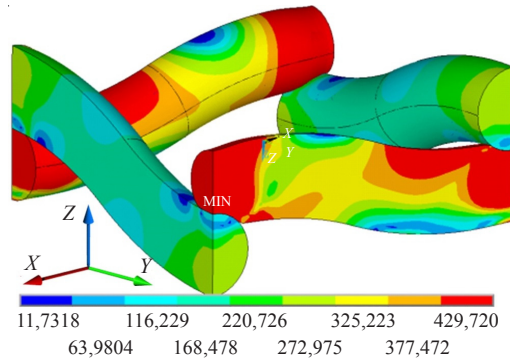


Рис. 12. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу

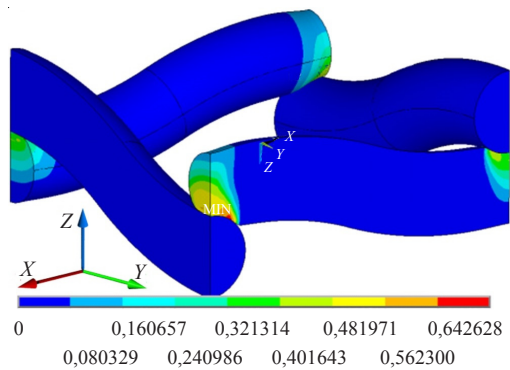


Рис. 13. Распределение эквивалентных пластических деформаций

На рис. 14 приведены распределения напряжений σ_x и σ_0 в одной из проволок, ориентированных вдоль оси X , после второго этапа нагружения.

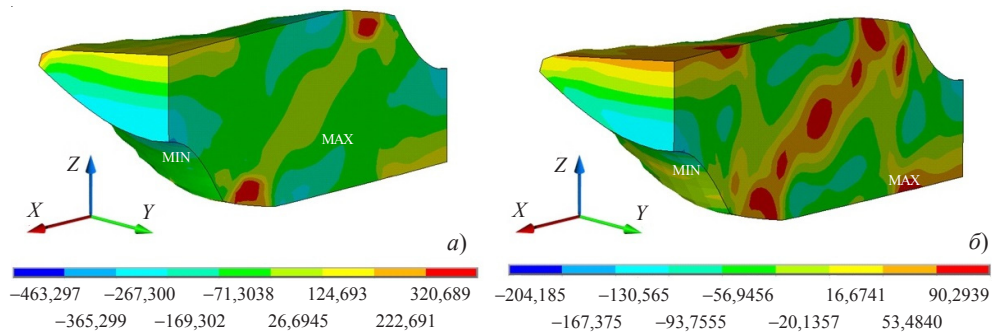


Рис. 14. Распределение напряжений в проволоке, ориентированной вдоль оси X (a – напряжение σ_x , $б$ – среднее напряжение σ_0)

Наблюдается преимущественно сжатое состояние этих проволок. Поэтому для их растяжения требуются дополнительные внешние силы, о чем свидетельствуют расчетные интегральные силы в граничных сечениях растягиваемых проволок, графики изменения которых показаны на рис. 15, где красная сплошная кривая соответствует предварительно обжатому образцу, а кривая синего цвета – образцу без обжатия. Красная штриховая кривая соответствует обжатому образцу после второго этапа нагружения.

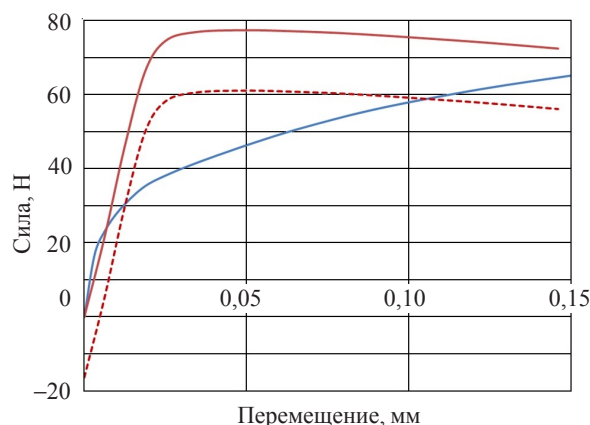


Рис. 15. Внутренние силы в граничных сечениях растягиваемых проволок

Поведение численных кривых качественно соответствует поведению экспериментальных (см. рис. 3). Наблюдается увеличение силы при растяжении предварительно обжатой сетки. Для получения количественного соответствия требуются дополнительные исследования с применением более адекватной модели упругопластического поведения материала при сложном нагружении.

Заключение

Математическое моделирование деформирования одного слоя плетеной сетки подтверждает эффект упрочнения слоя при растяжении после предварительного обжатия слоя по нормали. По результатам математического моделирования выявлен механизм упрочнения, который заключается в образовании зон сжатия в проволоках, которые затем подвергаются растяжению, что и заставляет увеличиваться растягивающую внешнюю силу.

Для моделирования использовался ANSYS v.17.2. Лицензия ANSYS Academic Research, Customer #623640.

Список литературы

1. Кругликов Б.С., Кутушев А.Г. Ослабление ударных волн экранирующими решетками. *Физика горения и взрыва*. 1988. Т. 24. №1. С. 115–118.
2. Абакумов А.И. и др. Численная модель деформирования противоосколочной сетки при взрывном нагружении. *Тр. ВНИИЭФ. Математическое моделирование физических процессов*. 2006. №10. С. 16–30.
3. Абузаров 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.
4. Глазова Е.Г., Константинов А.Ю., Кочетков А.В., Крылов С.В. Взрывное нагружение

деформируемых газопроницаемых осесимметричных элементов конструкций. *ПМТФ*. Т. 57. №5. 2016. С. 119–126. DOI: 10.15372/PMTF20160513.

5. Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Крылов С.В., Турьгина И.А. Численное моделирование взаимодействия ударных волн с проницаемыми деформируемыми многослойными пакетами плетеных сеток. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №1. С. 81–91.

6. 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. Вып. 76. Ч. 3. С. 251–255.

7. Брагов А.М., Жегалов Д.В., Константинов А.Ю., Кочетков А.В., Модин И.А., Савихин А.О. Экспериментальное исследование деформационных характеристик пакетов плетеных металлических сеток при динамическом и квазистатическом нагружении. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2016. №3. С. 252–262.

8. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Кочетков А.В., Модин И.А. Экспериментальное исследование динамических и квазистатических деформационных свойств пакетов плетеных сеток. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №3. С. 245–251.

9. Волков И.А., Казаков Д.А., Коротких Ю.Г., Волков А.И. Методика определения параметров уравнений механики поврежденной среды при усталости и ползучести. *Прикладная механика и технологии машиностроения*. 2012. №2(21). С. 7–24.

References

1. Kruglikov B.S., Kutushev A.G. Oslablenie udarnykh voln ekraniruyushchimi reshetkami [Attenuation of shock waves louvers]. *Fizika goreniya i vzryva* [Combustion, Explosion and Shock Waves]. 1988. Vol. 24. No 1. P. 115–118 (In Russian).

2. Abakumov A.I. et al. Chislennaya model' deformirovaniya protivoooskolochnoy setki pri vzryvnom nagruzhenii [Numerical model of anti-shatter deformation grid under explosive loading]. *Trudy VNIIEF. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov* [Proceedings Russian Federal Nuclear Center. Mathematical Modeling of Physical Processes]. 2006. No 10. P. 16–30 (In Russian).

3. Abuziarov M.H., Glazova E.G., Kochetkov A.V., Krylov C.V., Romanov V.I., Syrunin M.A. Modelirovanie vzaimodeystviya udarnykh voln s deformiruemyimi gazopronitsaemyimi pregradami [Modeling of shock waves interaction with deformable gas-permeable barriers]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2010. Iss. 72. P. 120–129 (In Russian).

4. Glazova E.G., Konstantinov A.Yu., Kochetkov A.V., Krylov C.V. Vzryvnoe nagruzhenie deformiruemykh gazopronitsaemykh osesimmetrichnykh elementov konstruktsiy [Explosive loading of deformable gas-permeable axisymmetric structural elements]. *Prikladnaya matematika i tekhnicheskaya fizika* [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]. 2016. Vol. 57. No 5. P. 119–126. DOI: 10.15372/PMTF20160513 (In Russian).

5. Glazova E.G., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Turygina I.A. Chislennoe modelirovanie vzaimodeystviya udarnykh voln s pronitsaemyimi deformiruemyimi mnogoslownymi paketami pletenykh setok [Numerical modeling of shock waves interaction with deformable permeable multilayers barriers of woven grids]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2016. Vol. 78. No 1. P. 81–91 (In Russian).

6. Gorokhov A.N., Kazakov D.A., Kochetkov A.V., Modin I.A., Romanov V.I. Issledovanie deformatsionnykh svoystv paketov pletenykh metallicheskih setok pri kvazistaticheskom 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. Iss. 76. Pt. 3. P. 251–255 (In Russian).

7. Bragov A.M., Zhegalov D.V., Konstantinov A.Yu., Kochetkov A.V., Modin I.A., Savi-khin A.O. Eksperimental'noe issledovanie deformatsionnykh kharakteristik paketov pletenykh metallicheskih 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 PNIPI. Mekhanika* [PNRPU Mechanics Bulletin]. 2016. No 3. P. 252–262 (In Russian).

8. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Kochetkov A.V., Modin I.A. Eksperimental'noe issledovanie dinamicheskikh i kvazistaticheskikh deformatsionnykh svoystv paketov pletenykh

setok [Experimentally investigating dynamic deformational and strength properties of woven grid packages]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2016. Vol. 78. No 3. P. 245–251 (In Russian).

9. Volkov I.A., Kazakov D.A., Korotkikh Yu.G., Volkov A.I. Metodika opredeleniya parametrov uravneniy mekhaniki povrezhdennoy sredy pri ustalosti i polzuchesti [Method for determining the parameters of the equations of mechanics damaged environment for fatigue and creep]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnologii mashinostroeniya* [Applied Mechanics and Mechanical Engineering]. 2012. No 2(21). P. 7–24 (In Russian).

THE EXPERIMENTAL-NUMERICAL ANALYSIS OF DEFORMATION OF METALLIC WOVEN GRIDS UNDER QUASI-STATIC LOADING

Kochetkov A.V.¹, Leontyev N.V.², Modin I.A.¹

¹*Research Institute of Mechanics University of Nizhni Novgorod,
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

²*Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod,
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

The results are presented of experimentally investigating tension of gas-impermeable packages of woven metal grids formed by freely stacking up grid layers, maintaining the orientation of the wires.

The results of experimentally studying tension of grid packages in the direction of wires show that their pre-cogging normally to the grid layers produces a considerable effect – it increases the tensile strength of the pre-cogged package. This effect can be observed even in a single grid layer. To identify the mechanism of this increase, cogging and tension of a single grid layer is numerically modeled in a 3D-formulation. Based on the results of numerical modeling it is found out that in the cross-sections of the wires large zones of residual compression stresses are present, which result in increasing the tensile strength of the specimen in the layer plane.

Keywords: woven grid, orthotropy, static compression, tension, non-linearity, elasto-plasticity, numerical modeling, experiment, contact, finite element method.