

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ
СПЕЦИАЛЬНОСТИ «ПРОМЫШЛЕННОЕ
И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»**

(г. Минск, БНТУ — 24.05.2011)

УДК 624.014.2

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ
НА СЖАТИЕ СТАЛЬНЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ
ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ БЕСКАРКАСНЫХ АРОЧНЫХ
СООРУЖЕНИЙ**

СТАРОВОЙТОВ А.Ф., ЖАБИНСКИЙ А.Н.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

В данной статье освящены вопросы создания пространственной конечно-элементной модели и ее расчета в среде ANSYS с целью определения фактического напряженно-деформированного состояния и эффективной площади поперечного сечения тонкостенных холодногнутых профилей для бескаркасных арочных сооружений.

В настоящее время, в связи с внедрением в Республике Беларусь бескаркасных арочных сооружений из тонкостенных холодногнутых профилей, назрела необходимость разработки технических нормативно-правовых актов, регулирующих процессы их проектирования и возведения. Для этого требуется проведение обширного числа экспериментальных исследований. Моделирование с использованием метода конечных элементов является одной из наиболее эффективных альтернатив физическим испытаниям, которое способно сократить финансовые затраты и сроки проведения исследований.

Сортамент профилей и их геометрические характеристики приняты согласно технических условий организации ООО «Графика» 2214-09 вып. 1 «Гнутые профили для покрытий и стен. Рабочие чер-

тежи». Гибы профиля в результате вальцевания замерены с реальных профилей (оборудование «Сфера», радиус закругления профиля 9,5 м). Тонкостенные холодногнутое арочные профили покрытия (профиль ППА) изготавливаются на оборудовании «Сфера» из рулонной оцинкованной стали толщиной 0,8, 0,9, 1,0, 1,1 и 1,2 мм. В принятом обозначении профиля указан его тип и толщина стали в мм (например, для толщины 0,8 мм – ППА-0,8). Последовательность изготовления профилей показана на рисунке 1.



1. Заправка рулонной стали в прокатный стан



2. Прокатка прямого (стенового) профиля



3. Установка стенового профиля в гибочный стан



4. Вальцевание стенового профиля для придания ему требуемого радиуса кривизны

Рис. 1 – Последовательность изготовления тонкостенных холодногнутое профилей для бескаркасных арочных сооружений

Необходимость проведения исследований обусловлена тем, что геометрические размеры рассматриваемых профилей выходят за рамки области применимости ТКП EN 1993-1-3-2009 (табл. 5.1 [1]).

Так же в ТНПА отсутствуют указания по учету гибов по длине профиля в результате вальцевания при придании ему радиуса кривизны. Общий вид профиля после вальцевания приведен на рисунке 2.

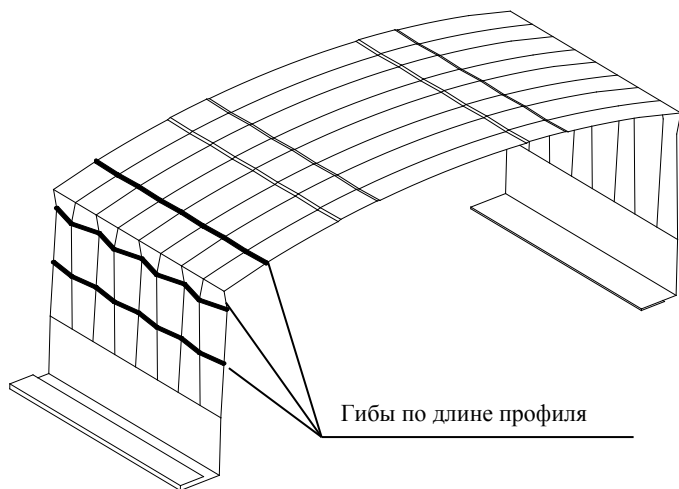


Рис. 2 – Эскиз исследуемого профиля

На рисунке 3 показано поперечное сечение профиля.

