Construction of Unique Buildings and Structures
journal homepage: www.unistroy.spbstu.ru

Структурированные стальные листы

Д.М. Шлычкова [1*], Н.И. Ватин [2]

[1] *Бранденбургский Технический университет, 03046, Germany , Cottbus BTU K.-Wachsmann-Str.2*

[2] *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.*

Информация о статье	**История**	**Ключевые слова**
УДК 691.714	Подана в редакцию: 14.10.2016	сэндвич-листы структурированные листы двухопорная балка шестиугольные соты ЛСТК
doi: 10.18720/CUBS.54.3		

АННОТАЦИЯ

В статье содержится информация о новой структуре поверхности стальных листов, представленной трехмерными шестиугольными «сотами». Описываются исследованные свойства несущей способности стальных структурированных стальных листов – согласно исследованиям, структурированная пластина может выдерживать силу несколько раза выше, чем плоская пластина. Это даёт возможность использовать такую структуру в строительстве, например, как альтернативу тонкостенным легким стальным плоским профилям. Также в статье описаны трудности, связанные с процессом производства данной структуры материала. Был проведен расчет в программе Abaqus пластин размерами 400x400 мм с разной ориентацией сот. Были исследованы четыре типа пластин: плоские пластины и структурированные листы с углом поворота 0°, 45°,90°. Установлены значения прогибов для этих пластин при одинаковой внешней нагрузке.

Содержание

1. Введение 36
2. Материалы и методы 37
3. Результаты и обсуждения 41
4. Заключение 42

Контактная информация:

1* +7(911)7111040, darita_egypt@mail.ru (Шлычкова Дарита Максимовна, аспирант)
2 +7(921)9643762, vatin@mail.ru (Ватин Николай Иванович, д.т.н, профессор)

1. Введение

Тонкие стальные структурированные листы - это инновационные легкие конструкции, имеющие высокий потенциал. По сравнению с плоскими неструктурированными листами, их жесткость повышается за счет процесса их структурирования – выдавливания в них «сот», т.е. получения трехмерной геометрии листа (рис.1).

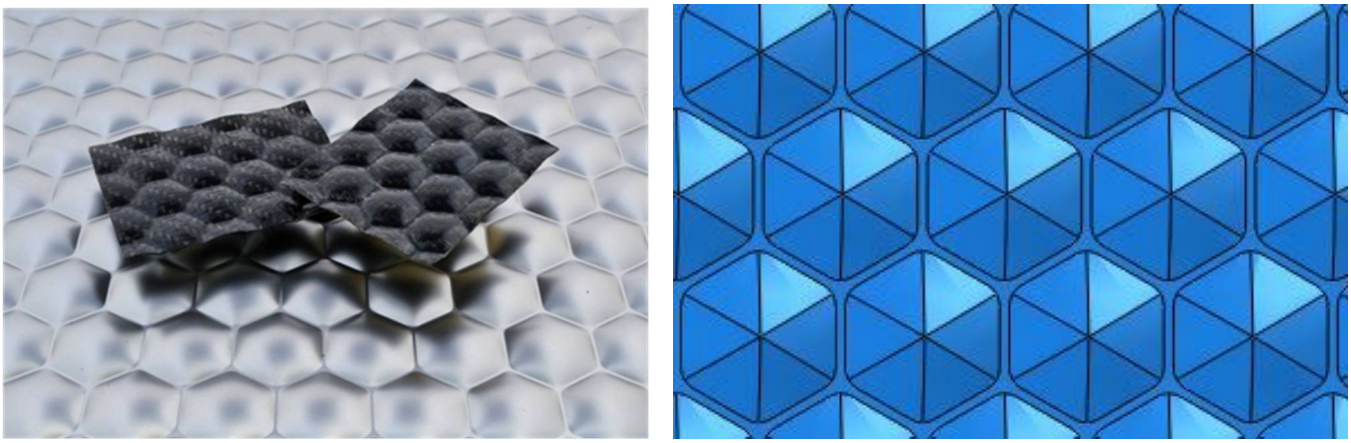

Рисунок 1. Произведенные и смоделированные в программе Abaqus структурированные листы

В последние десятилетия тема легких тонкостенных стальных конструкций стала занимать важное место в исследованиях новых материалов для строительства. В Российской Федерации ГОСТ 23118-99 «Конструкции стальные строительные. Общие технические условия» [1], а в Европе Еврокод 3 «Проектирование стальных конструкций» [2-3] содержит общую информацию о методике расчета для холодногнутых элементов и профилированных листов. На сегодняшний день существует множество модификаций стальных конструкций: холодногнутые стальные профили [4- 5] профили с закрытыми сечений [6-8], открытые секции [9-10], колонны с различными типами перфорации [11-14], профили с различными поперечными сечениями: сварные балки I-сечение [15-17], Z- поперечное сечение [18-20], прямоугольные полые профили [21-23] и структурированные (стальные листы с особой трехмерной геометрией) пластины [24-26]. В настоящее время много новых модификаций стальных холодногнутых профилей стали предметами исследований научных сообществ по всему миру.

