

Уласевич В.П., канд. тех. наук, доц.; Жданов Д.А.

(БрГТУ, г. Брест)

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПОЛОГИХ АРОК ИЗ СТАЛЬНЫХ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ТИПА «LEGATO»

Широкое применение тонколистовой оцинкованной стали ($t = 0,75 - 1,50$ мм), поставляемой металлургической промышленностью в стройиндустрию в качестве строительного материала, определило задачу об эффективном ее использовании путем разработки эффективных гнутых профилей, изготавливаемых путем холодного деформирования. Об истории создания эффективного оборудования для изготовления стальных гнутых профилей краткая информация содержится в [1]. Примеры применения стальных трапецидальных гнутых профилей типа «LEGATO» в качестве бескаркасных арочных конструкций покрытий зданий и сооружений, активно развивающихся в США, Китае и странах Западной Европы, а в последнее десятилетие – и в странах СНГ, изложено в многочисленной рекламной и научной литературе международного консалтинга LEGATO International [2].

Цель настоящей работы – показать проблемы, возникающие при проектировании бескаркасных конструкций покрытий из стальных трапецидальных гнутых профилей типа «LEGATO» (СТП LEGATO) и пути их решения.

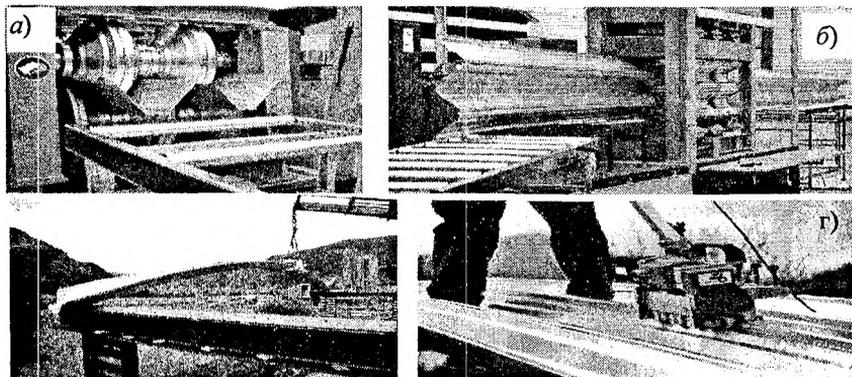


Рис. 1. Технология изготовления быстровозводимого покрытия из СТПП:
 а – прокатка прямолинейного профиля из листовой стали;
 б – гибка криволинейного стержня; в – монтаж стержня в проектное положение;
 з – соединение стержней между собой

Стальные трапецидальные гнутые профили типа «LEGATO» представляют собой самонесущие криволинейные холодногогнутое настилы, выполненные из тонколистовой оцинкованной рулонной стали заданной ширины и кривизны путем холодного деформирования на специальном оборудовании «Zeman LEGATO» (Австрия) [2]. Соединенные между собой с помощью автоматических заклепок или путем закатки кромок с использованием закатной машины (см. рис. 1), такие профили образуют гибкий арочный свод заданного криволинейного очертания (рис. 2).

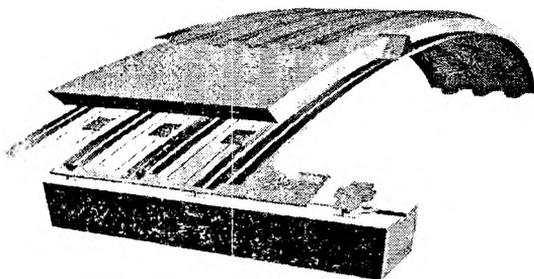


Рис. 2. Фрагмент арочного покрытия

В настоящее время в Украине, России и большинстве стран Западной Европы строительными фирмами освоены два основных типа профилей, представленных в таблице 1.

Таблица 1

Геометрические характеристики профилей «LEGATO»

Тип профиля	Класс стали	Толщина листа, мм	Мин. радиус, м	Эффективные характеристики				
				A_{ef} , $см^2/м$	i_b , см	I_{ef} , $см^4/м$	$W_{0,ef}$, $см^3/м$	$W_{3,ef}$, $см^3/м$
Legato 70 Ширина рулона 1250 мм	StE 280	0,75	12,0	6,95	2,97	85,97	23,44	23,23
		0,88	10,0	8,96	2,92	101,72	28,19	27,48
		1,00	8,0	10,89	2,89	116,25	32,63	31,41
		1,25	8,0	14,99	2,86	146,52	41,80	39,58
		1,50	8,0	19,20	2,84	176,79	50,63	47,76
Legato 107 Ширина рулона 1500 мм	StE 280	0,75	50,0	9,01	4,20	182,4	34,43	34,43
		0,88	28,0	9,35	4,31	209,6	39,55	39,55
		1,00	15,0	10,83	4,28	239,50	45,19	45,19
		1,25	11,0	15,01	4,18	301,9	56,96	56,96
		1,50	10,0	19,47	4,10	364,30	68,74	67,74