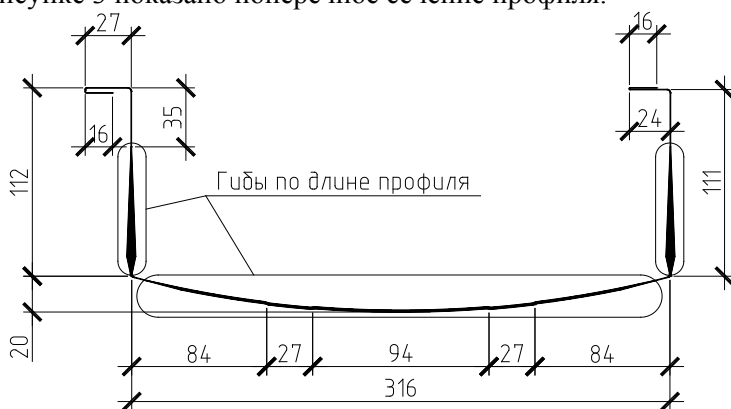


Рис. 3 – Поперечное сечение исследуемого профиля

В среде ANSYS имеется несколько основных типов конечных элементов для статического анализа: балочные элементы, поверх-

ности, мембраны, тела. При выборе конечного элемента для решения задачи моделирования тонкостенных профилей необходимо применять элементы, обладающие высокой сходимостью при больших деформациях. Наиболее точных результатов при моделировании таких профилей позволяют достичь элементы типов SHELL181 (4-ех узловая оболочка с шестью степенями свободы в каждом узле) и SOLSH190 (8-ми узловая оболочка с тремя степенями свободы в каждом узле) [4].

При построении модели использовался конечный элемент SHELL181. Данный тип элемента хорошо подходит для расчета моделей тонкостенных профилей. Элемент имеет четыре узла и шесть степеней свободы в каждом узле: перемещения в направлении осей X, Y и Z узловой системы координат и повороты вокруг осей X, Y и Z узловой системы координат (см. рис. 4).

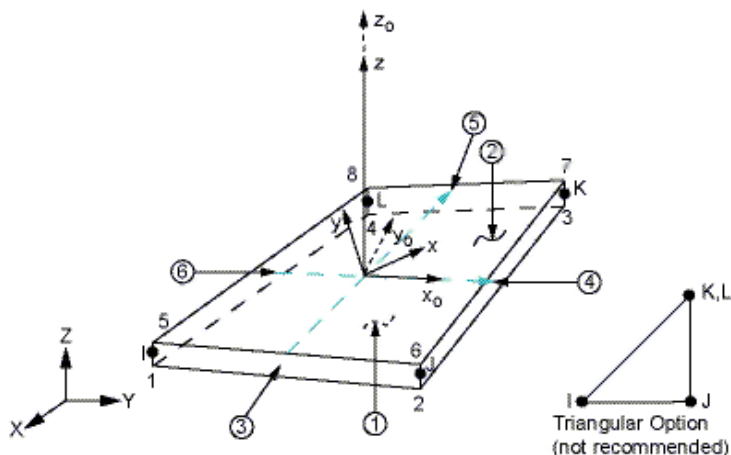


Рис. 4 – Геометрическое определение КЭ SHELL181

В соответствии с указаниями ТКП EN 1993-1-5 учет физической нелинейности материала профиля выполняется путем задания упругопластических свойств стали с линейным углом напряжений в стадии самоупрочнения. При испытании образцов принята сталь С275. В таблице 1 приведены свойства стали.

Таблица 1 – Свойства стали С275 в КЭМ

Наименование	Значение	Диаграмма работы стали
Плотность, кг/м ³	7850	
Модуль Юнга, МПа	2.1e+05	
Коэффициент Пуассона	0.3	
Объемный модуль упругости, МПа	1.75e+005	
Модуль сдвига, МПа	80769	
Предел текучести, МПа	275	
Тангенциальный модуль, МПа	2.1e+03	

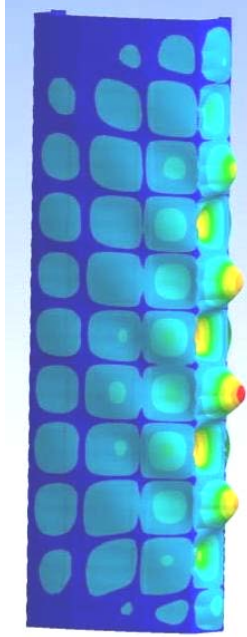
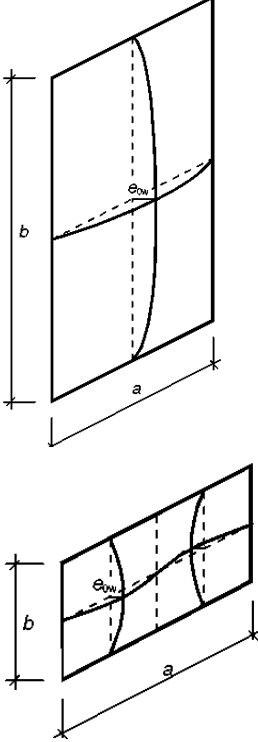
С целью достижения наименьшей несущей способности элемента в процессе моделирования необходимо учитывать начальные несовершенства. Несовершенства подразделяются на два типа:

- a. Геометрические несовершенства – несовершенства, вызванные заводскими дефектами. Данные несовершенства представляют собой несоответствие номинальным геометрическим параметрам реальной конструкции. Данный тип несовершенств допускается применять в форме, соответствующей потере устойчивости пластин в критической стадии с заданной амплитудой выгибов.
- b. Структурные несовершенства – несовершенства, вызванные остаточными напряжениями в процессе производства при изготовлении конструкций, могут быть представлены в виде дополнительных напряжений с амплитудой выгибов, равных средним (предполагаемым) размерам.

Еврокод допускает использовать эквивалентные геометрические несовершенства в случае отсутствия возможности учесть геометрические и структурные несовершенства. Согласно [2] эквивалентные геометрические несовершенства подразделяются на глобальные и локальные. Выбор определяющего эквивалентного геометрического несовершенства зависит от предполагаемой формы потери несущей способности испытываемого образца. При испытании ППА профилей на сжатие в качестве определяющего эквивалентного геометри-

ческого несовершенства выступают локальные несовершенства (см. табл. 2).

Таблица 2 – Эквивалентные геометрические несовершенства при моделировании испытаний профиля на сжатие

Предполагаемая первая форма потери устойчивости	Тип несовершенства	Эскиз формы несовершенства	Величина e_0
	<p>Локальный (выпучивание панели или отсека с короткой стороной a или b)</p>		<p>min ($a/200$, $b/200$)</p>

Процесс моделирования испытания тонкостенных холодногну-
тых профилей на сжатие включает в себя несколько последователь-
ных этапов [4]:

1. Создание трехмерной модели конструктивного элемента на основе номинальных геометрических параметров и упругой работы материалов.
2. Генерация сетки конечных элементов.

3. Задание граничных условий, загрузка конструктивного элемента единичной нагрузкой в виде перемещения центра тяжести опорного сечения.

4. Геометрически и физически линейный статический расчет форм потери устойчивости конструктивного элемента от единичной нагрузки.

5. Экспорт результатов расчета для последующего нелинейного анализа.

6. Определение геометрических параметров профиля с учетом начальных эквивалентных геометрических несовершенств (на основе результатов расчета форм потери устойчивости от единичной нагрузки).

7. Задание нелинейных свойств материалам.

8. Задание граничных условий, загрузка конструктивного элемента нагрузкой (перемещения центра тяжести опорного сечения), величина которой должна превышать предполагаемое значение критической нагрузки.

9. Геометрически и физически нелинейный статический расчет конструктивного элемента.

10. Анализ результатов расчета, определение значений контролируемых параметров.

Были проведены серии испытаний на сжатие ППА профилей путем компьютерного моделирования в среде ANSYS v. 12.1. На рисунке 5 приведено распределение эквивалентных напряжений профиля ППА-1,0, а на рисунке 6 характер разрушения образца в виде потери местной устойчивости полки.

На рисунке 7 показаны графики деформаций образцов при осевом сжатии. Из графиков видно, что вначале наблюдалась, примерно, пропорциональная зависимость между силой и деформацией до определенной критической нагрузки. Затем наступала глобальная для сечения потеря местной устойчивости полки, что выражалось падением прикладываемой нагрузки (падение кривой на рисунке 7).

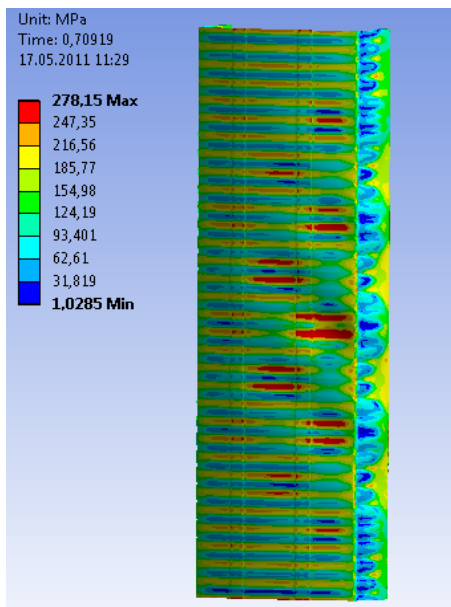


Рис. 5 – Распределение эквивалентных напряжений по поверхности профиля ППА-1,0 в стадии, предшествующей разрушению

