

## МКЭ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ОЦИНКОВАННЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ОТКРЫТОГО СЕЧЕНИЯ ТИПА «СИГМА»

И. В. Зинкевич, А. Ю. Юзвенко

### Аннотация

Проектирование тонкостенных стальных конструкций в соответствии с ТКП EN 1993-1 предполагает возможность использования конечно-элементного анализа. При этом модели и средства для анализа должны давать результаты, адекватно отражающие работу конструкции.

В статье приводится описание конечно-элементных моделей для изгибаемых элементов из тонкостенных профилей типа «Сигма» и дано сопоставление основных результатов с другими методиками и экспериментальными данными.

### Abstract

The design of thin-walled steel structures in accordance with ТКП EN 1993-1 suggests the possibility of using finite element analysis. At the same time, models and tools for analysis should give results that adequately reflect the work of the structure.

The article describes the finite-element models for bending elements from thin-walled «Sigma» profiles and compares the main results with other methods and experimental data.

**Введение.** Для многих типов сечений тонкостенных холодногнутых профилей отсутствуют или недостаточно проработаны упрощенные модели для проверки их прочности и устойчивости. В этих случаях нормами [2] рекомендуется производить проектирование на основе испытаний, что требует достаточно длительного промежутка времени и средств. Альтернативой проектированию на основе испытаний представляется моделирование и расчет элементов таких профилей на основе метода конечных элементов (МКЭ). В то же время подчеркивается, например, в [1], что адекватность таких моделей должна быть проверена экспериментально. Такие задачи должны решаться в геометрически нелинейной постановке и, если требуется, с учетом физической нелинейности работы материала и несовершенств.

**Моделирование тонкостенных изгибаемых элементов.** Для моделирования и статического анализа использовался NxNASTRAN с графической оболочкой Femap v.11.4.1 [3]. Рассматривалась задача устойчивости плоской формы изгиба трехпролетного ригеля из профиля  $\Sigma$  145x50x3. Граничные условия моделировались приближенно к действительным условиям работы ригеля в конструкции. Это имеет важное значение не только с точки зрения напряженно-деформированного состояния элемента в целом, но и в случае решения задачи в физически нелинейной постановке крепление конструкции в одном узле приводит к высокой концентрации напряжений в локальной зоне и раннему выходу из строя всей модели.

Моделирование ригеля производилось оболочечными конечными элементами типа «plate», этот тип элементов является предпочтительным для моделирования тонкостенных конструкций, так как позволяет автоматически учитывать все проявления потери местной устойчивости пластин ригеля и формы сечения. Задачи решались в нелинейной постановке. На рисунке 1 показана конечно-элементная модель части ригеля с имитацией крепления его болтами. Граничные условия создавались ограничением перемещений по узлам сетки конечных элементов на границе отверстий для крепежных болтов. Расчеты производились в несколько этапов. На первом этапе расчет производился в линейной упругой постановке. Нагрузка принималась равной расчетной и моделировалась системой сосредоточенных сил в местах ее приложения.

Анализ результатов расчета показал, что ригель изначально испытывает при изгибе деформации закручивания. Это объясняется несовпадением точки приложения равнодействующих сил от внешней нагрузки с центром изгиба сечения.

