

Большепролетные надземные пешеходные переходы из легкого холодногнутого стального профиля

Long span footway bridges: coldformed steel cross-section

д.т.н., профессор Ватин Николай Иванович

*ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
декан Инженерно-строительного факультета,
+79219643762,
vatin@mail.ru*

D.Sc, Professor Nikolay Ivanovich Vatin

*Saint-Petersburg State Polytechnical University,
Dean of Faculty of Civil Engineering
+79219643762,
vatin@mail.ru*

аспирант Синельников Алексей Сергеевич

*ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Инженерно-строительный факультет,
+79117066001,
alexey_sinelnikov@mail.ru*

student Alexey Sergeevich Sinelnikov

*Saint-Petersburg State Polytechnical University,
Faculty of Civil Engineering,
+79117066001,
alexey_sinelnikov@mail.ru*

Ключевые слова: надземный пешеходный переход, тонкостенный холодногнутый профиль, расчетная схема, сталь

В статье рассмотрена и предложена методика моделирования расчетной схемы конструкции пролетного строения надземного пешеходного перехода и рассмотрен вопрос о влиянии вида расчетной схемы конструкции на параметры используемых сечений холодногнутого профиля.

На основе актуальности работы поставлена цель - обосновать применимость холодногнутого профиля в качестве несущих элементов пространственной фермы пролетного строения пешеходного перехода

Решен ряд технических задач. Разработано два варианта конструкции пролетного строения с использованием холодногнутого профиля в качестве материала для несущих элементов. На основе разработанных конструкций были построены теоретические модели расчетных схем, учитывающих теорию точности третьего порядка (геометрическая нелинейность). На основе метода конечных элементов выполнена обрисовка расчетных моделей конструкции пролетного строения надземного пешеходного перехода в ПК SCAD Office и SOFiStiK, произведена оценка параметров используемых сечений холодногнутого профиля в зависимости от вида расчетной схемы конструкции [9, 14, 15].

Полученные результаты не противоречат общепринятым зависимостям, используемых при разработке правил проектирования конструкции пролетного строения надземного пешеходного перехода из тонкостенных холодногнутого профиля, известных ранее. Результаты расчета позволили определить коэффициенты использования элементов конструкции по прочности, устойчивости и гибкости (колонна, опорный раскос, верхний пояс фермы).

Произведенная оценка конструктивных схем позволяет сделать правильный и обоснованный выбор расчетной схемы пролетного строения надземного пешеходного перехода в конкретном случае.

Разработанная модель позволяет проводить дальнейшие исследования в области расчета и проектирования конструкций пролетного строения надземных пешеходных переходов на основе тонкостенных холодногнутого профиля: влияние величины пролета на геометрические параметры используемых тонкостенных холодногнутого профиля и вида конструкции пролетного строения и многое другое.

Key words: footbridge, thin-walled cold-formed cross-section, design model, steel.

Article contains finite element analysis of alternative footway bridge structural construction. There is a possibility to increase building-up speed of construction and decrease congestion on a road due to choice of

steel construction technology instead of reinforcement concrete materials used for footbridge. From this point of view we deny so called "wet" works.

Architectural and structural design takes into account the following: built-up environment character, its historic and cultural, architectural and town-planning values; conformation; geologic and hydro geological parameters; organization and safety traffic conditions. Space planning decision takes into account direction of pedestrian traffic and crosswalk pedestrian volume.

Structural design ground is based on purpose to implement new and up-to-date technology that implies to use cold formed and thin walled cross-sections. There are many different engineering constructions that are built-up from thin walled cross-sections. Sometimes such a structural model entirely describes construction (for example, bridge span), in other cases — only important bearing elements of structure. Base difference of thin walled from thick-walled cross-section is concluded in behavior laws: breach of Bernoulli (plane-sections) hypothesis. Simple example is I-section deformation, when the last is loaded on end by bimoment. Deviation from Bernoulli (plane-sections) hypothesis is more characterized for open than for closed thin walled cross-sections. This is taken into account in non-linear analysis of pedestrian bridge structure. Besides analysis according to 3rd order theory also non-linear material models for metallic materials is considered. The applied elastic-plastic-zone theory is based on the interaction of any internal forces and moments.

So, new architectural and structural footway bridge design was modelled and analyzed in the master dissertation. Construction of such a bridge in St.-Petersburg would help not only pedestrian, but also automobilists to get through places with big crosswalk pedestrian volume.

