

## Метод конечных элементов модели тонкостенного профиля с полками объемного фасонного элемента

*Е.Е. Устименко, С.В. Скачков*

*Донской Государственный Технический Университет*

**Аннотация:** Рассматривается исследование в области проектирования стержневых конструкций ферм из тонкостенных стержней, а именно предварительный анализ методом конечных элементов модели тонкостенного профиля с полками объемного фасонного элемента. Достижение при анализе модели соответствующих целей испытания. Определение погрешности измерений и результатов, полученных при расчете. Выполнение корректировки модели. В данной работе по результатам расчета приняты места крепления тензорезистора вблизи от фасонного элемента. Были введены в расчетную модель ограничения перемещений для уточнения результатов между расчетами и результатами эксперимента. Получены результаты исследования профилей.

**Ключевые слова:** стержневые конструкции, тонкостенный профиль, метод конечных элементов.

### Результаты теоретических и экспериментальных измерений

Результаты расчетов конструкций из тонкостенных профилей методом конечных элементов надлежит проверить, проведя исследования в определенном порядке. Чтобы установить направление действия напряжений в профиле, необходимо построить и выполнить предварительный анализ методом конечных элементов модели (рис.1). Это позволит безошибочно выбрать места крепления тензорезисторов и достичь при анализе модели соответствующих целей испытаний.

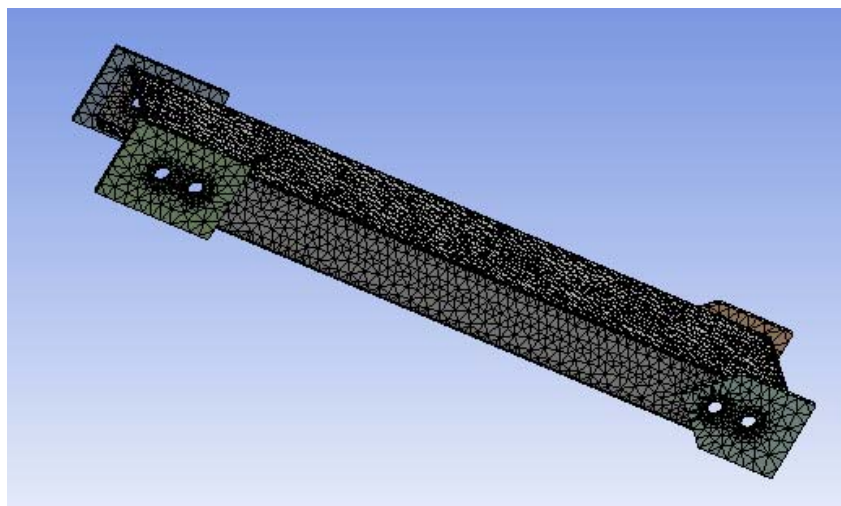


Рисунок 1. Модель тонкостенного профиля с полками объемного фасонного элемента

После проведения натурных испытаний и выполнения измерений напряжений в контрольных точках определяется погрешность измерений и результатов, полученных при расчете. Далее следует установить причины, повлекшие за собой несоответствие этих данных. После этого необходимо выполнить корректировку модели.

При разработке плана испытаний необходимо иметь в виду возможность появления дополнительных работ по корректировке расчетной схемы исследуемой конструкции. Дело в том, что при расчете методом конечных элементов на отдельные стержни задаются конкретные однонаправленные нагрузки. Определить величину усилия и направления этих усилий в стержне, кроме основных, которые будут возникать в стержне, заранее затруднительно, так как это зависит от множества факторов.

Значения в элементах могут изменяться из-за перемещения ригеля и фактического перераспределения усилий в стержнях конструкций. При анализе работы элемента с помощью МКЭ определяется место на профиле, наиболее подверженное деформациям. Это место вблизи фасонного элемента, так как при работе тонкостенного элемента открытого сечения возникают крутильные и изгибные деформации. В модели необходимо точно определить места закрепления элементов, тип и точки приложения нагрузки и установить ограничения перемещений при их необходимости [1-3].

Проанализируем работу двух элементов испытываемой конструкции, у которых при максимальной расчетной нагрузке усилия составляют 35 кН с разными знаками, следовательно, один элемент сжат, другой растянут.

