



## К РАЗРАБОТКЕ КОНСТРУКТИВНОГО РЕШЕНИЯ БАЛОК СОСТАВНОГО СЕЧЕНИЯ ИЗ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ

В статье представлено экспериментально-теоретическое исследование конструирования балок составного сечения из стальных тонкостенных профилей с использованием отечественной нормативной литературы.

Балки составного сечения, стальные тонкостенные профили, теоретические расчеты, экспериментальное исследование, рекомендации.

В настоящее время в России еще недостаточен опыт применения тонкостенных стальных конструкций при возведении зданий и сооружений, хотя потребность в быстровозводимых модульных зданиях в стране постоянно возрастает.

Имеющийся зарубежный и отечественный опыт возведения стальных тонкостенных конструкций показал, что в сравнении с традиционными конструкциями, имеющими в своем составе прокатный профиль, преимуществами тонкостенных профилей являются: малый расход металла, стойкость против коррозии за счет использования защитного цинкового покрытия; возможность быстрого построеночного изготовления и снижение затрат на возведение реальной конструкции.

Однако представленная в литературе информация в большей степени освещает типы сечений из тонкостенных сплошных профилей и недостаточно составные сечения из них для перекрытий и покрытий зданий. В технической литературе ограничена информация по конструированию составных балок и ферм.

Такие пробелы связаны в первую очередь с недостаточной разработкой нормативной базы по конструированию тонкостенных конструкций. Выход в свет свода правил СП 260.1325800.2016 [1] по проектированию тонкостенных конструкций дает возможность их разрабатывать и успешно применять в строительстве, но он не рассматривает проектирование составных сечений, использование которых позволит увеличить перекрываемые пролеты зданий и сооружений.

Первые попытки использования составных сечений из тонкостенных профилей были освещены в работе «Ограждающие и несущие конструкции из стальных тонкостенных профилей» [2], где были представлены результаты экспериментального исследования трех типов конструктивного решения балок составного сечения из тонкостенных профилей на крупномасштабных моделях. Первый тип балок имел одностенчатую конструкцию: стенка из стального профилированного листа, имеющего вертикально ориентированные гофры, пояса выполнены из спаренных С-образных профилей высотой 90 мм и толщиной 2 мм. Элементы сечения соединялись самонарезающими винтами диа-

метром 4,8 мм. Основные геометрические характеристики: длина балки – 3200 мм, высота балки по осям – 310 мм, соотношение высоты сечения к пролету – 1/10. Второй тип сечения балок имел двустенчатую компоновку сечения, что обеспечивало улучшение технологичности и трудоемкости изготовления балок. Третий тип балок аналогичен второму, но в отличие от второго имел усиление листами-раскосами в опорной части балки. В работе [2] приводятся результаты натурных испытаний и отсутствует информация о теоретических методах расчета балок.

В статье «Конструктивное решение стальной балки из тонкостенных холодногнутых профилей» [3] представлены результаты численного исследования нескольких вариантов сечения составных балок из тонкостенных профилей, произведен выбор оптимального сечения с учетом редуцирования сечения и проведены натурные испытания балки оптимального сечения. Численные исследования по конструированию балок составного сечения выполнялись автором по зарубежным нормам [4, 5]. Экспериментальные исследования выполнены на балках в натуральную величину. Теоретические расчеты прогиба балок и результаты эксперимента показали хорошую сходимость (4,68–10,5 %). Разрушение балки (предельное состояние) наступило в результате потери местной устойчивости верхней полки в середине пролета.

Все рассмотренные выше публикации основаны на подборе оптимального составного сечения по зарубежным нормам или экспериментальной проверке сечений на крупномасштабных моделях.

Целью настоящего исследования является разработка эффективного сечения балок составного сечения из тонкостенных профилей, выявление возможности использования отечественной нормативной литературы для расчета балок и оценка их несущей способности экспериментальным путем. Особенность работы и расчета таких балок связана с их тонкостенностью и, в связи с этим, с возможной потерей местной устойчивости элементов сечения, что требует использования при расчете редуцированных характеристик сечений взамен геометрических.