Большепролетные надземные пешеходные переходы из легкого холодногнутого стального профиля

Автомобильная ситуация на дорогах столиц остается по-прежнему напряженной. Пробки, далеко не безопасное пересечение дорог пешеходами, серьезная экологическая обстановка в городах-миллионниках – все это хорошо знакомо каждому водителю и пешеходу. Есть ли решение, которое поможет и тем, и другим? Очевидно, да – решений много. Строительство новых дорог, надземных пешеходных переходов, увеличение полос движения, в Китае, например, вводят ограничения на использование автомобилей с определенными номерами в четные/нечетные дни. Строительство надземных пешеходных переходов поможет не только пешеходам, но и автомобилистам быстрее преодолевать места с большим потоком пешеходов [1]. Отсюда и улучшение экологии за счет уменьшения выхлопных газов – автомобилисту нет необходимости снова разгонять машину, а на малых оборотах расход сжигаемого бензина увеличивается в два с лишним раза.

Кризисные 2009-2010 г.г. дали о себе знать и в данном секторе дорожного строительства. Запланированные на 2009 год объекты были заморожены и перенесены на будущее. Экономическая эффективность и инновационный подход являются теперь критериями, которые становятся весомей в принятии проектных решений, а также получении государственного заказа. В сентябре 2011 года новый губернатор Санкт-Петербурга наметил строительство более 20 надземных пешеходных переходов до 2013 года [2].

Мосты, в том числе пешеходные, образуют особый класс сооружений, на которые не распространяются требования норм проектирования стальных конструкций [3]. Для проектирования мостов исторически сложилась своя форма записи некоторых расчетных положений, своя система нормативных коэффициентов, имеются особенности конструктивного оформления деталей и узлов. Понятно, что общая методология проектирования мостов и других сооружений одина, а все различия объясняются лишь ведомственной разобщенностью. Попытки разработать единые нормы проектирования предпринимались неоднократно, но пока они не увенчались успехом. Поэтому при проектировании мостов следует руководствоваться СП 35.13330.2011 «СНиП 2.05.03-84 Мосты и трубы»* [4].

Конструктивные схемы подобных объектов делятся на [5]:

1. Балочные пролетные строения
2. Рамные, арочные, висячие и вантовые системы

Материалы, применяемые в несущих конструкциях:

1. Железобетон
2. Сталь (сварные сечения, горячий прокат)
3. Сталь (легкие холодногнутые стальные профиля)

В последние годы этой проблеме выбора конструктивной схемы и применяемых материалов уделяется значительное внимание российскими, так и зарубежными исследователями. В отечественной научно-технической литературе до настоящего времени отмечается лишь незначительное количество обобщающих публикаций по данной тематике [7, 14-16].

В нашей стране большую роль в развитии области тонкостенных профилей огромную роль сыграли профессора: Д.И.Журавский, С.П.Тимошенко, В.З.Власов, Э.Л.Айрумян. Определенный вклад внесли работы последних двух десятилетий:

1. Попова Е.Н, Ватин Н.И. Термопрофиль в легких стальных конструкциях. СПбГПУ, 2009[6];
2. Семенов А.С. Ферма из холодногнутой профилей повышенной жесткости с болтовыми соединениями. 2009;
3. Астахов И.В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутой профилей. СПбГАСУ, 2006;
4. Архипенко Ю.В. Методика расчета динамического взаимодействия подвижных нагрузок с мостами с применением программных комплексов конечно-элементного анализа. Москва, 2006 г.

В то же время до сих пор не разработаны решения по применению холодногнутой профилей в пролетных строениях пешеходных переходов.

Правильный, обоснованный выбор конструктивной схемы и материалов для конструкции надземного пешеходного перехода - это еще новый, окончательно не сформировавшийся процесс, не имеющий стройной и глубокой научной основы. Можно говорить только об отдельных, выявленных определенных авторами результатах [20, 23].

Тем самым, следует отметить, что сегодня существует ряд конструкций надземных пешеходных мостов, с использованием различного рода материалов: бетон, сталь [10-13]. Альтернативной конструкцией пролетного строения надземного пешеходного перехода является пространственная ферма с внедрением новой и передовой технологии, заключающейся в использовании холодногнутой тонкостенных профилей.

Правильный, обоснованный подбор и выбор конструкции пролетного строения надземного пешеходного моста и используемых материалов несущих элементов – процесс, который развивается с появлением новых технологий в области строительства. Он станет более определенным и возможным к применению в массовом порядке только в том случае, когда будет приобретен большой опыт производства работ, а количество ошибок при проектировании и расчете подобных конструкций значительно уменьшатся или будут сведены к минимуму.

