

- С. 155-163. doi.org/10.29295/2311-7257-2018-93-3-155-163
13. Мірошніков В.Ю., Олешкевич С.В., Савін О.Б., Медведєва А.В. Змішана задача теорії пружності для півпростору з циліндричними порожнинами та деякими крайовими умовами контактного типу. *Науковий вісник будівництва*. 2018. Том 94, №4. С. 82-94. doi.org/10.29295/2311-7257-2018-94-4-82-94
14. Protsenko V., Miroshnikov V. Investigating a problem from the theory of elasticity for a half-space with cylindrical cavities for which boundary conditions of contact type are assigned. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied mechanics*. 2018. Vol. 4. №7. P. 43-50. doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139567
15. Мірошніков В.Ю. Дослідження другої основної задачі теорії пружності для шару з циліндричною порожниною. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2019. № 102. С. 77- 90.
16. Николаев, А.Г., Танчик Е. А. Распределение напряжений в ячейке однонаправленного композиционного материала, образованного четырьмя цилиндрическими волокнами. *Вісник Одеського національного університету. Математика. Механіка*. 2013. Т.18. Вип. 4(20). С. 101–111.

**Мирошников В.Ю. СМЕШАННАЯ ЗАДАЧА ТЕОРИИ УПРУГОСТИ ДЛЯ СЛОЯ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ВКЛЮЧЕНИЕМ.** Решена пространственная задача теории упругости для слоя с бесконечным круглым цилиндрическим включением. На верхней границе слоя заданы напряжения, на

нижней - перемещения. Цилиндрическое упругое включение расположено параллельно границам слоя и жестко с ним сцеплено. Решение пространственной задачи получено обобщенным методом Фурье, относительно системы уравнений Ламе. К полученным бесконечным системам линейных алгебраических уравнений применен метод редукции. В результате определены перемещения и напряжения в упругом теле. Проведен анализ напряженного состояния слоя при жестком закреплении его нижней границы и заданных касательных нагрузках на верхней границе.

**Ключевые слова:** композит, цилиндрическое включение в слое, обобщенный метод Фурье.

**Miroshnikov V.Yu. A MIXED PROBLEM OF THE THEORY OF ELASTICITY FOR A CYLINDRICAL INCLUSION LAYER.** The spatial problem of the theory of elasticity is solved for a layer with an infinite circular cylindrical inclusion. Stresses are set at the upper boundary of the layer, and displacements at the bottom. The cylindrical elastic inclusion is located parallel to the boundaries of the layer and rigidly coupled with it. The solution of the spatial problem is obtained by the generalized Fourier method, with respect to the Lamé system of equations. The reduction method is applied to the obtained infinite systems of linear algebraic equations. As a result, displacements and stresses in an elastic body are determined. The analysis of the stress state of a layer with rigid fixing of its lower boundary and given tangential loads at the upper boundary is carried out.

**Key words:** composite, cylindrical inclusion in a layer, generalized Fourier method.

DOI: 10.29295/2311-7257-2019-96-2-252-257

УДК 624.01

**Солодовник Ю.Ю., Рюмина Е.А., Рюмин В.В., Яровий Ю. Н.**

*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры*  
(вул. Сумська, 40, Харків, 61002, Україна; e-mail: solladesign@gmail.com, [e.a.perepelica@gmail.com](mailto:e.a.perepelica@gmail.com),  
[luger09par@yahoo.com](mailto:luger09par@yahoo.com), [y.n.yarov@gmail.com](mailto:y.n.yarov@gmail.com); orcid.org/0000-0002-5243-9993, orcid.org/0000-0002-0574-0038, orcid.org/0000-0001-8884-589X, orcid.org/0000-0003-0633-424X)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СТОЕК ПАЛЛЕТНЫХ СТЕЛЛАЖЕЙ

В статье приведены результаты натурных испытаний и численного моделирования работы, коротких стоек паллетных стеллажей. По результатам исследований сделан вывод о механизме перехода в предельное состояние короткого образца стойки паллетного стеллажа. Результаты исследований

могут быть использованы для оценки влияния таких факторов, как перфорация и местная потеря устойчивости при сжатии короткой стойки

**Ключевые слова:** короткие стойки, стеллажи, несущая способность, местная потеря устойчивости.

**Введение.** Использование холодногнутых профилей приобретает все большую востребованность в строительной практике. Это обусловлено следующими причинами:

1. Низкая стоимость по сравнению со сварными и горячекатанными аналогами
2. Возможность применения в широком спектре строительных конструкций
3. Достижениями в области проектирования конструкций из холодногнутого профиля, которые нашли свое отражение в соответствующих нормативных документах [1-7].