Для предварительного анализа работы элементов и определения мест крепления тензорезисторов построена модель тонкостенного профиля и с закреплением с фасонными элементами с помощью болтов [4], [5].

---

Рассмотрев работу тонкостенного профиля, определяем, что при растяжении и сжатии в элементах появляется разнонаправленные напряжения, что отражено на векторном графике напряжений (рис. 2 б) (рис. 3 б).

На графиках указаны напряжения на поверхности элемента при растяжении и сжатии (рис. 2 а) (рис. 3 а). Значения осевых напряжений на поверхности профиля могут быть искажены из-за возникающих дополнительных деформаций, связанных с кручением и изгибом профиля.

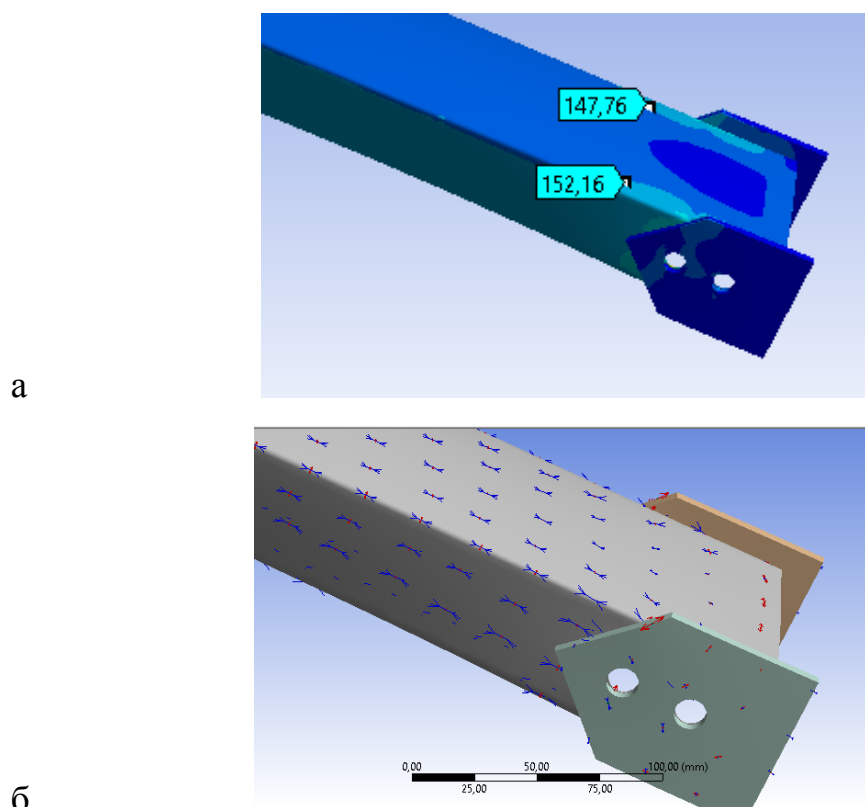


Рисунок 2 Графические результаты статического расчета тонкостенного профиля на сжатие: а – график напряжений; б - векторный график напряжений.