Невысокая степень распространения в России применения легких стальных конструкций в области малого мостостроения обусловлена, в первую очередь, отсутствием нормативной регулирующей базы. При этом проблема заключается именно в отсутствии нормативной документации (по проектированию, расчету, проверке качества выполненных работ), а не в качестве самих материалов [17, 18, 21].

Несмотря на большое количество выполняемых исследований в этой области, многие вопросы остаются нерешенными, так как большинство строительных объектов отличаются друг от друга и по конструктивной схеме, и по области использования.

В данной статье рассмотрена и предложена методика моделирования расчетной схемы конструкции пролетного строения надземного пешеходного перехода и рассмотрен вопрос о влиянии вида расчетной схемы конструкции на параметры используемых сечений холодногнутой профилей.

Целью исследования являлось обоснование применимости холодногнутого стального профиля в составе несущих элементов пространственной фермы пролетного строения пешеходного перехода [8, 19].

Исходя из указанной цели исследования, были поставлены следующие технические, научная и экономическая задачи:

Технические задачи:

1. Разработать два варианта конструкции пролетного строения с использованием холодногнутой профилей в качестве материала для несущих элементов;
2. Построить теоретические модели расчетных схем, учитывающих теорию точности третьего порядка (геометрическая нелинейность);
3. Определить коэффициенты использования элементов конструкции по прочности, устойчивости и гибкости (колонна, опорный раскос, верхний пояс фермы) [24].

Научная задача:

Выполнить анализ работы двух вариантов конструкций в нелинейной постановке с учетом теории третьего порядка точности (геометрическая нелинейность).

Экономическая задача:

Выявить экономическую целесообразность применения тонкостенных холодногнутой профилей в конструкции надземного пешеходного моста.

При моделировании двух вариантов конструкций пролетного строения надземного пешеходного моста разработаны конечно-элементные модели, анализ напряженно-деформированного состояния которых свидетельствует о работе модели соответствующей общепринятым данным [22].

Исследование проходило в несколько этапов.

Во-первых, на основании полученных результатов рассмотренных вариантов конструкций показано, что оптимизация расчетной схемы путем замены сечений колонн и связей по колоннам на составные сечения из холодногнутого профилей, сокращения количества балок и стоек не ведет к существенному снижению деформационных параметров конструкции по второму предельному состоянию.

Во-вторых, была предложена концепция моделирования конструкции пролетного строения надземного пешеходного перехода, получены напряженно-деформированные состояния и проанализированы значения перемещений в двух постановках решения задачи (линейная/нелинейная с учетом второго порядка точности) для двух вариантов конструкций.

В-третьих, рассмотрено влияние оптимизации расчетной схемы модели №1 с получением новой расчетной схемы модели № 2 на несущую способность и сопротивления устойчивости. Согласно текущим нормам проектирования определили коэффициенты использования элементов конструкции по прочности, устойчивости и гибкости (колонна, опорный раскос, верхний пояс фермы).

Для оценки двух моделей конструкций сравнили коэффициенты использования основных несущих элементов:

1. колонна;
2. опорный раскос;
3. верхний пояс фермы;
4. балка.

Проверка стальных элементов производилась на:

1. Прочность при действии продольной силы;
2. Прочность при совместном действии продольной силы и изгибающих моментов;
3. Устойчивость при сжатии;
4. Устойчивость при сжатии с изгибом в двух плоскостях;
5. Предельная гибкость.

Проверка несущих элементов стальных конструкций для двух моделей исследования согласно текущим нормам проектирования показала, что несущая способность и сопротивление устойчивости элементов (колонна, верхний пояс, опорный раскос, балка) обеспечивается.

Выполненный анализ позволяет сделать вывод о применимости использования составных сечений колонн из холодногнутого профилей в качестве опорных элементов.

На основе выводов предыдущей главы выявим экономическую целесообразность применения тонкостенных холодногнутого профилей в конструкции надземного пешеходного моста. (см. табл.1).