Важнейшей конструкцией, при изготовлении которой используются холодногнутые профили является стеллажная система (рисунок 1), используемая, например, для хранения товаров и изделий различного назначения в помещениях супер- и гипермаркетов, складов, моллов. Распространению стеллажных систем способствует стремление к рациональному использованию торговых и складских помещений.

С целью всестороннего изучения особенностей работы холодногнутого профиля в конструкциях стеллажей проводится широкий объем научно-исследовательских работ, посвященных изучению и выявлению фактической работы стеллажных систем и их элементов [8-10].

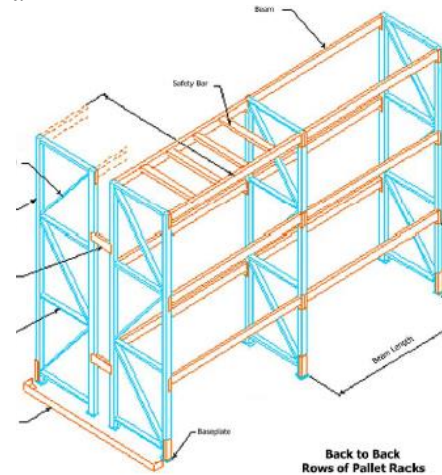
Элементы стеллажных систем (стойки, балки) как правило, имеют сборочные отверстия различной конфигурации, которые увеличивают чувствительность поперечного сечения к потере местной устойчивости от действия внутренних усилий. Форма перфорации поперечного сечения зависит от возможностей изготовителя стеллажных систем.

Целью данной работы являлось исследование влияния перфорации на переход в предельное состояние коротких стоек. Программа исследований включала в себя экспериментальную часть, а также численные исследования с

использованием комплекса конечноэлементного анализа общего назначения



а



б

Рис. 1. Типовая стеллажная система (а); схема стеллажной системы (б) [2].

**Определение характеристик механических свойств стали.** Механические испытания осуществлялись в соответствии с требованиями [11,12]. Испытание плоских образцов на растяжение осуществлялось с использованием испытательной машины УИМ-50 [13] (рис. 2-4).

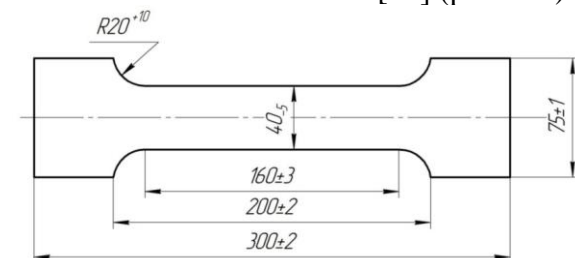


Рис. 2. Размеры плоского образца



Рис. 3. Схема испытания образцов

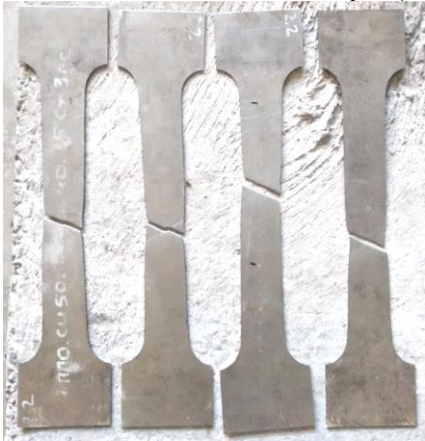


Рис. 4. Образцы после испытаний

Обработка результатов определения физико-механических характеристик стали выполнена в соответствии с [14]. Установлены характеристические значения сопротивлений  $R_{yt}$  и  $R_{lt}$  в соответствии с фактическим значением границ текучести  $\sigma_t$  и временного сопротивления  $\sigma_v$ .

Полученные значения сопоставлены со значениями, приведенными в [15].