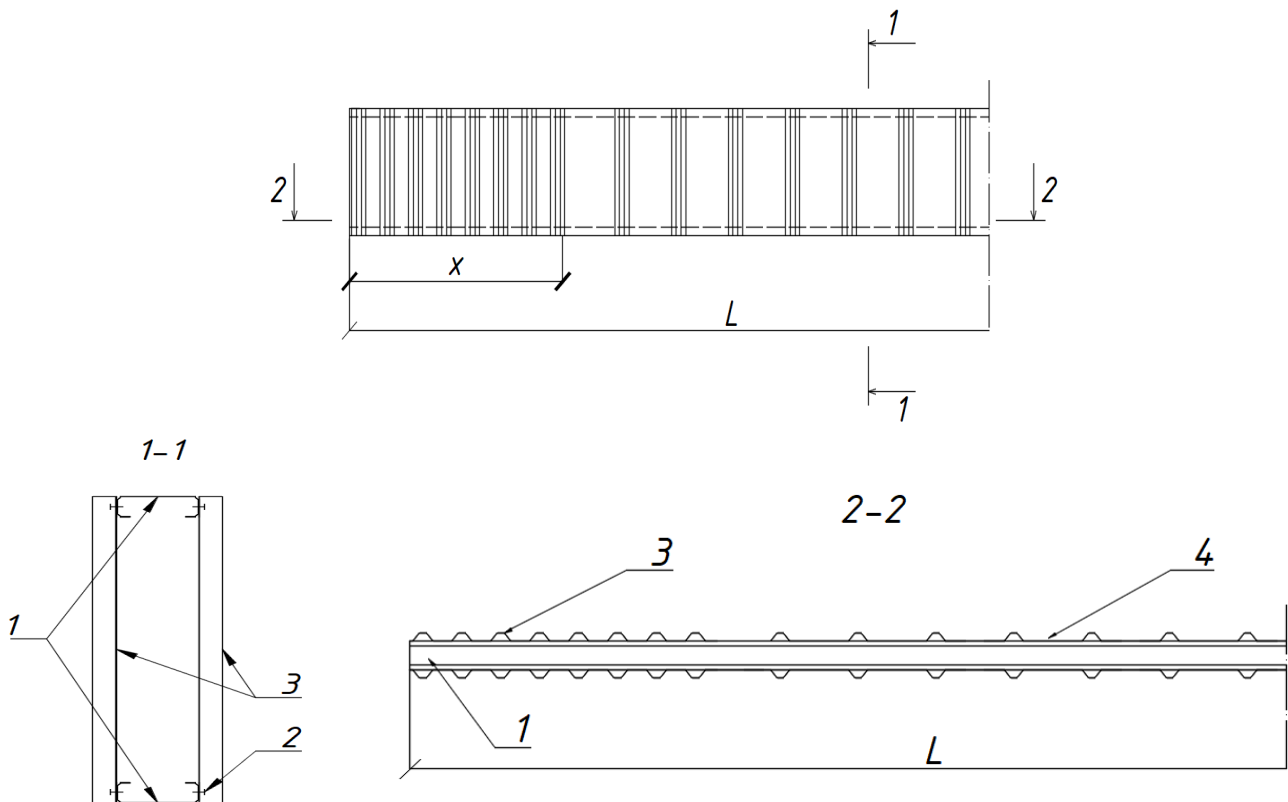


Рис. 1. Составное сечение балки из тонкостенных профилей:  
 1 – полки из одиночных С-образных профилей; 2 – самонарезающие винты;  
 3 – стенка из профилированных листов с малым шагом гофрирования  
 в приопорных зонах; 4 – стенка из профилированных листов  
 с большим шагом гофрирования в середине пролета

В статье рассматривается конструкция коробчатой балки составного сечения из тонкостенных профилей. Балка состоит из двух поясов, которые могут выполняться из С- или П-образных профилей, и стенки из профилированных листов. Используется профлист разного сечения профиля: в приопорной зоне профилированные листы имеют меньший шаг гофров, в пролете – больший, что связано с изменением интенсивности действующих усилий по длине балки. Использование для стенки профилированных листов разного профиля приводит к повышению эффективности сечения составных балок и снижению их металлоемкости.

Профилированные листы с поперечным расположением гофров прикрепляются к поясам самонарезающими винтами. Технология изготовления предложенной конструкции обладает минимальным количеством операций, а также удобна в транспортировке в виде сборочных элементов, что обеспечивает применение таких балок в удаленных районах с неразвитой строительной инфраструктурой.

Предложенная конструкция облегченной балки запатентована [6] и представлена на рисунке 1.

Отличительными особенностями разработанной конструкции балки составного сечения из тонкостенных профилей по сравнению с рассмотренными ранее являются:

- 1) коробчатая форма поперечного сечения;
- 2) полки из одиночных С- или П-образных профилей;
- 3) использование для стенки составной балки профилированных листов с различным шагом гофрирования.