После установки в проектное положение на специальные цилиндрические или неподвижные опоры полученный цилиндрический свод образует

пологое арочное покрытие, обладающее достаточной изгибной жесткостью и способное воспринимать намного большие эксплуатационные комбинации расчетных вертикальных нагрузок, чем прямолинейные стальные профилированные листы из оцинкованной стали. В системе «LEGATO» предусмотрена возможность устройства двухслойной конструкции, между слоями которой укладывается теплоизолирующий материал из минеральных плит. Обычно в двухслойной конструкции функции каждого слоя распределены следующим образом: нижний слой выполняет несущие функции, функцию подвесного потолка и одновременно служит опорой для крепления утеплителя; верхний слой выполняет ограждающие функции (см. рис. 2).

Если необходимо повысить огнестойкость покрытия, то несгораемый утеплитель вместе с нижним слоем подвешивается к верхнему слою, который в этом случае выполняет несущие функции. В этом варианте по исследованиям фирмы Zeman LEGATO огнестойкость покрытия повышается до 90 минут [2].

Кроме того, применение двухслойной конструкции позволяет увеличить жесткость пролетной части покрытия.

Как сказано в [2], размер пролёта здания, перекрываемого по этой технологии, зависит от следующих параметров: типа сечения профилей; пологости системы, определяемой отношением стрелы подъема арки к ее пролету; толщины листовой стали трапецидального профиля арочных элементов. Учитывая нелинейный характер статической работы арочной системы, оценка ее НДС должна выполняться в каждом проекте индивидуально. Примерные размеры максимальных пролётов приведены в разделе Г методической разработки [2].

Следует отметить, что, несмотря на очевидную эффективность СТТП «LEGATO», а также наличие завода металлоконструкций в г. Молодечно, их активное применение сдерживается ограниченными возможностями отечественной нормативной базы, а также недостаточным вниманием к развитию теории и методов деформационного анализа, учитывающего эффекты второго порядка, на необходимость учета которых однозначно указано в [3].

О возможности численного прогноза НДС. Отметим, что опираясь на теорию деформирования гибких стержневых систем [4] актуально разработать эффективный деформационный метод анализа расчетных моделей, предельно близко соответствующих действительному НДС арочных покрытий из СТТП типа «LEGATO», составной частью которого должны быть алгоритм и компьютерная программа, выполняющие функции виртуального инструмента исследователя. Разработанные нами основы такого метода, изложенные в [5] и [6], а также приведенные в таблице 1 эффективные геометрические параметры поперечных сечений профилей «LEGATO» [2], позволили нам выполнить изложенные ниже численные исследования.

Для определения особенностей работы арочных конструкций, выполненных из стальных тонкостенных гнутых профилей типа «LEGATO», исследуем НДС арочного покрытия пролетом 18 м на внешние воздействия согласно Еврокоду.

Параметры исследуемой арки: пролет арки $l = 18$ м; стрела подъёма $f = 1,8$ м (отношение $f/l = 1/10$); превышение пяты арки над уровнем земли $H = 4,9$ м.

Рассчитаем арку на воздействие постоянной, снеговой и ветровой нагрузки.

Постоянное воздействие – равномерно распределенная нагрузка $g_o = 0,39$ кН/м².

Снеговое воздействие. Снеговые нагрузки для постоянных (переходных) расчетных ситуаций определяем по формуле: $S = \mu \cdot C_e \cdot C_r \cdot S_k$ [7] по случаю II:

– правая часть: $\mu_3 = 0,2 + 10 \cdot h/b = 1,2$; $S = 1,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,2 = 1,44$ кН/м²;

– левая часть: $0,5\mu_3 = 0,6$; $S = 0,6 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,2 = 0,72$ кН/м².

Ветровое воздействие. Ветровое воздействие определяем согласно [8] при следующих параметрах: базовое значение скорости ветра $V_b = 24$ м/с; базовая высота $z_e = H + f = 4,9 + 1,8 = 6,7$ м; средняя скорость ветра $V_m(z_e) = c_r(z_e) \cdot c_o(z_e) \cdot v_b = 0,93 \cdot 1 \cdot 24 = 22,33$ м/с.