Научные исследования однослойных и многослойных легких материалов с структурированной поверхностью являются актуальными не только для России, но и для Европы в целом. По предварительным исследованиям, прочность и жесткость новых микро- и макроструктурированных однослойных и многослойных материалов может превышать более чем в одиннадцать раз жесткость известных аналогичных материалов, не обладающих подобной структурой, с тем же весом. По начальным расчетам, они также имеют аэро- и гидродинамическое сопротивление на 30% меньше, чем материалы с гладкой поверхностью. Это означает, что компоненты из таких материалов могут быть относительно большего размера, но сохранять энергоэффективность. Помимо создания объемов общей информации о характеристиках и свойствах этих материалов, также должна учитываться специфика их применения. В зависимости от будущего применения материала, должны быть разработаны определенные рекомендации, а также предусмотрен комплекс специализированных инновационных решений, обеспечивающих долговечность и надежность будущих конструкций.

Эти новые модификации холодногнутых стальных пластин, которые были упомянуты выше, имеют свои собственные уникальные особенности и свойства. К сожалению, ни российские нормативные документы, ни европейские еврокоды, содержащие только общую информацию, преимущественно для плоских стальных материалов или для материалов с достаточно простой геометрией, не могут обеспечить полную схему расчета стальных листов с новой структурой поверхности. Таким образом, отсутствие данной информации открывает для ученых и исследователей во всем мире обширное поле для исследований легких стальных листов с разнообразными рельефами поверхности.

Таким образом, целью научного проекта является разработка рекомендаций по применению в строительстве и изучению несущей способности стальных структурированных сэндвич-листов.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать работы, посвященные исследованиям структурированным листам
2. Смоделировать испытания в программе Abaqus по нагружению стальных образцов с различной ориентацией структуры (ячеек) из структурированных листов для определения перемещений и распределения поля напряжений
3. Установить какой из исследуемых образцов имеет наименьшее перемещение под внешней нагрузкой.

2. Материалы и методы

Свои уникальные свойства и характеристики структурированные листы приобретают за счет своей трехмерной геометрии - специальных выпуклых «сот». «Сота» имеет форму пирамиды, в основании которой лежит правильный шестиугольник. Высота каждой соты составляет 2,7 мм, сторона правильного шестиугольника составляет приблизительно 18 мм, а радиус закругления составляет 5 мм (рис. 2). Соты образуют сетку, плоские соединение между которыми имеют ширину 3 мм.

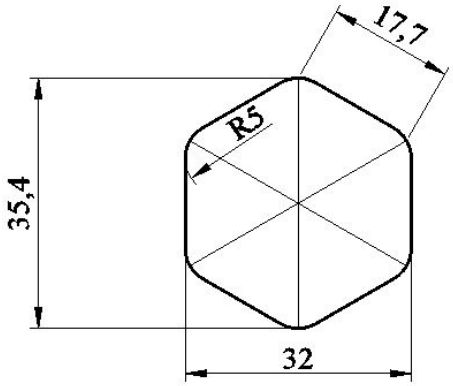

Рисунок 2. Геометрические параметры соты

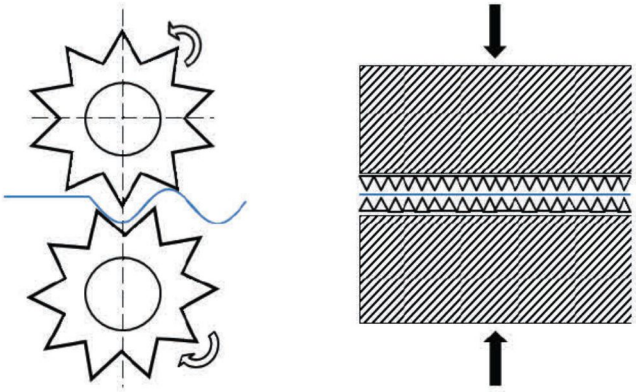

Рисунок 3. Прокатка и штамповка

Производство структурированных металлических листов осуществляется в соответствии со специальными методами, которые отличаются от стандартных прокатки и штамповки (рис. 3).

Первый метод, разработанный в середине 90-х годов, является структурированием поверхности. Формировка определенной структуры листа происходит под внешним давлением (рис. 4). Стальной плоский лист помещают между поддерживающим опорным валиком и металлический цилиндром, который создает определенное внешнее давление. Когда давление в цилиндре выше допустимого предела давления на конструкцию, образуются многомерные структуры с опорными перемычками - соты. Схема данного процесса показана на рисунке 4. Таким образом, процесс формирования структуры – это процесс вальцовки [27].

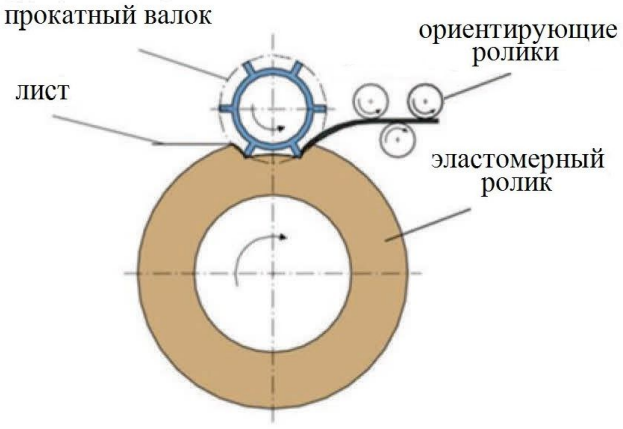

Рисунок 4. Метод структурирования листов вальцовкой

Структурированные листы, полученные в процессе производства для данной работы, были произведены другим способом – методом гидроформовки (рис. 5). Гидроформовка является одним из экономически эффективным способом для придания структуры поверхности таких пластических материалов, как низколегированная сталь и нержавеющая сталь. Гидроформовка является специализированным типом штамповки, для неё используют жидкость, находящуюся под высоким давлением, чтобы материал приобретал желаемую структуру.

