



А.Н. ЖАБИНСКИЙ,
к. т. н., БНТУ

А.Ф. СТАРОВОЙТОВ,
магистр т. н., БНТУ



МОДЕЛИРОВАНИЕ АРОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

(Окончание. Начало в № 4 — 2012.)

Учитывая тот факт, что при действии сжимающих напряжений для тонкостенных элементов характерны местная потеря устойчивости и потеря устойчивости формы сечения, в компьютерных моделях следует применять геометрию профилей с учетом начальных геометрических несовершенств, представленных в форме глобальных либо локальных выгибов (рис. 5) с амплитудой, определяемой по ТКП EN 1993-1-5.

Методика задания геометрических несовершенств в моделях основана на анализе форм потери устойчивости. Решение задачи сводится к заданию граничных условий и приложению единичной нагрузки. После вычисления усилий, возникающих в элементе от единичной нагрузки, производится анализ форм потери устойчивости, и после чего в геометрической модели задаются данные несовершенства с заданной амплитудой.

На всем протяжении процесса нагружения конструкции следует регистрировать реакции и углы поворота сечений на опорах, перемещения в контрольных точках. Значения данных величин позволяют определить эффективные геометрические характеристики тонкостенных профилей, для чего необходимо выполнение статистической обработки результатов моделирования в соответствии с положениями ТКП EN 1993-1-3, ТКП EN 1993-1-5 и СТБ EN 1990.

При проведении моделирования испытаний арочных профилей за разрушение образцов принималась стадия, при которой было зафиксировано максимальное значение усилия реакции на опоре, после чего проявлялось развитие чрезмерных деформаций вследствие местной потери устойчивости элементов сечения (рис. 6).

Таким образом, процесс моделирования испытаний тонкостенных профилей в общем случае включает в себя несколько последовательных этапов [6]:

- 1) создание трехмерной модели конструктивного элемента на основе номинальных геометрических параметров и упругой работы материалов;
- 2) генерация сетки конечных элементов;

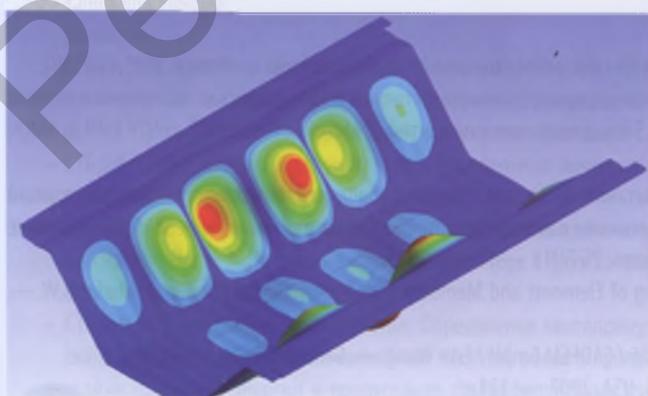


Рис. 5. Геометрические несовершенства в форме локального выпучивания участков полок и стенок профилей шириной 630 мм

- 3) задание граничных условий, загрузка конструктивного элемента единичной нагрузкой;
- 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 геометрических несовершенств;
- 7) задание нелинейных свойств материалам;
- 8) задание граничных условий, загрузка конструктивного элемента нагрузкой;
- 9) геометрически и физически нелинейный статический расчет конструктивного элемента;
- 10) анализ результатов расчета, определение значений контролируемых параметров.

Выполненное компьютерное моделирование испытаний на сжатие и на изгиб профилей шириной 630 мм позволило определить эффективные характеристики поперечного сечения и величину критической сжимающей силы и критического изгибающего момента, воспринимаемых профилем.

