

## Экспериментальное исследование рамно-стержневых конструкций с элементами из тонкостенных стальных профилей

*Е.Е. Устименко, С.В. Скачков*

*Донской Государственный Технический Университет*

**Аннотация:** Рассматриваются результаты экспериментально-теоретических исследований строительной рамы на основе тонкостенных холодногнутых профилей. В процессе исследований изучено напряженно-деформированное состояние рамы из тонкостенных профилей; проработана методика предварительного моделирования элементов конструкций с помощью МКЭ; разработана конструкция испытательного стенда и составлена программа испытаний рам из тонкостенных стальных профилей; сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований; выполнение численных расчетов узлов конструкции; изучены особенности работы под нагрузкой и соответствия ее принятой расчетной схемы.

**Ключевые слова:** тонкостенный профиль, испытания конструкции, метод конечных элементов, испытательный стен.

В последние годы на строительном рынке, активно развивается строительство конструкций с применением тонкостенных стальных профилей [1]. Данная технология эффективно применяется в строительстве зданий различного назначения [2]. Существует множество проблем при использовании тонкостенных профилей. Большинство из них связаны с узловыми соединениями стержней, такие как: смятие кромок отверстий при использовании болтовых соединений, малая несущая способность многоболтового соединения из-за напряжений, которые возникают в районе первого болта [3], местное смятие полок при передачи сосредоточенных нагрузок от прогонов, массивные фасонные элементы, которые должны разместить на себе требуемое количество болтов и т.д [4-5]. Так же имеет не последнюю роль в прочности конструкций из тонкостенных профилей особенность работы сжатых стержней. Разрушение конструкции может наступить в результате потери общей устойчивости [6-8], а также при потере местной устойчивости [9 -10].

## Модели и методы

В процессе проведения натурных испытаний рамной конструкции с элементами из тонкостенных профилей рассмотрено ряд вопросов:

- работа фрикционных болтовых соединений в элементах конструкции работающих на растяжение и сжатие;
- работа тонкостенных профилей при апробации предложенной методики предварительного анализа с помощью МКЭ;
- тензометрические измерения с учетом искажения результатов из-за искривления стенки и полок профиля.
- разработка испытательного стенда с применением современных материалов;

## Проведение эксперимента

Для исследования рамы был произведен статический расчет рамы. Исходные данные: пролет рамы 12 метров, шаг 4.5, снеговой район III. Расчетная нагрузка 220кг/м<sup>2</sup>. По результатам определили максимальные напряжения в стержнях и расчетные длины элементов конструкции. Максимальное усилия сжатие в карнизном раскосе составил 111кН при длине 710мм

Для эксперимента была запроектирована рама с уменьшенными размерами. Размеры конструкции составляли  $l=5.1\text{м}$ ,  $h=2.5\text{м}$ . Расчетная нагрузка на узел составляет 50кН, а общая 150кН. Максимальное усилие сжатия в элементах составляет 114кН при длине 910мм., что соответствует максимальным усилиям в элементах 12 метровой рамы. Так как элементы шарнирно-стержневой системы работают на растяжение и сжатие, то работа стержней крупномасштабной и уменьшенной рамы сопоставимы.

---

Для эксперимента был сконструирован и построен испытательный стенд (рис. 1) с применением современных технических средств и измерительных приборов.

Основное отличие стенда заключается в том что, в качестве создания нагрузки применялись тянущие гидравлические цилиндры, а контроль величины нагрузки производился с помощью динамометра включенного в линию создания нагрузки.