Лист помещается под пресс, в котором создается давление при помощи жидкости (обычно воды). Сам формующий инструмент, который создаёт давление, покрыт специальной мембраной. Преимущество такого метода производства состоит в том, что заготовка отделяется от рабочей среды и можно избежать её последующей очистки.

Однако, есть и трудности в процессе гидроформовки листов. Для того, чтобы обеспечить оптимальное производство, нужно подобрать точные параметры оборудования, например, параметры давления пресса должны соответствовать параметрам давления текучей среды, в сжимаемой мембране. Пресс "Hydrap HPDZb 500" (рис. 2-8) был использован для получения структуры «сот» в Бранденбургском техническом университете (БТУ). В данном прессе могут быть произведены листы, размером 585 мм х 585 мм. Допускается отклонение от минимальной высоты соты 2,9 мм на 5%. Давление в процессе формовки достигало 50 бар. Эти значения относятся к структурированному листу, имеющего размер соты 33 мм и толщиной от 0,5 мм и больше [28]. К сожалению, на практике отклонение от начальной запланированной высоты соты достигает 10-15%, однако, преимущественно по краям листа. Поэтому, для того, чтобы на одном листе значение высоты сот находилась в пределах допустимого значения отклонения, листы были обрезаны по краям до размеров 400 мм х 400мм.

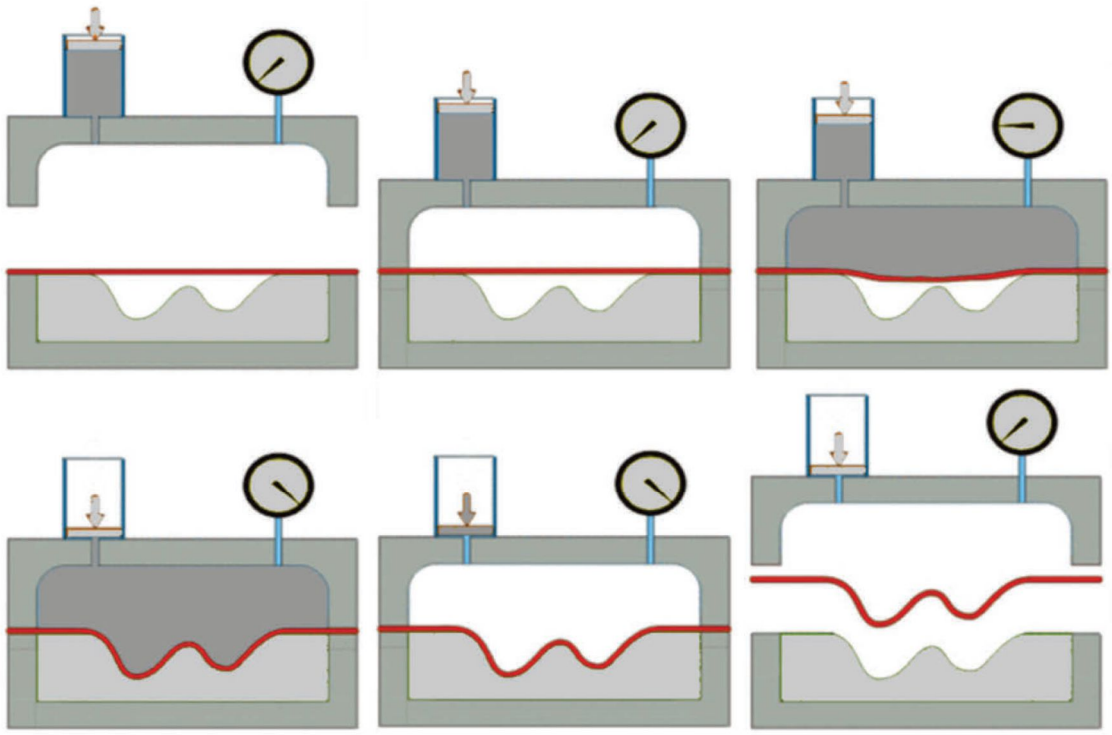

Рисунок 5. Процесс гидроформовки

В промышленном и гражданском строительстве из таких листов, например, можно скомпоновать сэндвич-балки. Для этого листы приваривают к плоским стальным листам или к листам с такой же геометрией поверхности посредством точечной сварки. Местами соединения листов могут быть как вершины сот, так и плоские участки между ними. Соты на плоскости стального листа могут быть ориентированы по-разному. Изученные на данный момент и самые базовые углы поворота - 0°, 45°, 90° [24-26] (рис. 6-8). Также, относительно второго пластины, соты структурированного листа могут иметь положительную и отрицательную ориентацию (рис. 9).