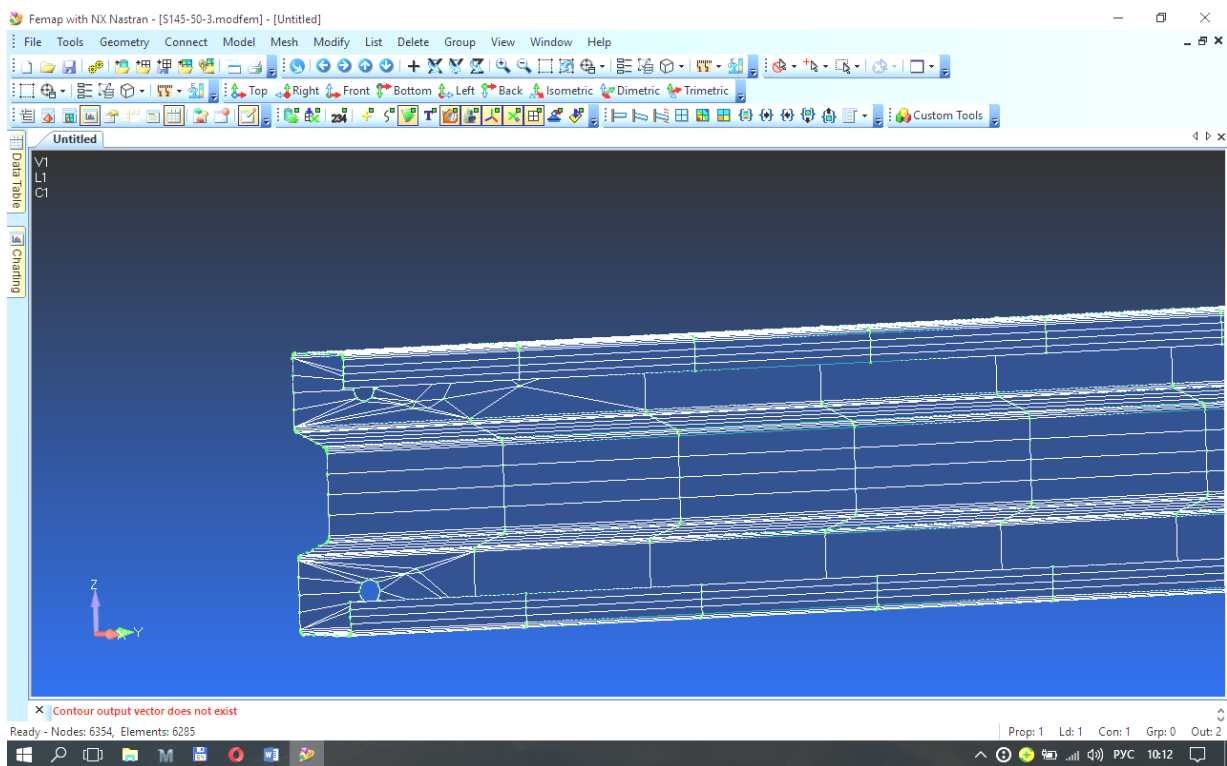


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель ригеля с имитацией крепления его болтами

На втором этапе производился анализ упругой устойчивости ригеля (buckling). На рисунке 2. показана первая форма потери устойчивости.

Из рисунка видно, что потеря устойчивости происходит по изгибно-крутильной форме, как и следовало ожидать.

Практический интерес представляет нижняя, первая форма потери устойчивости. Как видно из рисунка 2, она происходит при величине коэффициента к внешней нагрузке (Eigenvalue), равном 1.11, при удвоенном значении нагрузки. Что соответствует изгибающему моменту в крайнем пролете ригеля, равному  $M_{cr}=10.834 \text{ кН/м}$ .