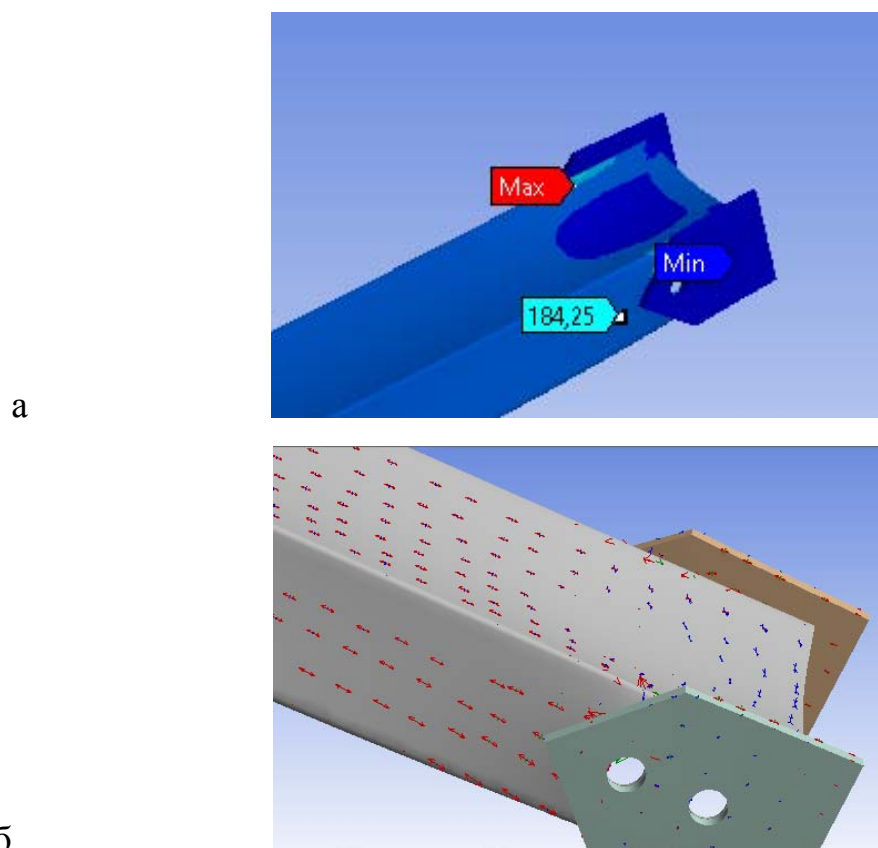


Рисунок 3 Графические результаты статического расчета тонкостенного профиля на растяжение: а – график напряжений; б - векторный график напряжений.

Проанализировав работу тонкостенных профилей с помощью МКЭ на растяжение и сжатие, делаем вывод, что места крепления тензорезисторов следует принять вблизи от фасонного элемента [6]. В этих зонах чаще всего происходят разрушения, что подтверждает ряд исследований разных авторов [7], [8], [9].

В таблице 1 даны напряжения в контрольных точках, полученные при предварительном расчете и эксперименте. Из таблицы видно, что расчетные данные и экспериментальные значительно отличаются друг от друга. Анализ данного несоответствия показывает, что схема подключения тензорезисторов

измеряет однонаправленные деформации сжатия или растяжения и не учитывает деформации изгиба. По сути, измеряются в чистом виде деформации растяжения и сжатия. При предварительном составлении модели в состав общего напряжения входили общие напряжения и напряжения от изгиба.

В расчетную модель методом конечных элементов были введены ограничения перемещений, чтобы исключить дополнительные напряжения от изгиба. [10]. В результате внесенных уточнений разница между расчетами и результатами эксперимента не превышает 6% (рис. 4 а, б).