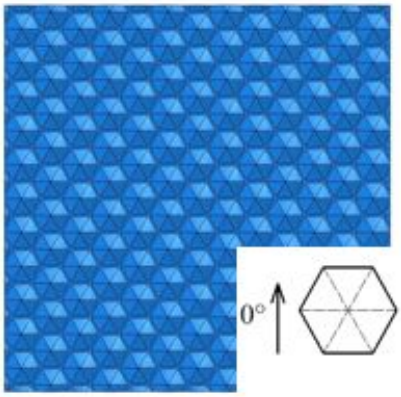

Рисунок 6. Стальной структурированный лист, угол поворот сот 0°

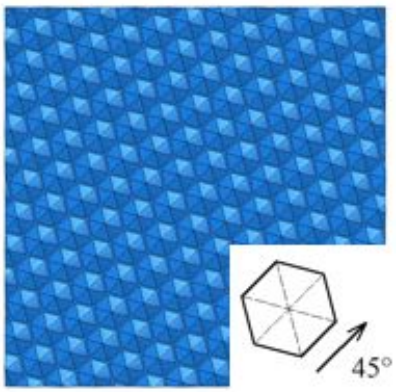

Рисунок 7. Стальной структурированный лист, угол поворот сот 45°

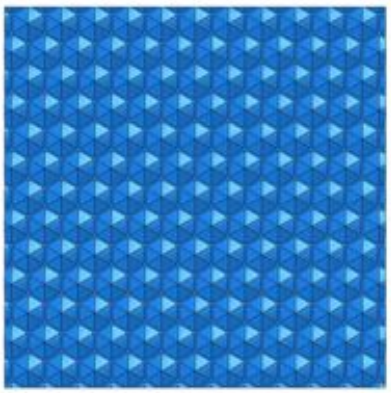

Рисунок 8. Стальной структурированный лист, угол поворот сот 90°

В данный момент ведущими исследователями стальных листов с структурой сот является Бранденбургский технический университет в Германии. Также в Германии фирма Борит, в процессе кооперации с первыми разработчиками и исследователями Рейнско-Вестфальского технического университета города Аахена, стала одной из первых компаний, производящей листы с различной структурой поверхности [29].

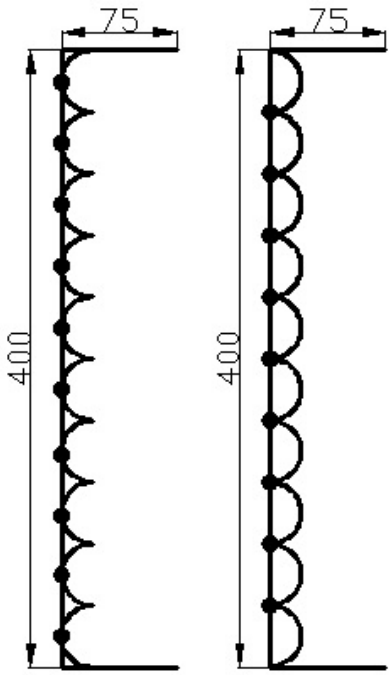

Рисунок 9. Стальной структурированный лист с негативной и позитивной ориентацией сот соответственно

С 2010 года по настоящее время в Германии группа из профессоров, преподавателей и аспирантов проводят фундаментальные исследования для дальнейшей обработки структурированных листов. Научно-исследовательская группа была создана в Бранденбургском техническом университете (BTU - Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg) в Котбусе [30]. Исследования сосредоточены в основном на производстве, дизайне структурированных листов, а также на изучении их несущей способности, прочностных характеристик, аэродинамических свойств, коррозионной устойчивости. Общая цель исследовательского проекта является накопление знаний и опыта для дальнейшего производства и обработки структурированы листов.

Также под руководством ведущего ученого, доктора технических наук, профессора *Михайлова В.Г. в 2014 году в* Санкт-Петербургском политехническом университете им. Петра Великого была создана Лаборатория легких материалов и конструкций [31]. Лаборатория была создана для разработки однослойных и многослойных легких материалов и компонентов с макроструктурированной поверхностью, технологии их производства и изготовления надежных конструкций. Предполагается, что в процессе работы лаборатории будут предложены новые специализированные материалы и методы производства новых продуктов для разных отраслей промышленности: транспортной, энергетической и, в том числе, строительной [32].

Применение пластин со структурированной поверхностью очень широко. Структурированные сэндвич-листы могут быть использованы научными сообщества, различными организациями и учреждениями, занимающиеся строительством, для эффективного применения облегченных конструкций во многих отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая, автомобильная и железнодорожная. Структурированные стальные листы можно использовать в качестве заготовок для дальнейшего производства более сложных частей конструкций, например, тонкостенных, широко применяемых в строительстве.

К сожалению, возможное применение структурированных металлических листов ограничивается недостаточными знаниями о процессе их поведения при воздействии на них внешней нагрузки, коррозии, сроке службы, несущей способности, долговечности и т.п. Однако, в связи с недостатком этих фактов, открывается большие возможности для изучения структурированных листов для ученых и исследователей из разных областей наук и дисциплин.

Для начального расчета несущей способности структурированных пластин, были выбраны несколько типов стальных листов, размером 400мм х 400 мм и толщиной 0,5 мм каждая. Первая пластина плоская, остальные – структурированные с ориентацией сот, т.е. 0°, 45°, 90° (см. табл. 1).

Таблица 1. Описание характеристик изучаемых пластин

Номер пластины	Тип поверхности	Геометрические параметры		Ориентация сот, °
		толщина, мм	длина х ширина, мм	
1	плоская	0,5	400 х 400	-
2	структурированная			0
3				45
4				90

Для расчета методом конечных элементов в программе Abaqus/CAE были смоделированы вышеописанные стальные пластины (см. рис. 7). Каждая из них была разбита на сетку, размер элементов которой 5 мм.

Граничные условия закрепления были выбраны так, чтобы только один край пластин был зафиксирован (нижний) по осям X,Y,Z. Распределённая нагрузка была приложена по всему верхнему краю, вниз, по оси Z (см. рис. 10).