Для оценки достоверности полученных результатов было выполнено исследование по определению эффективных площадей поперечного

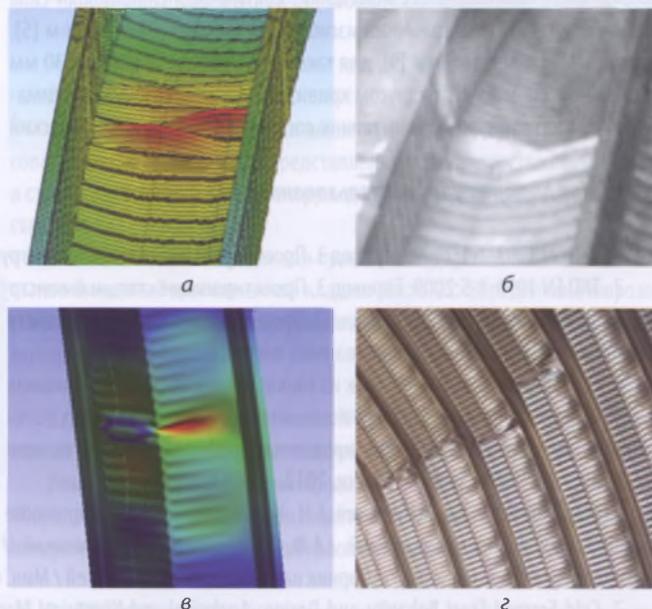


Рис. 6. Формы разрушения профилей шириной 630 мм: а – форма разрушения гофрированного арочного профиля по результатам моделирования испытаний на сжатие; б – форма разрушения натурального гофрированного профиля в составе арочного покрытия; в – форма разрушения гофрированного арочного профиля по результатам моделирования испытаний на сжатие; г – форма разрушения натурального гофрированного профиля в составе арочного покрытия

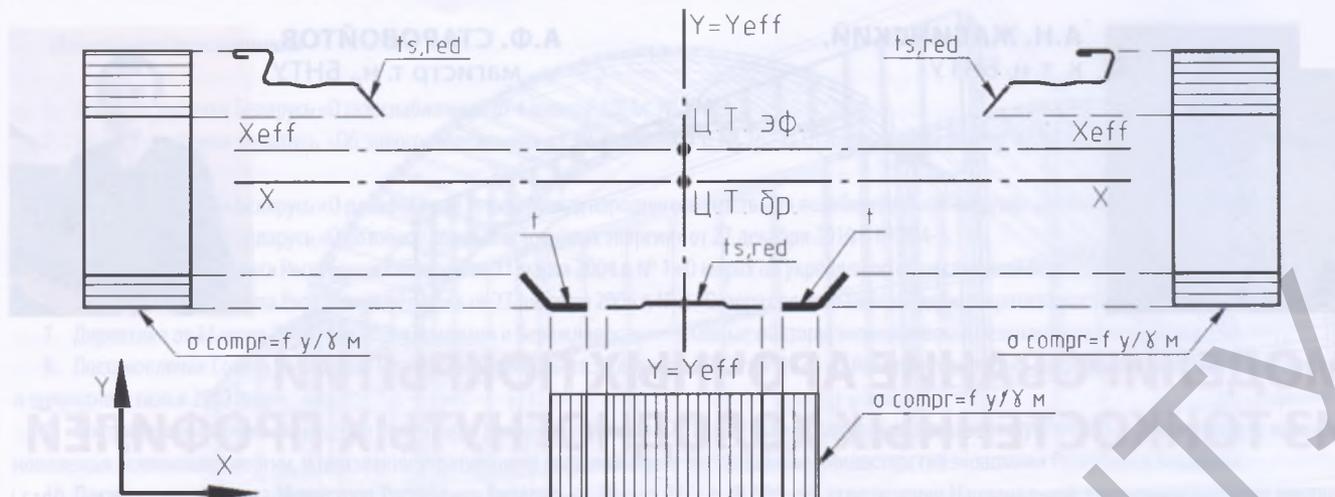


Рис. 7. Эффективное поперечное сечение профиля шириной 630 мм при сжатии: t – расчетная толщина; t_{red} – редуцированная толщина; σ_{compr} – сжимающие напряжения в поперечном сечении профиля; Ц.Т.эф. – центр тяжести эффективного сечения; Ц.Т.бр. – центр тяжести сечения брутто; X-X – центральная ось сечения брутто, параллельная глобальной оси X; Y-Y – центральная ось сечения брутто, параллельная глобальной оси Y; X_{eff} - X_{eff} – центральная ось эффективного сечения, параллельная глобальной оси X; Y_{eff} - Y_{eff} – центральная ось эффективного сечения, параллельная глобальной оси Y

сечения тонкостенного профиля шириной 630 мм и толщиной 1,5 мм в соответствии с ТКП EN 1993-1-3 и методом компьютерного моделирования (МКЭ) для профиля, состоящего из плоских тонкостенных пластин (без гофр), и для профиля с гофрами.