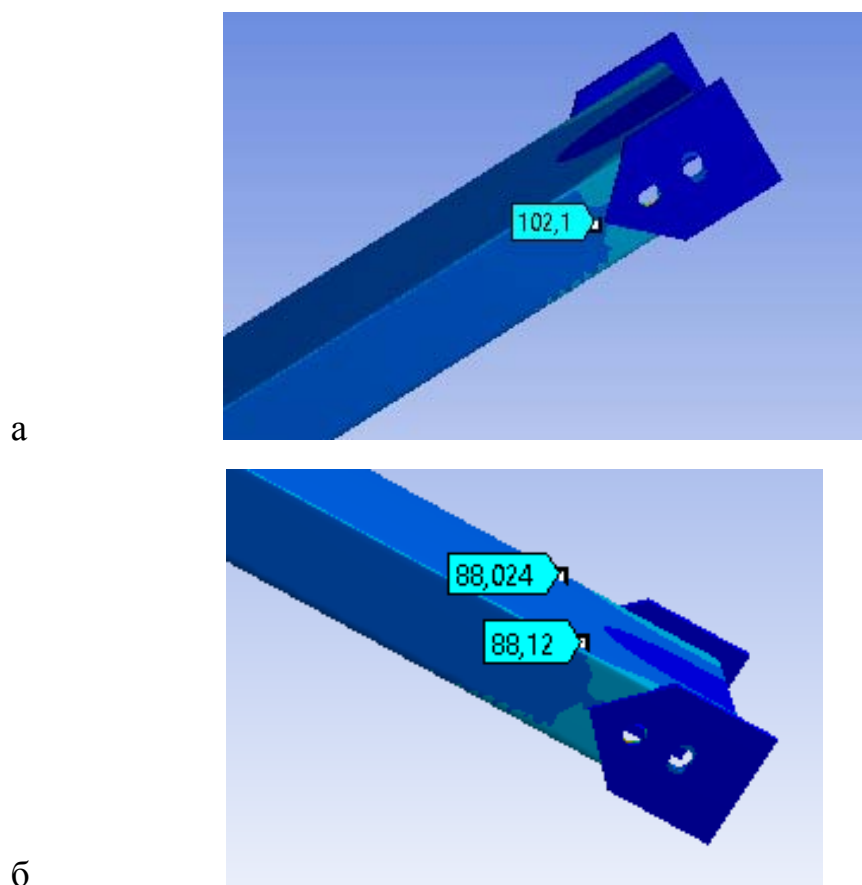


Рисунок 4. Графические результаты уточненного статического расчета тонкостенного профиля: а – на растяжение; б – на сжатие.

Таблица 1 Результаты исследований НДС профилей

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

### Выводы.

1. Разработан метод предварительного анализа, который позволяет более точно оценивать напряженно-деформированное состояние элементов металлоконструкций методом конечных элементов.
2. Полученные данные натуральных испытаний показали разницу 6% с данными метода предварительного анализа, что является высокой точностью.

### Литература

1. Осокин А. В. Развитие метода конечных элементов для расчета систем, включающих тонкостенные стержни открытого профиля / дисс. на соиск. учен. степ. к.т.н. Спец.: 05.23.17. М., 2010. 134 с.
2. Li Z., Ádány S. and Schafer, B.W. Modal identification for shell finite element models of thin-walled members in nonlinear collapse analysis // ThinWalled Structures, Volume 67, June 2013, pp. 15-24.
3. The finite element method for thin-walled members-applications / Sarawit A. T, Kim Y., Bakker M. C M., Pekoz T. // Proceedings of the 3rd ICTWS. 2001. Pp. 437-448.

4. Пат. 2329359 РФ. Болтовое соединение тонкостенных элементов / Кузнецов И.Л., Вишневский В.А., Тухватуллин А.А. // Бюл. – 2008. – №20.
5. Лалин В.В., Рыбаков В.А., Морозов С.А. Исследование конечных элементов для расчёта тонкостенных стержневых систем // Инженерно-строительный журнал. - 2012 - №1. - С. 53-73.
6. Устименко Е.Е., Скачков С.В. Использование тензодатчиков при определении напряженно-деформированного состояния шарнирно-стержневой рамы // Инженерный вестник Дона, 2019, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2019/5834](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2019/5834).
7. 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.
8. 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 - 22 с.
9. 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 - 23 с.
10. Смазнов Д. Н. Конечно-элементное моделирование работы жестких вставок тонкостенных холодноформованных стальных профилей // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2011. № 67. С. 101-113.

### References

1. Osokin A. V. Razvitie metoda konechnyx elementov dlya rascheta sistem, vklyuchayushhix tonkostennye sterzhni otkrytogo profilya [Development
-

of the finite element method for calculating systems including thin-walled open profile rods]. Diss. na sosik. uchen. step. k.t.n. Specz: 05.23.17. M., 2010. 134 p.

2. Li Z., Ádány S. and Schafer, B.W. ThinWalled Structures, Volume 67, June 2013, pp. 15-24.

3. Sarawit A. T, Kim Y., Bakker M. C M., Pekoz T. Proceedings of the 3rd ICTWS. 2001. Pp. 437-448.

4. Pat. 2329359 RF. Boltovoe soedinenie tonkostennyx elementov. [Bolted connection of thin-walled elements]. Kuznecov I.L., Vishnevskij V.A., Tuxvatullin A.A. Byul. 2008. №20.

5. Lalin V.V., Rybakov V.A., Morozov S.A. Inženerno-stroitelnyj zhurnal. 2012. №1. pp. 53-73.

6. Ustimenko E.E., Skachkov S.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2019, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2019/5834](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2019/5834).

7. 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.

8. Tarasov, A.V. Eksperimental`no-teoreticheskie issledovaniya ramnyx 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. 22 p.

9. 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. 23 p.

10. Smaznov D. N. Politematicheskij setevoj elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Finite element





modeling of rigid inserts of thin-walled cold-formed steel profiles]. 2011. № 67.  
pp. 101-113.