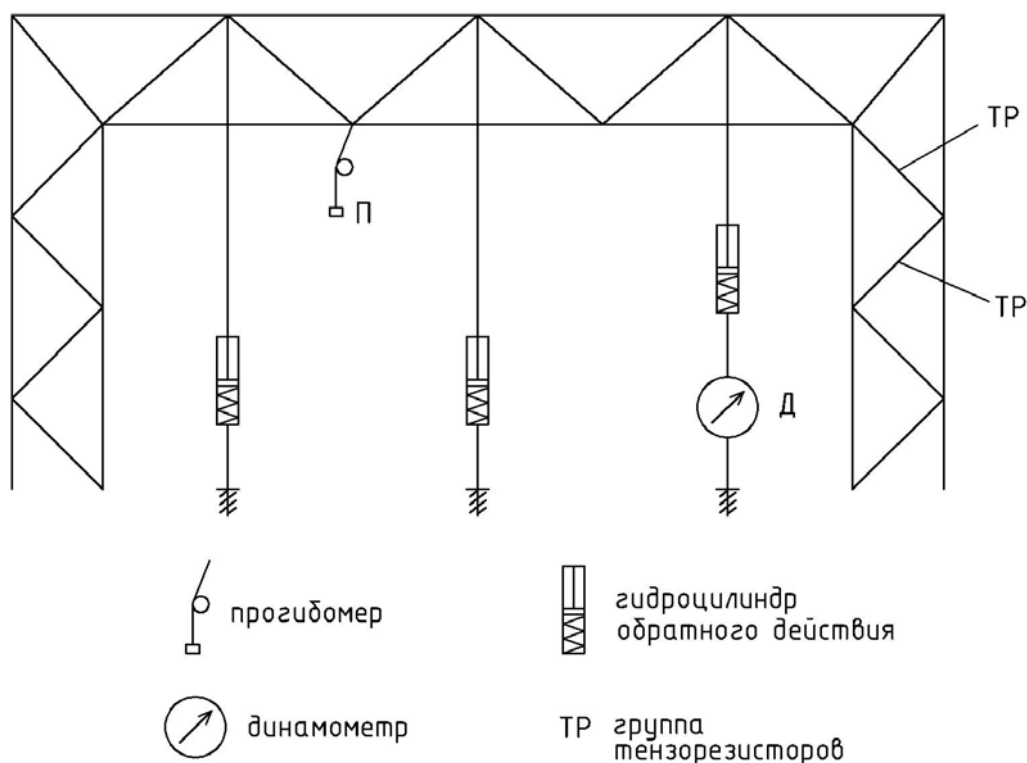


Рисунок 1. Испытательный стенд

Основные результаты в ходе проведения испытаний:

- Результаты численных исследований показали разницу величины напряжений на 10-35% в кромках отверстий фрикционных болтовых соединений для элементов конструкции, работающих на растяжение и сжатие, а также определено, концентрация усилий в районе первого болта имеют различные места и знаки (рис.2). При сравнении результатов численных и экспериментальных исследований наблюдается малая сходимость. Данная погрешность говорит о том, что на величину

напряжений в кромках имеет значение положение болта относительно зазоров в отверстии;