Таблица 1. Ведомость элементов стальных конструкций

		Модель №1			Модель №2					Модель №1		Модель №2	
пп	Наименование элемента	Кол-во, шт.	Сечение	Вес, кг/м	Кол-во, шт.	Сечение	Вес, кг/м	Длина, м	Вес, кг/шт.	Вес, кг	Вес, кг/шт.	Вес, кг	
1	Колонны	4	20K2	46,9	4	275x250x2	21,6	9	422,1	1688,4	194,5	778,0	
2	Верхний пояс	2	250x250x2	22,4	2	250x250x2	22,4	20,4	457,0	913,9	457,5	915,0	
3	Нижний пояс	2	250x250x2	22,4	2	250x250x2	22,4	20,4	457,6	915,1	457,5	915,0	
4	Балки	36	250x2	12,0	20	250x2	12,0	3,2	38,5	1385,9	38,5	769,8	
5	Раскосы (раст.)	16	150x100x2	8,8	16	150x100x2	8,8	3,23	28,3	453,2	28,3	453,1	
6	Раскосы (сж.)	12	150x100x2	8,8	12	150x100x2	8,8	3,23	28,3	339,9	28,3	339,8	
7	Опорные раскосы	6	150x100x2	8,8	6	150x100x2	8,8	3,23	28,3	170,0	28,3	169,9	

8	Стойки	32	150x2	4,1	16	150x2	4,1	3	12,2	390,7	12,2	195,4
9	Связи по НП	34	150x0,8	1,6	34	150x0,8	1,6	2	3,2	108,1	3,2	108,1
10	Связи по колоннам	8	L 160x10	24,7	8	150x100x2	8,1	4,4	108,5	868,4	35,8	286,5
ИТОГО, кг									7233,7		4930,5	

На основе табл. 1 и средним значениям стоимости профилей холодногнутого сечений и горячекатаного проката проведем оценку стоимости двух вариантов конструкций (см. табл.2).

Таблица 2. Стоимость двух моделей конструкций

№ варианта		Вариант №1	Вариант №2
Технико-экономические показатели	Вес сооружения, кг	7233,7	4930,5
	Снижение веса, кг	2303,1	
	Снижение веса, %	32	
	Стоимость холодногнутого элементов (38р.уб./кг), руб.	97158	
	Стоимость холодногнутого элементов (78р.уб./кг), руб.	364797	384581
	ИТОГО, руб.	461955	384581
	Снижение стоимости, руб.	77373	
	Снижение стоимости, %	17	

Предложенная теоретическая модель с применением в качестве опорных элементов колонных двутавров 20К2 горячекатаного проката позволила добиться снижения общего веса конструкции пролетного строения составляет 2,3 т, что составляет 32% от веса конструкции и сократить стоимость на 77 тыс. рублей (на 17%).

Согласно результатам расчета двух вариантов моделей в линейной и нелинейной постановках задачи видно, что применение составных сечений из холодногнутого профилей в составе несущих элементов фермы и опорной части конструкции (колонны, связи по колоннам) обосновано теоретически и экономически. Снижение общего веса конструкции пролетного строения на 32% за счет оптимизации расчетной схемы говорит о возможности уменьшить фундаменты и, тем самым сократить стоимость мокрых работ.

Выводы и рекомендации

1. Разработано два варианта моделей конструкции пролетного строения с использованием холодногнутого профилей;
2. Предложено описание теоретических моделей, учитывающих теорию третьего порядка точности (геометрическая нелинейность) на основе МКЭ в ПК SCAD 11.5, SOFiSTiK 2012;
3. Выполненный анализ позволяет сделать вывод о применимости использования составных сечений колонн из холодногнутого профилей в качестве опорных элементов;

4. Предложенная теоретическая модель с применением в качестве опорных элементов колонных двутавров 20К2 горячекатаного проката позволила добиться снижения общего веса конструкции пролетного строения составляет 2,3 т, что составляет 32% от веса конструкции и сократить стоимость на 77 тыс. рублей (на 17%);

5. Результаты работы имеют большую практическую значимость в области применения холодногнутой профилей в качестве несущих элементов малых мостовых конструкций;

6. Изложенные в работе научные результаты и решения внедрены в ПНИПКУ «Венчур», ООО «БалтПрофиль» и ООО «ПСС».

Задачей дальнейших исследований является проверка подтверждение данных выводов экспериментально.

Разработанная модель позволяет проводить дальнейшие исследования в области расчета и проектирования конструкций пролетного строения надземных пешеходных переходов на основе тонкостенных холодногнутой профилей: влияние величины пролета на геометрические параметры используемых тонкостенных холодногнутой профилей и вида конструкции пролетного строения и многое другое. В свою очередь, произведенная оценка конструктивных схем позволяет сделать правильный и обоснованный выбор расчетной схемы пролетного строения надземного пешеходного перехода в конкретном случае.