По данным результатов испытаний партий был сделан вывод о том, что материалом стоек является сталь Ст08кп, Ст3пс, 350GD EN 10346:2015. Результаты

механических испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты механических испытаний стальных образцов

№ п/п	Маркировка	Марка материала	Начальная ширина и толщина образца $b_0, h_0$ , мм	Начальная площадь поперечного сечения $F_0$ , см <sup>2</sup>	Начальная расчетная длина, $l_0$ , мм	Конечная расчетная длина, $l_k$ , мм	Максимальное усилие $R_{max}$ , кгс	Усилие при пределе текучести $R_p, R_{p0.2}$ , кгс	Временное сопротивление $\sigma_v$ , кгс/см <sup>2</sup>	Предел текучести $\sigma_t, \sigma_{t0.2}$ , кгс/см <sup>2</sup>	Относительное удлинение $\delta$ , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.2 /1	ППО СН30	Ст 08кп	38,5×1,2	0,462	100	-	1620	1020	3506	2208	-
3.2 /1	ППО СН170	Ст3пс	38,0×1,5	0,570	100	117	2480	1680	4351	2947	17
13.2/1	ППО СН11	350G D	38,5×2,0	0,770	100	126,5	4060	-	5273	-	26,5

Для проведения численных исследований прочностные характеристики материала были представлены в виде истинных значений с использованием зависимостей:

$$\sigma_{ист} = \sigma(1 + \epsilon)$$

$$\epsilon_{ист} = \ln(1 + \epsilon)$$

**Испытание коротких стоек.** Испытание коротких стоек на сжатие проводилось в соответствии с требованиями [1]. Для испытаний применены образцы длиной приблизительно в три раза превышающей наибольшую ширину поперечного сечения, включающие не менее пяти отверстий перфорации. Осевая нагрузка приложена к стойкам через нагружающие пластины толщиной 30 мм, имеющие с одной стороны прорезь для фиксации профиля, а с другой – выемку для установки стального шарика. Исходное положение шарика соответствует центру тяжести поперечного сечения стойки. Испытания проведены на универсальной испытательной машине УИМ-50 (рис. 5). Образцы в испытательной машине нагружались осевой нагрузкой, передаваемой через стальные шарики, установленные с обеих сторон. Нагрузка увеличивалась до момента потери устойчивости образцом и отсутствия у него возможности воспринимать дальнейшую нагрузку. Данное значение нагрузки фиксировалось как критическая нагрузка. Результаты испытаний приведены в табл. 2.



Рис. 5. Испытание короткой стойки

Таблица 2 – Результаты испытаний коротких стоек

№ п/п	Фактическая критическая нагрузка $R_{cr}$ , кгс	Измеренный предел текучести $f_y$ , кг/см <sup>2</sup>	Номинальный предел текучести $f_n$ , Н/мм <sup>2</sup>	Исправленная критическая нагрузка $R_{cr}$ , кгс	Среднее значение исправленных критических нагрузок, $R_{cr}$ , кгс	Стандартное отклонение откорректированных результатов испытаний, s	Характерное значение критической нагрузки, $R_{ch}$ , кгс	Эффективная площадь поперечного сечения, $A_{ef}$ , см <sup>2</sup>	Фактическая площадь поперечного сечения без учета перфорации, $A_{fs}$ , см <sup>2</sup>
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4/1	11450			9414					
4/2	11250	3037	245	9250	9359	94,7	9040	3,62	4,370
4/3	11450			9414					
5/1	14300			11757					
5/2	14550	3037	245	11963	12141	497,5	10464	4,19	5,843
5/3	15450			12703					

В результате испытаний получены значения эффективных площадей поперечных сечений стоек различных типоразмеров. Эффективные площади, полученные в результате проведения эксперимента, сопоставлены с теоретическими значениями.

**Численные исследования моделей коротких стоек.** Численные исследования проведены с использованием программного комплекса анализа общего назначения. Конечноэлементная модель стойки (рисунок 6) создана с использованием элемента SHELL181. В соответствии с [16] данный тип элемента применим при анализе напряженно деформированного состояния тонких оболочек, испытывающих значительные деформации в процессе нагружения.

Характер поведения материала описан диаграммой, представленной на рисунке 7 (пластичность при мультилинейном кинематическом упрочнении).

Нагрузка прикладывалась пошагово, с фиксацией результатов после каждого шага нагружения. Значение внешней нагрузки принято по данным механических испытаний.

Исчерпание несущей способности короткой стойки в процессе испытаний на сжатие происходило в результате потери местной устойчивости пояса (рисунок 8). Результаты расчета численных моделей показали аналогичную картину исчерпания несущей способности (рис. 9-10).