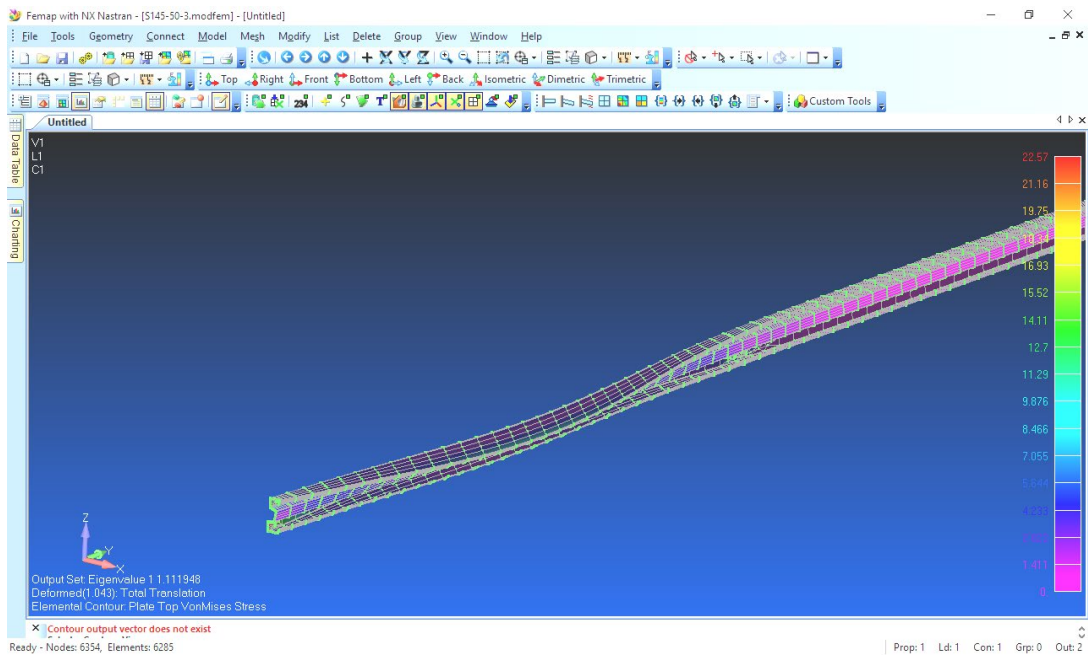


Рисунок 2 – Первая форма потери устойчивости ригеля

Отметим, что рекомендованная в [1] методика определения упругого критического момента дает величину критического изгибающего момента при условии шарнирных промежуточных опор  $M_{cr}=7.69кН/м$ , при ограничении поворота на первой промежуточной опоре -  $M_{cr}=12.31кН/м$ .

На третьем этапе производился расчет модели ригеля с учетом геометрической и физической нелинейности.

На рисунке 3 приведены графики перемещений нижнего узла в середине крайнего пролета ригеля в вертикальной и горизонтальной плоскостях, полученные в Femap.

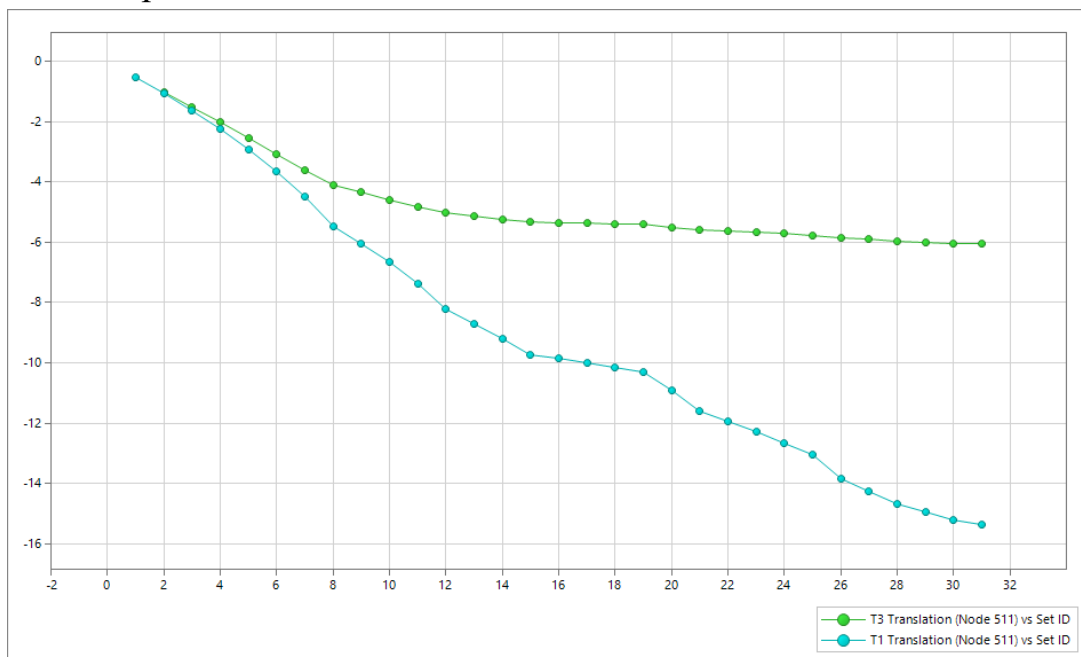


Рисунок 3 – Перемещения нижнего узла в середине крайнего пролета при нелинейном расчете (T3 – вертикальные; T1- горизонтальные)