На рис. 7 показана эффективная площадь профиля шириной 630 мм и толщиной 1,5 мм при сжатии, полученная расчетом по методике ТКП EN 1993-1-3.

Анализ результатов выполненных исследований показал, что эффективная площадь поперечного сечения гофрированного профиля шириной 630 мм, полученная путем компьютерного моделирования, меньше эффективной площади прямого профиля (без гофр), полученной расчетом по ТКП EN 1993-1-3 и методом компьютерного моделирования на 27 % и 32 % соответственно.

Следует отметить, что сравнение данных, полученных при компьютерных испытаниях, с опубликованными данными натурных испытаний, проведенных одной из компаний, свидетельствуют о достоверности результатов компьютерного моделирования. Так, для профиля шириной 630 мм и толщиной 1,5 мм с радиусом кривизны 18,6 м, по результатам проведенных компьютерных испытаний, критическая сжимающая сила составила 84,8 кН, а критический изгибающий момент — 5,16 кН·м [5]. По данным, приведенным в [9], для такого же профиля шириной 630 мм и толщиной 1,5 мм, но с радиусом кривизны 15,2 м, критическая сжимающая сила при натурных испытаниях составила 75,3 кН, а критический

изгибающий момент — 4,91 кН·м. Приведенные данные сопоставимы, расхождение результатов объясняется тем, что при радиусе кривизны арочного покрытия 18,6 м высота поперечных гофр в профилях несколько меньше, чем в профилях радиусом 15,2 м, и, как следствие, гофры оказывают меньшее влияние на несущую способность профиля.

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

- гофры в профилях шириной 303 мм и 630 мм, возникающие при создании кривизны в результате проката их через гибочный стан, значительно снижают эффективные характеристики поперечного сечения;
- компьютерное моделирование испытаний тонкостенных гофрированных профилей для бескаркасных арочных покрытий позволило определить их эффективные характеристики поперечного сечения, которые в дальнейшем могут быть использованы при оценке несущей способности арочных покрытий.

Полученные значения эффективных характеристик поперечного сечения арочных профилей шириной 630 мм с радиусом кривизны 18,6 м и толщиной 1,5 мм методом компьютерного моделирования позволили произвести поверочные расчеты несущей способности двухслойного бескаркасного арочного покрытия пролетом 33,4 м и дать рекомендации по их дальнейшему применению.

Список литературы и использованных источников

1. ТКП EN 1993-1-1:2009. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий.
2. ТКП EN 1993-1-5:2009. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-5. Пластинчатые элементы.
3. ТКП EN 1993-1-3:2009. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-3. Общие правила. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов.
4. Старовойтов А.Ф. Расчет арок из тонкостенных профилей по нормам РБ и EN : дис. маг. техн. наук / А.Ф. Старовойтов. — Минск, 2011. — 109 с.
5. Исследование посредством компьютерного моделирования напряженно деформированного состояния и характеристик поперечного сечения тонкостенных холодногнутых гофрированных профилей М.І.С.240 толщиной 1,5 мм для арочных покрытий, г. Минск: отчет о НИР / БНТУ НИЧ ЦНИИСК; Рук. темы А.Н. Жабинский. — Минск, 2012. — 68 с.
6. Старовойтов А.Ф., Жабинский А.Н. Компьютерное моделирование испытаний на сжатие стальных холодногнутых профилей для конструкций бескаркасных арочных сооружений. / А.Ф. Старовойтов, А.Н. Жабинский // Повышение качества подготовки студентов специальности «Промышленное и гражданское строительство»: сборник научно-технических статей / Мин. образ. РБ БНТУ. — Минск, 2011.
7. Cold-Formed Steel Behavior and Design: Analytical and Numerical Modeling of Elements and Members with Longitudinal Stiffeners / Schafer B.W. — Ph.D. Dissertation, Cornell University, Ithaca, New York, 1997.
8. Thin-wall structure simulation: International ANSYS Conference, 2–4 May 2006 / CADFEM GmbH / Erke Wang. — Germany, 2006. — 51 с.
9. Cosmic Structural Analysis Software. User Guide / M.I.C. Industries, Inc. — VA, USA. 2007. — 121 с.