Вычисленный коэффициент $c_r(z_e)$, учитывающий тип местности при коэффициенте местности $k_r = 0,19$ и параметре шероховатости $z_0 = 0,05$, равен $c_r(z_e) = 0,93$. Пиковое значение скоростного напора ветра $q_p(z_e)$ при вычисленной интенсивности турбулентности $I_v(z_e) = 0,2$ равно $q_p(z_e) = 0,75$ кПа.

Аэродинамические коэффициенты внешнего давления в зонах А, В, С:

$$c_{pe,10}^A = -0,57; c_{pe,10}^B = -0,80; c_{pe,10}^C = -0,40.$$

Тогда внешнее ветровое давление на арочное покрытие равно:

$$w_e^A = q_p \cdot c_{pe,10}^A = 0,757 \cdot (-0,98) = -0,432 \text{ кПа};$$

$$w_e^B = q_p \cdot c_{pe,10}^B = 0,757 \cdot (-0,83) = -0,606 \text{ кПа};$$

$$w_e^C = q_p \cdot c_{pe,10}^C = 0,757 \cdot (-0,4) = -0,303 \text{ кПа}.$$

Сочетания воздействий, принятые при анализе расчетных моделей арки из СТГП системы «LEGATO», представлены в таблице 2. Наибольшие напряжения и деформации выявлены для 5-го сочетания нагрузок.

Таблица 2

Расчетные сочетания воздействий

Сочетания	Расчетные значения воздействий				
	постоянное	снеговое (случай I)	снеговое (случай II)	ветровое слева	ветровое справа
1	$\gamma_{G1,sup} G_{kj,sup}$	$\gamma_{Q,s} Q_{k,SI}$			
2	$\gamma_{G1,sup} G_{kj,sup}$		$\gamma_{Q,s} Q_{k,SII}$		
3	$\gamma_{G1,inf} G_{kj,inf}$			$\gamma_{Q,w} Q_{k,w}$	
4	$\gamma_{G1,sup} G_{kj,sup}$	$\gamma_{Q,s} Q_{k,SI}$		$\gamma_{Q,w} \psi_0 Q_{k,w}$	
5	$\gamma_{G1,sup} G_{kj,sup}$		$\gamma_{Q,s} Q_{k,SII}$	$\gamma_{Q,w} \psi_0 Q_{k,w}$	
6	$\gamma_{G1,sup} G_{kj,sup}$		$\gamma_{Q,s} Q_{k,SII}$		$\gamma_{Q,w} \psi_0 Q_{k,w}$

Примечание. $\gamma_{G1,sup} = 1,10$; $\gamma_{G1,inf} = 0,90$; $\gamma_Q = 1,50$; $\psi_0 = 0,6$ – для ветрового воздействия.

Оценка НДС арочного покрытия пролетом 18 м с учетом [9]

f/l	Профиль		Деформационный расчет (DROGS)				Линейный расчет (Lira)				Оценка результатов, %	
	Тип	$L, \text{мм}$	$N_{\text{max}}, \text{кН}$	$M_{\text{max}}, \text{кНм}$	$\sigma_{\text{max}}, \text{МПа}$	$u_{\text{max}}, \text{мм}$	$N_{\text{max}}, \text{кН}$	$M_{\text{max}}, \text{кНм}$	$\sigma_{\text{max}}, \text{МПа}$	$u_{\text{max}}, \text{мм}$	$\Delta\sigma$	Δu
1/10	L 70	1,25	18,63	10,11	254,294	252,4	18,214	5,817	151,313	122,7	51,8	99,79
		1,50	18,51	8,82	183,944	173,8	18,215	5,816	124,360	101,6	44,8	99,74
1/10	L 107	0,88	18,47	8,11	224,811	131,7	18,201	5,833	166,951	87,0	61,3	99,53
		1,00	18,45	7,69	187,251	107,5	18,202	5,832	145,862	76,1	59,3	99,45
		1,25	18,35	7,14	137,664	77,16	18,204	5,83	114,480	60,3	56,2	99,27
		1,50	18,31	6,87	109,302	60,68	18,205	5,828	94,134	49,9	54,4	99,10

Деформационный расчет выполнен в авторской программе DROGS, линейный – в ПК Lira. В таблице 3 приведены расчеты арок с $f/l = 1/10$. Аналогично определялись нагрузки и выполнены расчеты арочных покрытий со стрелой подъема $f = 1,5 \text{ м}$ и $1,2 \text{ м}$ (отношение $f/l = 1/12$ и $1/15$ соответственно).