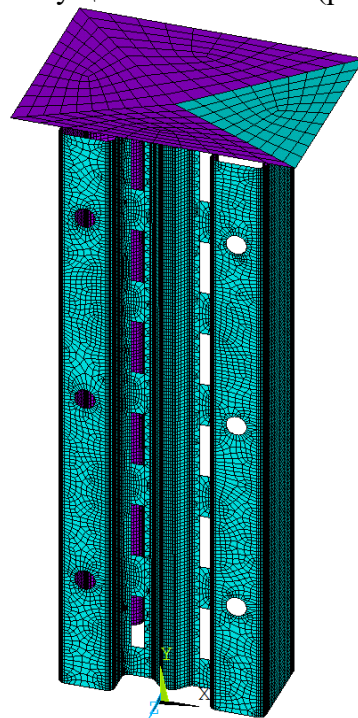


Рис. 6. Общий вид конечноэлементной модели

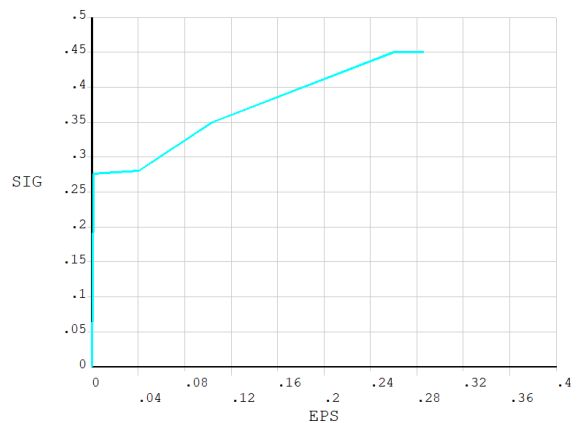


Рис. 7. График работы материала, принятый для проведения численных исследований



Рис. 8. Образец после испытаний



Рис. 9. Общие деформации модели

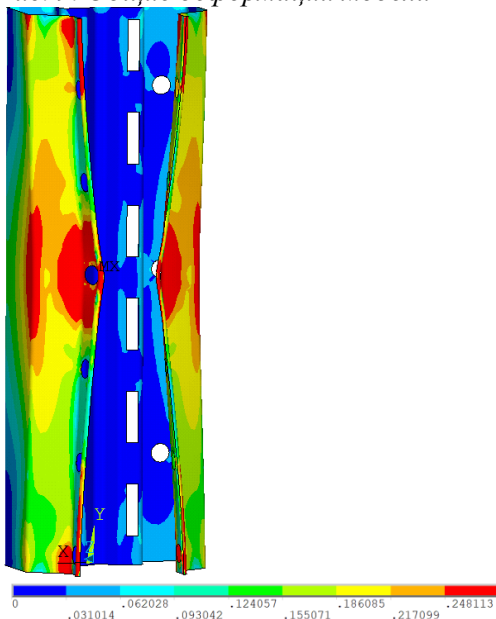


Рис. 10. Распределение эквивалентных (по Мизесу) напряжений

Предельная нагрузка на шаге нагружения численной модели составила  $F=121\text{кН}$  (12100кгс).

Фактическая критическая нагрузка по результатам натурных испытаний находится в интервале значений 143 – 154кН (14300 – 15400кгс), а с учетом поправки к разрушающей нагрузке, определенной в соответствии с указаниями [1] составляет 117.57 – 127.03кН (11757 – 12703 кгс). Различие между фактическим и исправленным значением критической нагрузки объясняется разбросом значений предела текучести и толщинах испытуемого образца.

**Выводы.** В ходе проведенных испытаний коротких стоек паллетных стеллажей получены значения критических нагрузок для стоек различных типоразмеров и сталей. Как натурные эксперименты, так и результаты численных исследований показали, что исчерпание несущей способности короткой стойки происходит в результате потери местной устойчивости. Определенное значение эффективной площади поперечного сечения стойки может быть использовано при определении минимальной осевой несущей способности сечения стойки паллетного стеллажа.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. ГОСТ Р 56567-2015 (ЕН 15512:2009) «Стеллажи сборно-разборные. Нормы расчета».
2. FEMA 460. 2005. Seismic Considerations for Steel Storage Racks Located in Areas Accessible to the Public. NIBS, Washington, DC, USA.
3. FEM 10.2.02, Recommendations for the Design of Steel Static Pallet Racking and Shelving, Section X. 1998, Fédération Européenne de la Manutention: Brussels.
4. CSA 2004. A344.1/A344.2 - Public Review Draft. User Guide for Steel Storage Racks / Standard for the Design and Construction of Steel Storage Racks. Canadian Standards Association. Ottawa, Canada.
5. BSSC 2004. Recommended Guidance for the Seismic Design of Steel Pallet Storage Racks and the Securing of Contents in Areas Accessible to the General Public – First Draft. Prepared for the Federal Emergency Management Agency, USA.