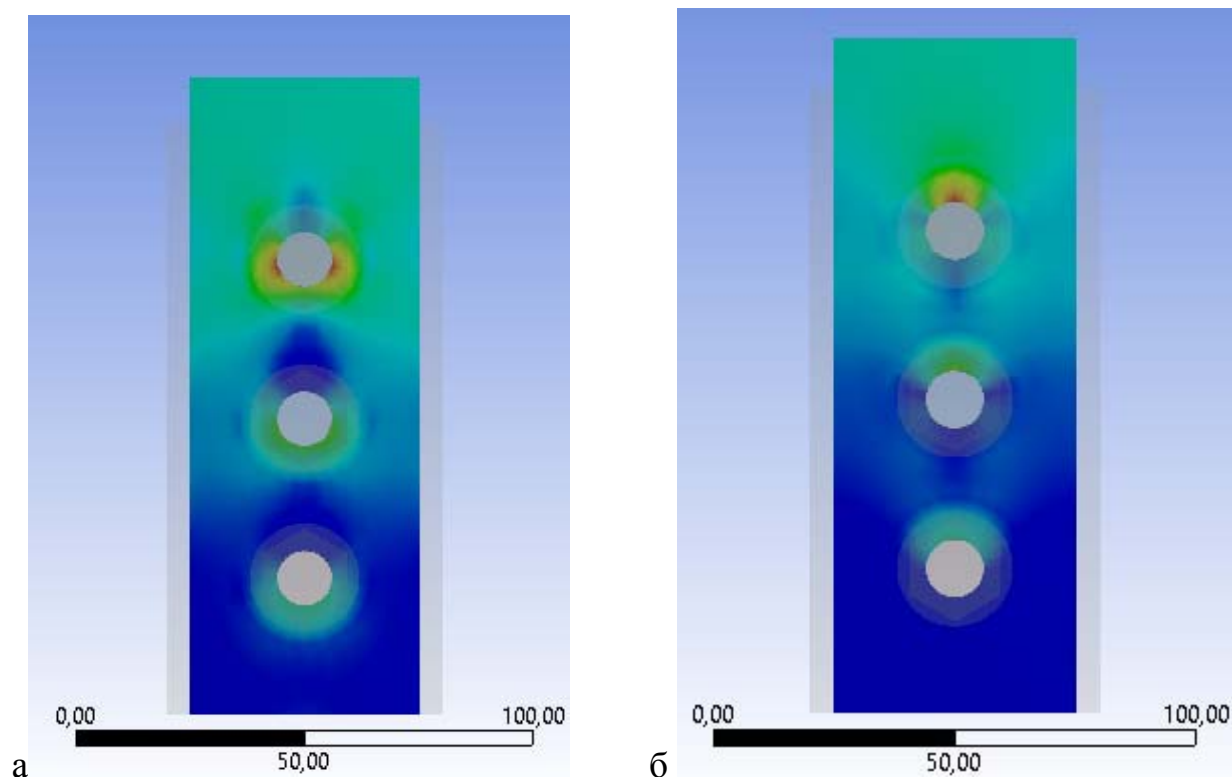


Рисунок 2. Концентрация напряжений в районе первого болта в элементах работающих: а - на растяжение, б – на сжатие.

- Для изучения работы тонкостенных профилей предложена методика предварительного анализа с помощью МКЭ. В данную методику входит построение модели работы тонкостенного элемента, на графике направления усилий выбор контрольных точек для размещения тензорезисторов (ТР), выбор схемы наклейки ТР с учетом особенности направления напряжений в районе места наклейки, корректировка численной модели с учетом особенностей схемы подключения ТР, сопоставление результатов численных и натурных испытаний. При применении данной методики удалось добиться высоких показателей сходимости результатов, не превышающих

6%. Результаты предварительного, уточненного и экспериментального исследований представлено в таблице 1.

Таблица 1. Результаты исследований НДС профилей

	Напряжения, МПа.			
	Растяжение		Сжатие	
Предварительная модель МКЭ	184		152	
Эксперимент	107	108	90	87
Уточненная модель МКЭ	102		88	

- Работа тонкостенного профиля на растяжение и сжатие характеризуется сложной формой напряженно-деформированного состояния. На небольшом участке могут возникать множество разнонаправленных напряжений - осевые силы, разные формы потери общей устойчивости и потери местной устойчивости [3]. Данные особенности работы тонкостенного профиля затрудняют измерение осевых деформаций с помощью тензорезисторов при измерении на поверхности профиля. Для исключения изгибных деформаций применена схема подключения тензорезистора «мост с двумя активными ТР в точке синфазной деформации» (рис.3). Данная схема подключения тензорезисторов исключает искажение данных возникающих в результате изгиба пластины.

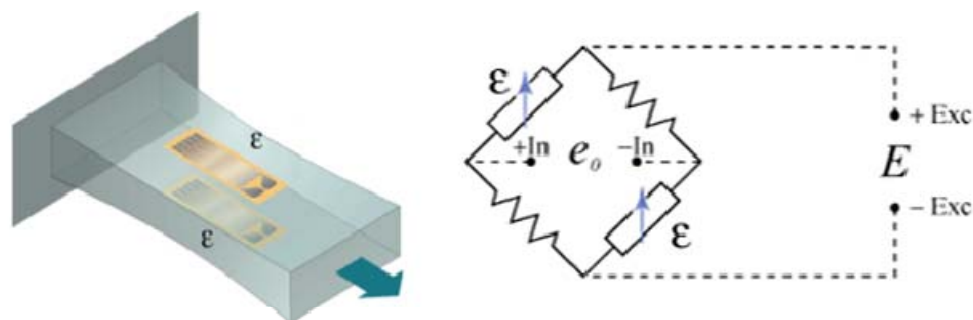


Рисунок 3. Схема подключения тензорезисторов

- При разработке испытательного стенда удалось добиться: высокого уровня точности приложения нагрузки и регистрации измерений; высокой технологичности; снизить расходы на проведение испытаний; упростить создание и регулирование нагрузки; повысить уровень техники безопасности; упростить приложение нагрузки на узлы испытуемой конструкции (рис.1).

### Выводы

- 1) По результатам исследований были предложены рекомендации:
  - при расчете соединений на высокопрочных болтах учитывать фрикционную составляющую и разделять работу соединяемых элементов на сжатие и растяжение
  - при измерении деформаций в тонкостенных стальных профилях с помощью тензорезисторов была рекомендована к использованию схема подключения «мост с двумя активными ТР в точке синфазной деформации», как наиболее подходящая для выявления «чистых» осевых напряжений. Была определена область применения испытуемой строительной системы.
- 2) Разработана методика предварительного моделирования конструкций
- 3) Разработан и запатентован стенд для испытания строительных конструкций (патент № 185718).