В качестве области применения результатов исследования следовало бы отметить проектные институты, бюро, спецификой работы которых являются расчеты малых мостовых конструкций на базе холодногнутого стального профиля.

Литература

1. А. С. Синельников, Н.И. Ватин. Альтернативная конструкция надземного пешеходного перехода. Часть 1. // Журнал «Мир дорог». 2010. №50. С. 2-3.
2. А. С. Синельников, Н.И. Ватин. Альтернативная конструкция надземного пешеходного перехода. Часть 2. // Журнал «Мир дорог». 2011. №58. С. 2-3.
3. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции.
4. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы.
5. Металлические конструкции. В 3 т. Т.3. Специальные конструкции и сооружения: Учеб. для строит, вузов / Под ред. В. В. Горева.-2-е изд., испр. М: Высш. шк., 2002. 544 с.
6. Попова Е. Н, Ватин Н. И. Термопрофиль в легких стальных конструкциях. СПб.: СПбГПУ, 2006. 63 с.
7. Назмеева Т. В. Обеспечение пространственной жесткости покрытия в зданиях из ЛСТК // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 6. С. 12-15.
8. Шатов Д. С. Конечноэлементное моделирование перфорированных стоек открытого сечения из холодногнутой профилей // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3. С. 32-35.
9. Гордеева А. О., Ватин Н. И. Расчетная конечно-элементная модель холодногнутого перфорированного тонкостенного стержня в программно-вычислительном комплексе SCAD Office // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3. С. 36-46.
10. Асташкин М. В. Напряженно-деформированные и предельные состояния в сечениях стержневых элементов стальных конструкций при общем случае статического нагружения: Дис. на соиск. учен. степ. к.т.н.: Спец. 05.23.01. СПб., 2003. 130 с.
11. Ведяков И. И. Выявление резервов несущей способности стальных строительных конструкций на основе совершенствования методов их расчета и рационального применения современных материалов: Дис. на соиск. учен. степ. д.т.н.: Спец. 05.23.01. СПб., 2000. 370 с.
12. Курлапов Д. В., Хомич В. М., Леванов А. В. Метод удельных энергий для определения механических свойств строительных сталей // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 7. С. 11-17.
13. Ульшин А. Н. Обобщенный показатель качества стальных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 7. С. 62-70.
14. Теплых А. В. Применение оболочечных и объемных элементов при расчетах строительных стальных конструкций в программах SCAD и NASTRAN с учетом геометрической и физической нелинейности // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3. С. 4-20.
15. Теплых А. В. Применение оболочечных и объемных элементов при расчетах строительных стальных конструкций в программах SCAD и NASTRAN с учетом геометрической и физической нелинейности // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2011. № 5. С. 57-63.

16. Юрченко В. В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутох профилей в среде «SCAD Office» // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 8. С. 38-46.
17. Kitada T. Considerations on recent trends in, and future prospects of, steel bridge construction in Japan // Journal of Constructional Steel Research. 2006. Vol. 62. Issue 11. Pp. 1192–1198.
18. Gosowski B. Spatial buckling of thin-walled steel-construction beam-columns with discrete bracings // Journal of Constructional Steel Research. 1999. Vol. 52. Issue 3. Pp. 293–317.
19. Улыбин А. В., Кукушкина Г. А. Особенности применения резистивного электроконтактного метода для контроля напряженно-деформированного состояния стальных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 3. С. 32-34.
20. Реконструкция крыш Санкт-Петербурга на основе легких стальных тонкостенных конструкций и антиобледенительной системы /Петров К.В., Золотарева Е.А., Володин В.В., Ватин Н.И., Жмарин Е.Н. // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 2. С. 59-64.
21. Owens G., Wood A. Worldwide use of steel in construction: Strategies for growth // Journal of Constructional Steel Research. 1998. Vol. 46. Issues 1–3. Pp. 32–33.
22. Chenga J., Lib Q. S. Reliability analysis of a long span steel arch bridge against wind-induced stability failure during construction // Journal of Constructional Steel Research. 2009. Vol. 65. Issue 3. Pp. 552–558.
23. Катранов И. Г. Испытания и расчет винтовых соединений легких стальных тонкостенных конструкций на растяжение // Вестник МГСУ. 2010. № 2. С. 89-93.
24. Марченко Т. В., Банников Д. О. Сопоставительный анализ форм потери устойчивости тонкостенных стержневых элементов // Металлические конструкции. 2009. Т. 15. № 3. С. 177-188.