Исчерпание несущей способности ригеля наступило при коэффициенте 0.633 к удвоенной нагрузке. Это соответствует изгибающему моменту в крайнем пролете ригеля, равному  $M_b=6.18 \text{ кН/м}$ .

### Исследование изгибно-крутильной формы потери устойчивости

Для определения предельного изгибающего момента при изгибно-крутильной форме потери устойчивости используется методика, изложенная в EN1993-1-1[1]. При этом для вычисления понижающего коэффициента  $c_{LT}$  необходимо определить упругий критический момент. Обычно для этого используются уточненные методики, приведенные в британских документах SN003a и SN030a [4].

Отметим, что первый документ используется для балок с двумя осями симметрии, а второй с одной вертикальной осью симметрии. Рассматриваемые в работе профили таким условиям не удовлетворяют.

Для проверки устойчивости балок были созданы две конечно-элементные однопролетные модели. Для профилей  $\Sigma 145 \times 50 \times 3$  и  $\Sigma 180 \times 70 \times 2.5$  (рисунок 4).

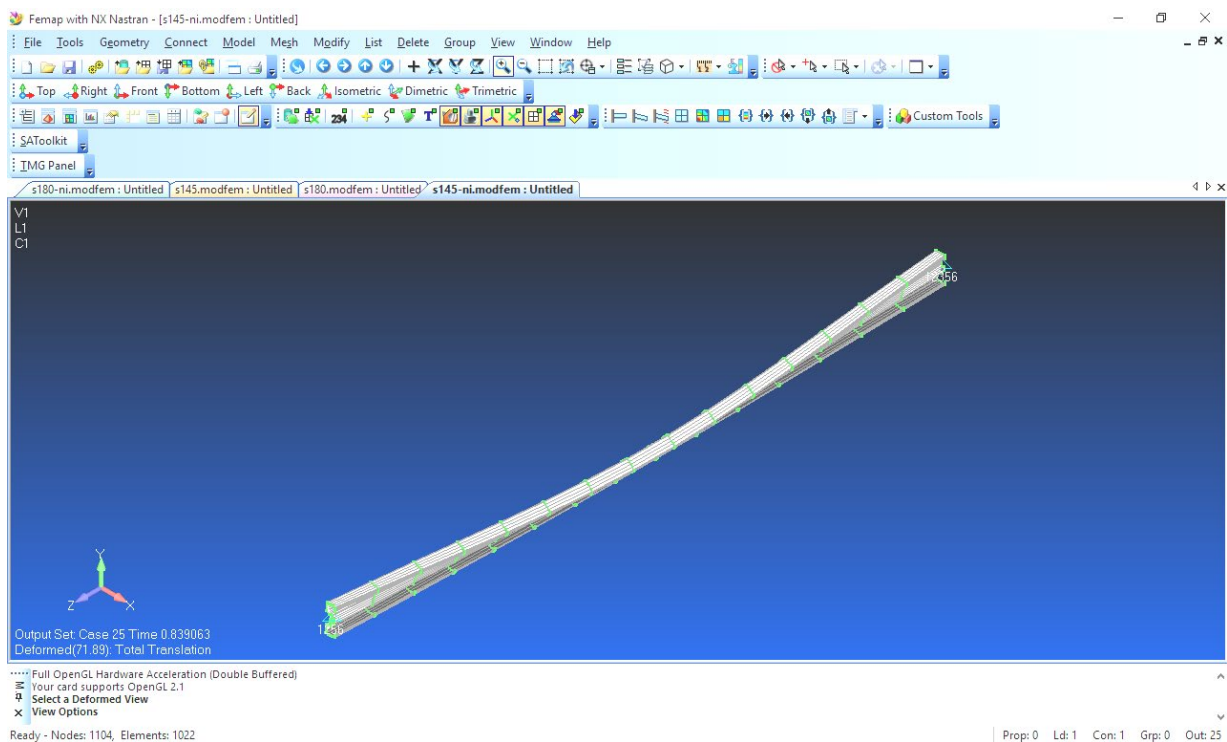


Рисунок 4 – Модель для профиля  $S145 \times 50 \times 3$

Для создания идеальных граничных условий использовались конечные элементы типа «rigid», которые объединяли узлы по торцам ригелей с мастер – узлами. Полученные значения упругих критических моментов составили соответственно 6.47 кН\*м и 7.36 кН\*м.

Для уточнения расчета были разработаны модели ригелей с учетом погиби их из плоскости изгиба. Величина погиби принималась по действующим документам, учитывающим максимальные искривления стальных балок, равной 1/750 пролета. Продольная ось элемента принималась по дуге окружности. Полученные значения предельных моментов составили соответственно 5.43 кН\*м и 6.42 кН\*м.

Полученные результаты численного моделирования сопоставлялись с результатами экспериментальных исследований, проведенных в испытательном корпусе БрГТУ, и расчетов по другим методикам. Основные результаты показаны в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1 – АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗГИБНО-КРУТИЛЬНОЙ ФОРМЫ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ

Обозн.	Изм.	$\Sigma 140 \times 50 \times 3$	$\Sigma 180 \times 70 \times 2.5$	Примечание
$F_y$	МПа	360	360	Предел текучести
$M_{Rd,e}$	кН*м	12.11	17.89	Предельный упругий момент
$M_{Rd,pl}$	кН*м	15.08	21.56	Предельный пластический момент
$M_{cr}$	кН*м	6.13	7.45	Упругий критический момент по SN003a
$\lambda_{LT}$		1.5	1.55	Приведенная гибкость по EN 1993-1-1
$c_{LT}$		0.315	0.3	К-т снижения прочности по EN 1993-1-1
$M_{LT,Rd}$	кН*м	3.81	5.35	Предельный момент
<b>Численное моделирование Femap - Nastran</b>				
$M_{cr}$	кН*м	6.47	7.36	Упругий критический момент
a	мм	4.29	5.17	Погиб из плоскости в середине L/750
$M_{LT,Rd}$	кН*м	5.43	6.42	Предельный момент
<b>Эксперимент</b>				
$M_{Rd}$	кН*м	-	24.86	Предельный момент

**Выводы.** Разработаны конечноэлементные модели применительно к Femap (Nastran) с учетом геометрической, физической нелинейности и начальных несовершенств, позволяющие численно исследовать изгиб тонкостенных холодногнутой стержней.

Упругий критический момент, определенный по методике SN003a, для симметричных сечений достаточно хорошо совпадает с результатами численных моделей.

Теоретические предельные моменты при потере устойчивости по изгибно-крутильной форме на 20-40% ниже моментов, определенных при численном моделировании с учетом нелинейностей и несовершенств.

Экспериментальный момент сильно отличается от теоретических. Это может быть объяснено удерживающим влиянием приспособлений для нагружения за счет сил трения.

#### Список использованных источников

1. Технический кодекс установившейся практики. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций Ч. 1-1. Общие правила и правила для зданий : ТКП EN 1993-1-1-2009\*. – Минск : Министерство архитектуры и строительства РБ, 2015. – 88 с
2. Технический кодекс установившейся практики. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций Ч. 1-3. Общие правила. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов: ТКП EN 1993-1-3-2009. – Минск: Министерство архитектуры и строительства РБ, 2010. – 114 с.
3. FEMAP user guide. Version 10.3. – Siemens PLM Inc., 2011 – 337 p.
4. NCCI: Elastic critical moment for lateral torsional buckling. SN003a-EN-EU.