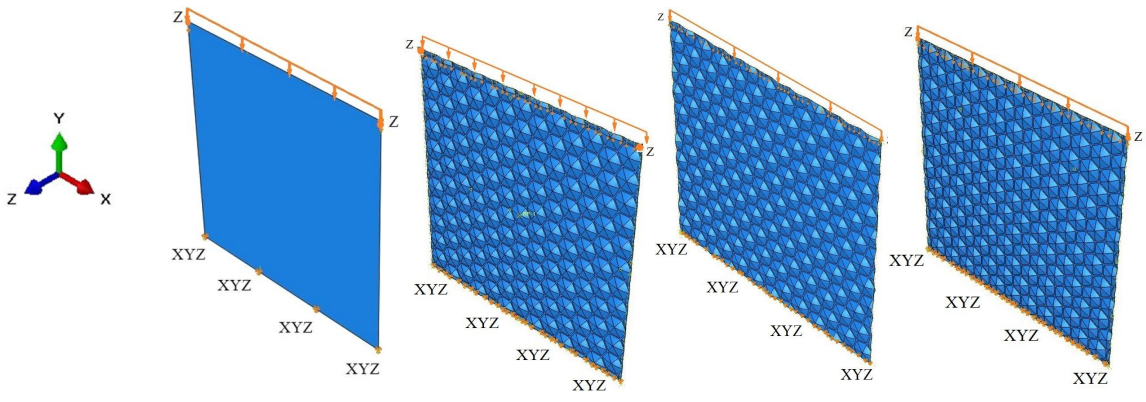

Рисунок 10. Модели плоского листа и структурированного листа с углами поворота сот 0°, 45°и 90° соответственно, закрепленные жестко по нижнему краю с приложенной распределенной нагрузкой по верхнему краю

3. Результаты и обсуждения

Сначала был проведен статический линейный анализ, а затем и нелинейный с учетом результатов из первого в программе Abaqus/CAE. Итоговый результат расчета из программы приведены на рисунке 8 - зависимость силы от прогиба пластины.

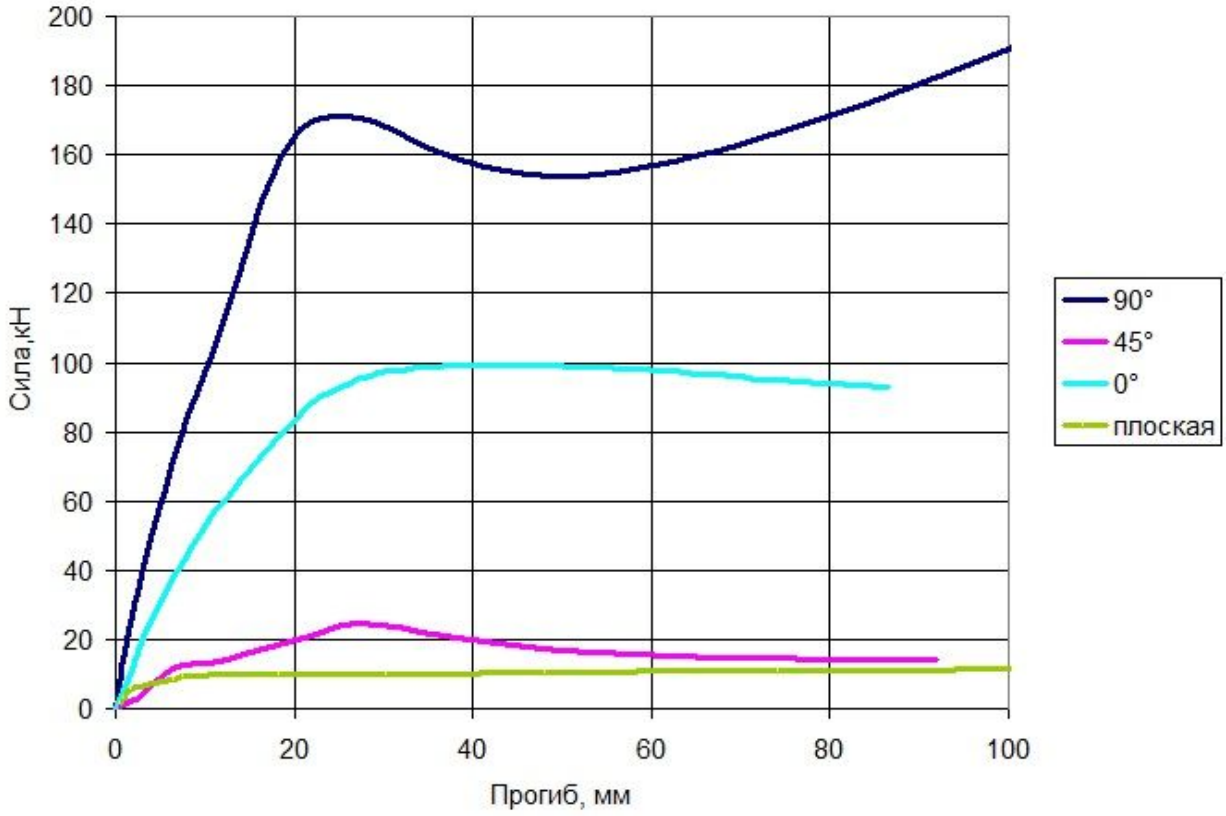

Рисунок 11. График зависимости силы от прогиба пластин

Из графика на рисунке 11 видно, что наименьшее прогиб при наибольшей действующей на пластину силе имеет лист с ориентацией сот 90°. Далее, примерно в два раза меньшую нагрузку несет пластина с ориентацией сот 0 градусов. Затем в 8 раз меньшую нагрузку, по сравнению с первым образцом, выдерживает пластина с ориентацией сот 45 градусов. Самые низкие показатели демонстрирует плоская пластина – при таком же перемещении способна выдержать нагрузку в 16 раз меньшую, чем первый образец. В таблице 2 представлены из расчета значения нагрузки для каждой из пластин при одинаковом перемещении в 20 мм.