К факторам, обуславливающим особенности работы профилированного листа в составной балке, относят:

- тонкостенность профиля;
- форму гофров;
- несимметричность поперечного сечения;
- значительные различия изгибных жесткостей в сечениях вдоль и поперек гофров;
- начальные несовершенства;
- условия сопряжения;
- ранняя стадия наступления потери местной устойчивости для сжатых широких граней.

В статье используются результаты экспериментально-теоретических исследований, выполненных магистрантом Д.А Каберовым. Для проведения экспериментальных исследований была изготовлена модель балки. Размеры модели балки ограничивались размерами испытательного стенда. Пролет балки принят 1,5 м, высота сечения 250 мм. Для балки использовались тонкостенные профили, профнастил,

самонарезающие винты, имеющие сертификаты качества.

Экспериментальное исследование составного сечения балки из тонкостенных профилей проводилось с целью изучения ее работы под нагрузкой. Основные задачи исследований заключались в оценке жесткости балки коробчатого сечения, потери местной устойчивости ее элементов; анализе совместной работы П-образных поясов со стенкой, выполненной из профилированных листов с разным шагом гофрирования на опорных участках и в середине пролета, сопоставление теоретических и экспериментальных исследований.

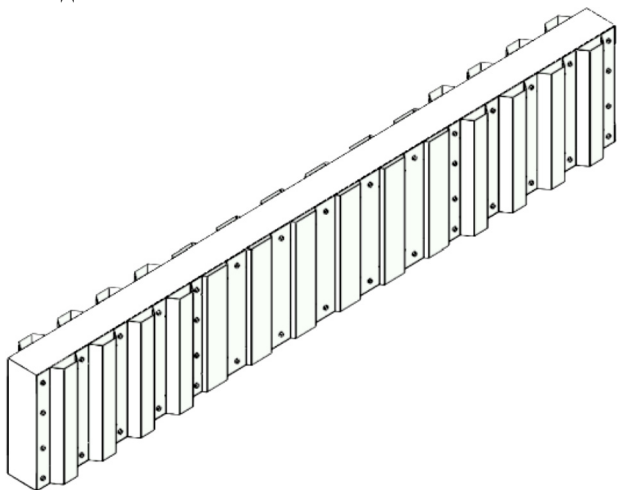


Рис. 2. Общий вид балки составного сечения

Общий вид балки составного сечения приведен на рисунке 2. Верхний и нижний пояса выполнены из тонкостенного профиля ПН 75-40-06 по ТУ [7]. В связи с отсутствием в сортаменте профлистов, имеющих одинаковую высоту и разный шаг гофров, в эксперименте для стенки использовались профлист С21 и С8 по ТУ [8, 9]. Профлист С21 с шагом гофров 100 мм использовался в приопорных зонах как более жесткий, профлист С8 с шагом гофров 115 мм – в середине пролета.

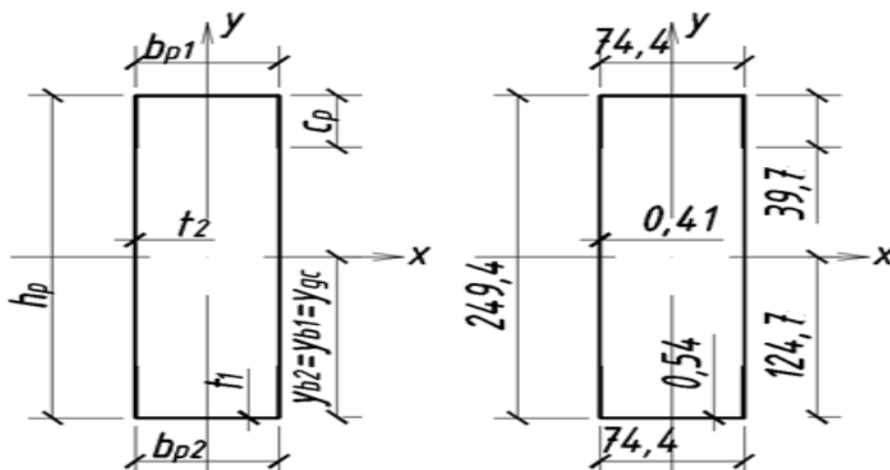


Рис. 4. Составное сечение балки брутто

Теоретическая оценка несущей способности балки проводилась по СП260.1325800.2016 [1].