6. FEM 2001. FEM 10.2.02 - The Design of Static Steel Pallet Racking (Racking Design Code). *Federation Europeenne De La Manutention, Birmingham, Great Britain.*
7. RMI 1997. Specification for the Design, Testing, and Utilization of Industrial Steel Storage Racks – 1997 Edition. *Published by the Rack Manufacturers Institute, USA.*
8. Richard M. Drake, Robert J. Walter. Design of structural steel pipe racks. *Engineering journal/Fourth Quarter.* 2010.
9. Arlene M.S. Freitas, Flavio T. Souza, Marcilio S.R. Freitas. Analysis and behaviour of steel storage drive in racks. *Thin-Walled structures.* 48. (2010).
10. Kees Tilburgs. Those peculiar structures in cold formed steel: “racking & shelving”. *Steel construction.* 6 (2013). №2.
11. ГОСТ 11701-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент».
12. ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84) «Металлы. Методы испытаний на растяжение».
13. ГОСТ 28840-90 «Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования».
14. ДСТУ Б В.2.6-210:2016 «Оценка технического состояния эксплуатируемых стальных строительных конструкций».
15. ДБН В.2.6-198:2014 «Стальные конструкции. Нормы проектирования».
16. Басов К.А. ANSYS: Справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.

**Солодовник Ю.Ю., Рюміна К.О., Рюмін В.В., Яровий Ю.М. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ТА ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СТІЙОК ПАЛЕТНИХ СТЕЛАЖІВ.** В статті наведені результати натурних випробувань та чисельного моделювання роботи коротких стійок палетних стелажів. За результатами досліджень зроблено висновок про механізм переходу у граничний стан короткого зразка стійки палетного стелажу. Результати досліджень можуть бути використані для оцінки впливу таких факторів як перфорація та місцева втрата стійкості при стиску короткої стійки.

**Ключові слова:** короткі стійки, стелажі, несуча здатність, місцева втрата стійкості.

**Solodovnik Yu.Yu., Riumina E.A., Riumin V.V. Yarovoj Yu. N. EXPERIMENTAL AND NUMERICAL RESEARCH OF PALLET RACKS STRUTS.** In current article results of experimental and numerical research of pallet racks struts are presented. According to carried out tests was made a conclusion about limit state scheme of a pallet rack strut. Results of this work can be used in estimation of influence such factors as perforation and local buckling on bearing capacity of strut.

**Key words:** struts, racks, bearing capacity, local buckling.

DOI: 10.29295/2311-7257-2019-96-2-257-264

УДК 528.2/5

**Фоменко Г.Р., Арсеньєва Н.О.; Урдзік С.М., Синовець О.С., Саркісян Г.С.**

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет*

*(вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна; [orcid.org/0000-0001-8789-7575](https://orcid.org/0000-0001-8789-7575);*

*[orcid.org/0000-0002-6178-2558](https://orcid.org/0000-0002-6178-2558), [orcid.org/0000-0001-6914-1221](https://orcid.org/0000-0001-6914-1221); [orcid.org/0000-0002-3546-066X](https://orcid.org/0000-0002-3546-066X);*

*[orcid.org/0000-0003-2343-4461](https://orcid.org/0000-0003-2343-4461))*

## МЕТОДИ ПОБУДОВИ ПЛАНОВИХ ОПОРНИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ

Планові опорні геодезичні мережі є базисом для винесення проектів будівництва у природу, виконання спеціальних інженерно-геодезичних робіт, спостережень за небезпечними природними і техногенними процесами, забезпечення будівництва та експлуатації об'єктів. В статті розглянуто основні методи побудови планових опорних геодезичних мереж: триангуляції, трилатерації, полігонометрії, лінійно-кутовий та супутниковий. Приведені загальні характеристики, переваги та недоліки кожного з методів.

**Ключові слова:** геодезична мережа, триангуляція, трилатерація, полігонометрія, лінійно-кутові мережі, супутниковий метод, точність вимірювання.