Таблица 2. Значения действующей силы на пластины с разной ориентацией сот при прогибе в 20 мм

Номер пластины	Тип поверхности	Ориентация сот, °	Прогиб, мм	Сила, кН	Прогиб, мм	Сила, кН
1	плоская	-	20	10	20	10
2	структурированная	0	2			85
3		45	7			20
4		90	0,5			165

Из таблицы следует, что пластина с минимальным прогибом при наибольшей действующей внешней силе соответствует пластина с ориентацией сот 90°. К сожалению, статей с описанием исследований свойств структурированных пластин, применимых в строительной области, крайне мало. Однако, группа немецких авторов, испытывающих балки двутаврового сечения, состоящие структурированных пластин, пришли к аналогичному выводу. Балки, сваренные из пластин с ориентацией сот 90°, имеют несущую способность выше, чем все остальные и именно листы с такой ориентацией структуры наиболее устойчивые [33, 34].

4. Заключение

1. В статье содержится информация о новой трехмерной структуре стальных пластин с особым рельефом поверхности – с сотами, представленными в виде выпуклого шестиугольника. Были описаны процессы производства структурированных листов, достоинства и недостатки методов.

2. Был проведен расчет в программе Abaqus пластин размерами 400х400 мм с разной ориентацией сот. Были исследованы четыре типа пластин: плоские пластины и структурированные листы с углом поворота сот 0°, 45°,90°.

3. Анализ расчета структурированных пластин показал, что при одинаковом значении действующей на пластины силы, самый маленький прогиб у пластин с ориентацией сот 90°. Самый большой прогиб, как и ожидалось, у плоской пластины. Согласно графику (рис. 11) и исследованиям других ученых структурированная пластина может выдерживать силу в несколько раза выше [23-25], чем плоская пластина, что даёт возможность использовать такую структуру в строительстве, например, как альтернативу тонкостенным легким стальным плоским профилям.

Литература

[1] ГОСТ 23118-99 2012 «Конструкции стальные строительные. Общие технические условия» // Межгосударственный стандарт от 1 июля 2013 г.

[2] EN 1993-1-3:2006: «Design of steel structures – Part 1-3: Supplementary rules for cold-formed members and sheeting» // CEN, Brussels 2006.

[3] EN 1993-1-5:2006: «Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements» // CEN, Brussels 2006.

[4] Rendek S., Balaz I. Distortion of thin-walled beams // Thin-walled structures 2(42), 2004, p. 255-277.

[5] Rasmussen J.K. Bifurcation of locallz buckled point szmmetric colums – experimental investigations // Thin-walled structures 44, 2006, p. 1175-1184.

[6] Yuan-Qi. L. Analysis and design reliability of axially compressed members with high-strenght cold-formed thin-walled steel // Thin structures 45, 2007, p. 473-492.

[7] Gardner L., Saari N., Wang F. Comparative experimental study of hot-rolled and cold-formed rectangular hollow sections. Thin-walled structures 48, 2010, 495-507.

[8] Al Ali M. Analysis of the resistance of thin-walled cold-formed compressed steel members with closed cross-sections Part 2. Magazine of civil enjeneering1(45), 2014, 53-58.

[9] Zhang Y., Wang Ch., Zhang Z. Tests and finite element analysis of pin-ended channel columns with inclined simple edge stiffeners. Journal of constructional steel research 63, 2007, 383-395.

[10] Vatin N. Reticular-stretched thermo-profile: buckling of the perforated web as a single plate. Applied mechanics and materials, 2015, 725-726.

[11] Garifullin M., Trubina D., Vatin N. Local buckling of cold-formed steel members with edge stiffened holes. Applied mechanics and materials 725-726, 2015, 697-702.

[12] Garifullin M., Bronzova, Sinelnikov A., Vatin N. Buckling analysis of cold-formed C-shaped colomns with new type of perforation. Advances and trends in engineering and technologies, 2016, 63-68.

[13] Salminen M., Heiniso M. Shear buckling and resistance of thin-walled steel plate at non-uniforn elevated temperatures. 10th international conference on steel space and composite structures:267-276, 2011, p.257.

[14] Salminen M., Heiniso M. Numerical analysis of thin steel plates loaded in shear at non-uniform elevated temperatures. Journal of constructional steel research 97, 2014, 105-113.

[15] Al Ali M. Resistance of compressed thin-walled cold-formed steel members with regard to the influence of initial imperfections. Design, fabrication and economy of metal structures international conference proceedings, Miskolc, Hungary 2013.

[16] Tusnin A.R., Prokic M. Bearing capacity of steel I-sections under combined bending and torsion actions taking into account plastic deformations. Journal of applied engeneering science 12(3), 2014, 44-53.

[17] Tusnin A.R., Prokic M. Behavior of symmetric steel I-sections under combined bending and torsion actions allowing for plastic deformations. Magazine of civil engineering 5(49), 2014, 44-53.