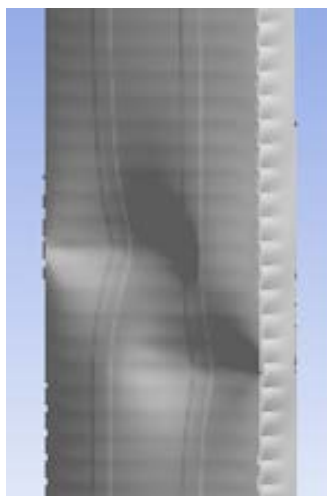


Рис. 6 – Форма разрушения образца

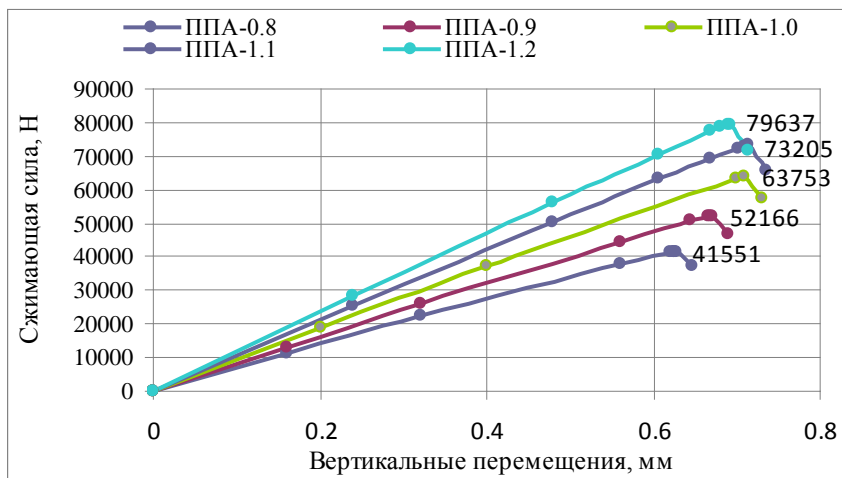


Рис. 7 – График зависимости вертикальных перемещений центра тяжести опорного сечения от сжимающего усилия

В результате проведенных испытаний на сжатие ППА профилей путем компьютерного моделирования была определена их эффективная площадь поперечного сечения. Величина A_{eff} определялась по формуле $A_{eff} = N_{cr} / f_y$, где;

N_{cr} – критическая нагрузка для стадии, предшествующей разрушению образца (см. рис. 7);

f_y – предел текучести стали (см. таблицу 1).

При проведении компьютерного моделирования испытаний учтено снижение несущей способности образцов за счет наличия эквивалентных геометрических несовершенств, В таблице 4 приведены результаты испытаний на сжатие образцов из ППА профилей путем компьютерного моделирования в среде ANSYS v. 12.1.

Таблица 3 – Результаты моделирования

Обозначение профиля	Критическая нагрузка (N_{cr}), Н	Эффективная площадь поперечного сечения при компьютерном моделировании A_{eff} , мм ²	Фактическая площадь поперечного сечения A , мм ²	$\beta = A_{eff} / A$
ППА-0,8	41 551	151	480	0,315
ППА-0,9	52 166	190	540	0,352
ППА-1,0	63 753	232	600	0,387
ППА-1,1	73 205	266	660	0,403
ППА-1,2	79 637	290	720	0,403

Анализ результатов проведенных испытаний показал, что эффективная площадь поперечного сечения находится в пределах $A_{eff} = (0,3-0,4)A$ - площади брутто поперечного сечения холодногнутого тонкостенного профиля типа ППА. В дальнейшем необходимо провести статистическую обработку испытаний с учетом снижения несущей способности профилей за счет наличия допусков на толщину проката, а так же погрешностей модели при моделировании конечных элементов, неточностей моделирования нагрузки и несущей способности. Так же планируется провести серию натуральных испытаний образцов из профиля ППА-1,0 на сжатие для подтверждения достоверности результатов компьютерного моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. ТКП EN 1993-1-3. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-3. Общие правила. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов. – Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2010 – 114 с.
2. ТКП EN 1993-1-5. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-5. Пластинчатые элементы конструкций. – Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2010. – 51 с.
3. Чигарев, А.В. ANSYS для инженеров / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение-1. 2004.
4. Samandasa Wanniarachchi. Flexural Behavior and Design of Cold-formed Steel Beams with Rectangular Hollow Flangs. – Queensland University of Technology, December 2005 – 354 с.
5. Thin-wall structure simulation: International ANSYS Conference, 2-4 May 2006 / CADFEM GmbH, Erke Wang. – Germany 2006. – 51 с.