Результаты расчета для покрытия, выполненного из профиля Legato 107, при толщине листа $1,5 \text{ мм}$, приведены на рисунке 3.

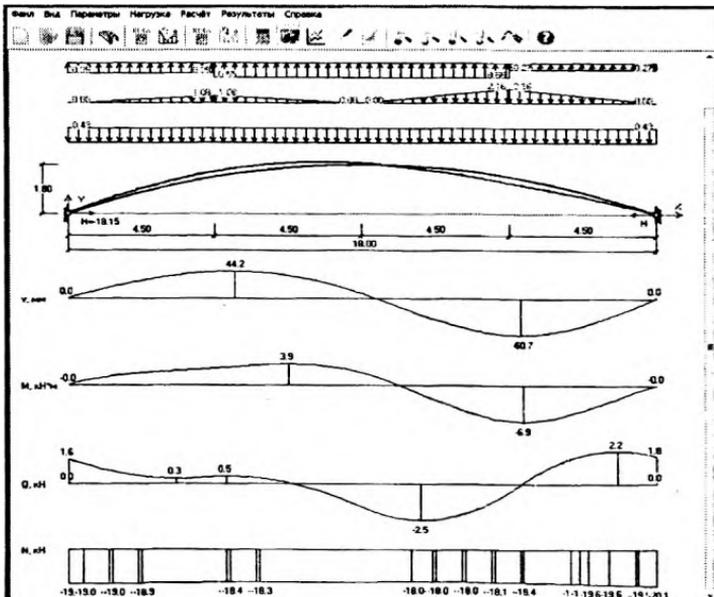


Рис. 3. Основное окно авторской программы DROGS с результатами расчета арочного покрытия из профиля Legato 107 (толщина листа $1,5 \text{ мм}$)

Заключение. Проведенные исследования подтверждают актуальность оценки действительного НДС арочного покрытия из СТПП типа «LEGATO», выполненной по деформационному методу расчета, реализованному в авторской программе DROGS. Результаты расчетов, приведенные в таблице 3, подтверждают возможность определения программой DROGS несущей способности и деформативности арочных покрытий из СТПП типа «LEGATO» с учетом деформированной геометрии (по [3] – учет эффектов 2-го порядка), что способствует обеспечению требуемой надежности и экономичности покрытий зданий при их минимальной материалоемкости.

Литература

1. Оборудование для бескаркасного арочного строительства «СФЕРА» компании «Ажурсталь» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.azhurstal.ru>. – Дата доступа: 10.11.2011.
2. Арочные трапецидальные профили системы LEGATO в Украине [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.zeman.kiev.ua>. – Дата доступа: 21.03.2012.
3. Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций: СТБ ЕН 1990 (EN 1990: 2002, IDT). – Введ. 18.07.2007, № 38. – Минск: М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2007. – 64 с.
4. Уласевич, В.П. Деформационный расчет и исследование напряженно-деформированных состояний пологих однопоясных распорных систем: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 01.02.03 / В.П. Уласевич; ЦНИИСК им. Кучеренко. – М., 1984. – 24 с.
5. Уласевич, В.П. К оценке влияния геометрической нелинейности на напряженно-деформированное состояние арок / В.П. Уласевич, Д.А. Жданов // Вестн. БрГТУ. – 2011. – № 1(67): Стр-во и архитектура. – С. 78 – 83.
6. Уласевич, В.П. Особенности напряженно-деформированного состояния гибких пологих арок из стальных тонкостенных гнутых профилей / В.П. Уласевич, Д.А. Жданов // Вестн. БрГТУ. – 2012. – № 1(73): Стр-во и архитектура. – С. 104 – 110.
7. Воздействие на конструкции. Общие воздействия. Снеговые нагрузки: ТКП EN 1991-1-3 (EN 1991-1-3: 2003, IDT). – Введ. 10.12.2009, № 404. – Минск: М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 48 с.
8. Воздействие на конструкции. Общие воздействия. Ветровые воздействия: ТКП EN 1991-1-4 (EN 1991-1-4: 2005, IDT). – Введ. 10.12.2009, № 404. – Минск: М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 127 с.
9. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1993-1-1 (EN 1993-1-1: 2005, IDT). – Введ. 10.12.2009, № 404. – Минск: М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 93 с.