[18] Tusnina O. A finite element analysis of cold-formed Z-purlins supported by sandwich panels. Applied mechanics and materials 467, 2014, 398-403.

[19] Tusnina O. An influence of the mesh on the results of finite element analzsis of Z-putlins supported by sandwich panels. Applied mechanics and materials 475-476, 2014, 1483-1486.

[20] Danilov A., Tusnina O. The joints of cold-formed purlins. Journal of applied engineering science 12(2), 2014, 153-158.

[21] Bjork T. Saastamoinen H. Capacity of CFRHS X-joints made od double-grade S420 steel. Tubular structures XIV – proceedings of the 14th international symposium on tubular structures, ISTS, 2012, 167-176.

[22] Heinila S., Bjork T., Marquis G. The influence of residual stressed on the fatigue strength of cold-formed structural tubes // Special technical publication. 2009. № 1508. Pp. 200-215.

[23] Nykanen T. Residual strength at -40° C of a pre-cracked cold-formed rectangular hollow section made of ultra-high-strength steel - An engineering approach // Fatigue and fracture of engineering materials and structures. 2014. № 37(3). Pp. 325-334.

[24] Bartholome S. Grundlegende Untersuchungen zu strukturierten Blechen in Stahlleichtbauträgern // BTU Cottbus. 2015.

[25] Pasternak H., Bartholome S. Versuche zu Stahlrtägern mit strukturiertem Steg Research of steel beams with structured web // Bauingenieur. 2012. № 87. Pp.417-422.

[26] Malikov V. Experimentelle und numerische Untersuchungen der Umformung von strukturierten Blechen // BTU Cottbus. 2015.

[27] Sterzing, A. Bleche mit Wölbstruktur: Wie praxistauglich sind sie? // Blech InForm. 2005. № 3. Pp. 28-31.

[28] Olbrich, S., Viehweger, B., Schölzke, T. Prozesssichere Herstellung von FQZ-Wabenstrukturen durch Hydroforming // Bänder Bleche Rohre. 2012. № 53. Pp. 66-67.

[29] Bleche in Bestform – Innovationen in Technik, Effizienz und Design [Электронный ресурс]. Систем. требования: Internet Explorer URL: http://www.borit.de/ (дата обращения 28.10.16)

[30] Leichtbau mit strukturierten Werkstoffen [Электронный ресурс]. Систем. требования: Internet Explorer URL: https://www.b-tu.de/forschung/forschungsprojekte/strukturierte-bleche (дата обращения 05.11.16)

[31] Лаборатория легких материалов и конструкций [Электронный ресурс]. Систем. требования: Internet Explorer URL: http://nru.spbstu.ru/srw_government/lwms/ (дата обращения 15.11.16)

[32] Pasternak H., Bartholome S. Träger mit schlanken, wabenförmig strukturierten Stegen – Versuch und Simulation // Stahlbau 85. 2016. № 87. Pp.724-732.

[33] Hoppe M. Umformverhalten strukturierter Feinbleche // BTU Cottbus. 2002

Structured steel plates

D.M. Shlychkova [1]*, N.I. Vatin [2]

[1] *Brandenburg University of Technology,03046, Germany , Cottbus BTU K.-Wachsmann-Str.2*
[2] *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia*

Article info

scientific article

doi: 10.18720/CUBS.54.1

Article history

Received 14.10.2016

Keywords

sandwich plates
structured sheet metals
simply supported beams
hexagonal cells
lightweight steel construction

ABSTRACT

This article contains information about a new structure surface of the steel sheet metals, provided by three-dimensional hexagonal "honeycombs". Some mechanical properties were investigated, such as bearing capacity sandwich structured steel sheets, their possible application in building construction, advantages in comparison with the flat steel sheets. According to the research, the structured sheet metals can bear a several times higher force than the flat plate. It makes possible to use a such kind of structured plates in building, for example, as an alternative to thin-walled lightweight steel flat profiles. The article describes also the difficulties in production process of this cell-structured sheets. The calculation was conducted in FEM- program Abaqus: plates dimensions are 400x400 mm with different cell orientation. Four plate types were tested: the flat plates and structured sheets - with cell rotation 0 °, 45 °, 90 °. The deflection values of plates with the same external load were established.

Contact information:

1* +7(911)7111040, darita_egypt@mail.ru (Darita Shlychkova, Postgraduate)
2 +7(921)9643762, vatin@mail.ru (Nikolai Vatin, PhD, Professor)

References

[1] GOST 23118-99 2012 «Konstruktsii stalnyye stroitelnyye. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya» // Mezhgosudarstvennyy standart ot 1 iyulya 2013 g.

[2] EN 1993-1-3:2006: «Design of steel structures – Part 1-3: Supplementary rules for cold-formed members and sheeting» // CEN, Brussels 2006.

[3] EN 1993-1-5:2006: «Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements» // CEN, Brussels 2006.

[4] Rendek S., Balaz I. Distortion of thin-walled beams // Thin-walled structures 2(42), 2004, p. 255-277.

[5] Rasmussen J.K. Bifurcation of locallz buckled point szmmetric colums – experimental investigations // Thin-walled structures 44, 2006, p. 1175-1184.

[6] Yuan-Qi. L. Analysis and design reliability of axially compressed members with high-strenght cold-formed thin-walled steel // Thin structures 45, 2007, p. 473-492.