### *Благодарности:*

*Авторы выражают особую благодарность заведующему кафедрой «Железобетонных и каменных конструкций» в ДГТУ д.т.н. профессору Маилянну Дмитрию Рафаэловичу за предоставленную для проведения испытаний лабораторию кафедры, включая технические средства для производства монтажа испытуемой конструкции.*

## Литература

1. Жмарин Е. Н. Международная ассоциация легкого стального строительства // Строительство уникальных зданий и сооружений. –2012. №2. –С. –27-30.
2. Айрумян Э. Л., Каменьщиков Н.И. Рамные конструкции стального каркаса из оцинкованных гнутых профилей для одноэтажных зданий различного назначения // Мир строительства и недвижимости. –2006. –№36 –С. 9-11.
3. Тарасов, А.В. Экспериментально-теоретические исследования рамных конструкций из стальных холодногнутых профилей: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01/Тарасов Алексей Владимирович. – Томск, 2013 г. - 22 с.
4. Семенов А.С. Ферма из холодногнутых профилей повышенной жёсткости с болтовыми соединениями: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.23.01 / Семенов Александр Сергеевич.- Воронеж, 2009 - 21 с.
5. Любавская И.В. Напряженно-деформированное состояние рамной конструкции из стальных гнутых профилей: автореф.дис. ...канд.техн.наук: 05.23.01/Любавская Ирина Владимировна. -Липецк,2018 г.- 23 с.
6. Белый Г. И. О расчете упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформируемой схеме с учетом касательных напряжений деформаций сдвига // Межвуз. темат. сб. тр., № 32 (Металлические конструкции и испытания сооружений). – Л. : ЛИСИ, 1983. – С. 42-48.
7. Динник, А. Н. Устойчивость арок. -М.-Л.: Гостехиздат. 1946. - 128 с

8. Dubina D., Ungureanu V., Szabo I. Codification of imperfections for advanced finite analysis of cold-formed steel members // Proceedings of the 3rd ICTWS, 2001. – Pp. 179–186.

9. Борисов, Е.В. Устойчивость окаймленных ребрами полок тонкостенных профилей // Строительная механика и расчет сооружений. - 1965. -№2. - С. 39-44.

10. Броуде, Б.М. К теории тонкостенных стержней открытого профиля // Строительная механика и расчет сооружений. - 1960. -№5. -С. 6-11.

### References

1. Zhmarin E.N. Construction of Unique Buildings and Structures. 2012. No.2. Pp. 27–30.

2. Ajrumyan E. L., Kamen'shchikov N.I. Mir stroitel'stva i nedvizhimosti. 2006. №36. pp. 9-11.

3. Tarasov, A.V. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya ramnykh konstrukcij iz stalnyx xolodnognutyx profilej [Experimental and theoretical studies of frame structures made of cold-formed steel profiles]: avtoref. dis. ... kand. texn. nauk: 05.23.01/Tarasov Aleksej Vladimirovich. Tomsk, 2013 g. 22 p.

4. Semenov A.S. Ferma iz xolodnognutyx profilej povyshennoj zhyostkosti s boltovy`mi soedineniyami [Farm from cold-formed profiles of increased rigidity with bolted joints]: avtoref. dis. ...kand. texn. nauk: 05.23.01. Semenov Aleksandr Sergeevich. Voronezh, 2009. 21 p.

5. Lyubavskaya I.V. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie ramnoj konstrukcii iz stal'nyh gnutyh profilej [Stress-strain state of the frame structure of steel bent profiles]:avtoref.dis. ...kand.tekhn.nauk:05.23.01/Lyubavskaya Irina Vladimirovna. Lipeck, 2018 g. 23 p.

6. Belyj G. I. O raschete uprugoplasticheskikh tonkostennyh sterzhnej po prostranstvenno-deformiruemoj skheme s uchetom kasatel'nyh napryazhenij





deformacij sdviga [On the calculation of elastic-plastic thin-walled rods according to the spatially deformable scheme taking into account shear stresses]. Mezhvuz. temat. sb. tr., № 32 (Metallicheskie konstrukcii i ispytaniya sooruzhenij). L.: LISI, 1983. pp. 42-48.

7. Dinnik, A. N. Ustojchivost' arok. [Stability of arches]. M.-L.: Gostekhizdat. 1946. 128 p.

8. Dubina D., Ungureanu V., Szabo I. Proceedings of the 3rd ICTWS, 2001. Pp. 179–186.

9. Borisov, E.V. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij. 1965. №2. pp. 39-44. Bibliogr.: 44p.

10. Broude, B.M. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij. 1960. №5. pp. 6-11. Bibliogr.: 11 p.