[7] Gardner L., Saari N., Wang F. Comparative experimental study of hot-rolled and cold-formed rectangular hollow sections. Thin-walled structures 48, 2010, 495-507.

[8] Al Ali M. Analysis of the resistance of thin-walled cold-formed compressed steel members with closed cross-sections Part 2. Magazine of civil enjeneering1(45), 2014, 53-58.

[9] Zhang Y., Wang Ch., Zhang Z. Tests and finite element analysis of pin-ended channel columns with inclined simple edge stiffeners. Journal of constructional steel research 63, 2007, 383-395.

[10] Vatin N. Reticular-stretched thermo-profile: buckling of the perforated web as a single plate. Applied mechanics and materials, 2015, 725-726.

[11] Garifullin M., Trubina D., Vatin N. Local buckling of cold-formed steel members with edge stiffened holes. Applied mechanics and materials 725-726, 2015, 697-702.

[12] Garifullin M., Bronzova, Sinelnikov A., Vatin N. Buckling analysis of cold-formed C-shaped colomns with new type of perforation. Advances and trends in engineering and technologies, 2016, 63-68.

[13] Salminen M., Heiniso M. Shear buckling and resistance of thin-walled steel plate at non-uniforn elevated temperatures. 10th international conference on steel space and composite structures:267-276, 2011, p.257.

[14] Salminen M., Heiniso M. Numerical analysis of thin steel plates loaded in shear at non-uniform elevated temperatures. Journal of constructional steel research 97, 2014, 105-113.

[15] Al Ali M. Resistance of compressed thin-walled cold-formed steel members with regard to the influence of initial imperfections. Design, fabrication and economy of metal structures international conference proceedings, Miskolc, Hungary 2013.

[16] Tusnin A.R., Prokic M. Bearing capacity of steel I-sections under combined bending and torsion actions taking into account plastic deformations. Journal of applied engeneering science 12(3), 2014, 44-53.

[17] Tusnin A.R., Prokic M. Behavior of symmetric steel I-sections under combined bending and torsion actions allowing for plastic deformations. Magazine of civil engineering 5(49), 2014, 44-53.

[18] Tusnina O. A finite element analysis of cold-formed Z-purlins supported by sandwich panels. Applied mechanics and materials 467, 2014, 398-403.

[19] Tusnina O. An influence of the mesh on the results of finite element analzsis of Z-putlins supported by sandwich panels. Applied mechanics and materials 475-476, 2014, 1483-1486.

[20] Danilov A., Tusnina O. The joints of cold-formed purlins. Journal of applied engineering science 12(2), 2014, 153-158.

[21] Bjork T. Saastamoinen H. Capacity of CFRHS X-joints made od double-grade S420 steel. Tubular structures XIV – proceedings of the 14th international symposium on tubular structures, ISTS, 2012, 167-176.

[22] Heinila S., Bjork T., Marquis G. The influence of residual stressed on the fatigue strength of cold-formed structural tubes // Special technical publication. 2009. № 1508. Pp. 200-215.

[23] Nykanen T. Residual strength at -40° S of a pre-cracked cold-formed rectangular hollow section made of ultra-high-strength steel - An engineering approach // Fatigue and fracture of engineering materials and structures. 2014. № 37(3). Pp. 325-334.

[24] Bartholome S. Grundlegende Untersuchungen zu strukturierten Blechen in Stahlleichtbauträgern // BTU Cottbus. 2015.

[25] Pasternak H., Bartholome S. Versuche zu Stahlrtägern mit strukturiertem Steg Research of steel beams with structured web // Bauingenieur. 2012. № 87. Pp.417-422.

[26] Malikov V. Experimentelle und numerische Untersuchungen der Umformung von strukturierten Blechen // BTU Cottbus. 2015.

[27] Sterzing, A. Bleche mit Wölbstruktur: Wie praxistauglich sind sie? // Blech InForm. 2005. № 3. Pp. 28-31.

[28] Olbrich, S., Viehweger, B., Schölzke, T. Prozesssichere Herstellung von FQZ-Wabenstrukturen durch Hydroforming // Bänder Bleche Rohre. 2012. № 53. Pp. 66-67.

[29] Bleche in Bestform – Innovationen in Technik, Effizienz und Design [Elektronnyy resurs]. Sistem. trebovaniya: Internet Explorer URL: http://www.borit.de/ (data obrashcheniya 28.10.16)

[30] Leichtbau mit strukturierten Werkstoffen [Elektronnyy resurs]. Sistem. trebovaniya: Internet Explorer URL: https://www.b-tu.de/forschung/forschungsprojekte/strukturierte-bleche (data obrashcheniya 05.11.16)

[31] Laboratoriya legkikh materialov i konstruktsiy [Elektronnyy resurs]. Sistem. trebovaniya: Internet Explorer URL: http://nru.spbstu.ru/srw_government/lwms/ (data obrashcheniya 15.11.16)

[32] Pasternak H., Bartholome S. Träger mit schlanken, wabenförmig strukturierten Stegen – Versuch und Simulation // Stahlbau 85. 2016. № 87. Pp.724-732.

[33] Hoppe M. Umformverhalten strukturierter Feinbleche // BTU Cottbus. 2002

Шлычкова Д.М., Ватин Н.И., Структурированные стальные листы. Строительство уникальных зданий и сооружений, 2017, №3 (54). С.34-46.

Shlychkova D.M., Vatin N.I. Structured steel plates. Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. 3 (54). Pp. 34-46. (rus)