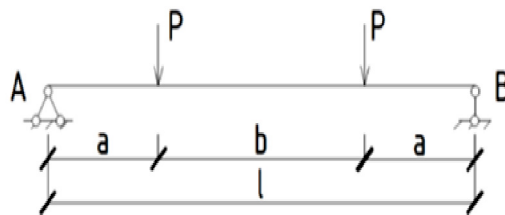


Рис. 3. Расчетная схема балки

Расчетная схема балки приведена на рисунке 3. Она представляет собой однопролетную шарнирно опертую балку, выполненную из стальных тонкостенных профилей и профилированных листов согласно Техническим условиям [5–7] и нагруженную сосредоточенными силами  $P$ .

Предварительно при компоновке сечения составной балки произведена проверка жесткости элементов сечения для исключения преждевременной потери устойчивости самого элемента составного сечения. Отношения ширины и высоты элементов к их толщине не должны превышать максимальных нормативных значений по таблице 7.3 в СП 260.1325800.2016 [1]. Вычисленные соотношения геометрических параметров поперечного сечения для профиля ПН 75-40-06 по [7] и профнастила С8 и С21 толщиной 0,45 мм по [8, 9] выполняются. Проверка влияния зон сгиба на геометрические характеристики сечения показывает возможность пренебрежения закруглениями углов сгиба, поэтому их влияние не учитывается и расчет поперечного сечения выполняется без учета закруглений.

Расчет балки ведется по минимальной жесткости поперечного сечения (сечение между гофрами). Для балки вычисляются редуцированные характеристики:

- эффективная площадь поперечного сечения;
- момент сопротивления эффективного сечения;
- радиус инерции эффективного сечения.

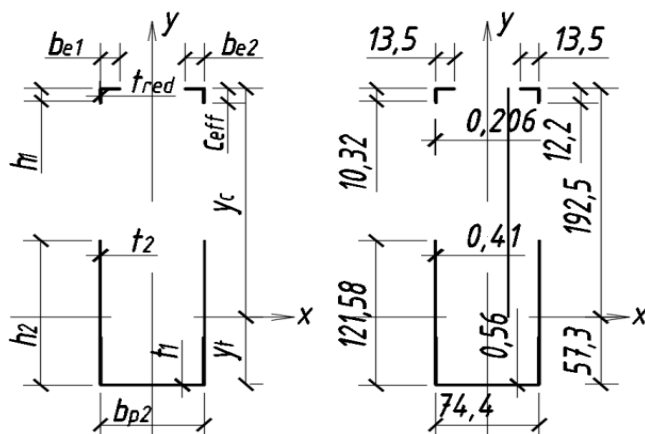


Рис. 5. Теоретическое эффективное составное сечение при изгибе балки

Геометрические характеристики сечения брутто (без учета закруглений) определяются при помощи сателлита программного комплекса Scad «Конструктор сечений». Сечение брутто показано на рисунке 4. Тот же программный комплекс используется для оценки характеристик эффективного сечения составной балки. Эффективное сечение при изгибе балки приведено на рисунке 5.

Численные исследования рассматриваемого сечения балки показывают, что несущая способность принятого сечения исчерпывается потерей местной устойчивости стенки балки вблизи опор. Теоретическое значение нагрузки, при которой происходит потеря местной устойчивости, составляет  $P=1,65\text{кН}$ .

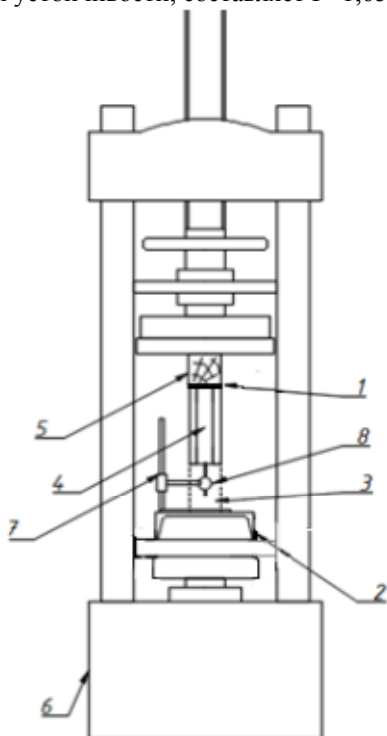


Рис. 6. Схема установки образца на испытательный стенд: 1 – стальные пластины в местах передачи нагрузки; 2 – швеллер; 3 – опора под образцом; 4 – опытный образец – балка; 5 – траверса из бруса (100×100 мм); 6 – гидравлический пресс П-50; 7 – штатив; 8 – индикатор часового типа

На рисунке 6 приведена схема установки опытного образца на испытательный стенд. Опора А и опора В выполняются в соответствии со схемой нагружения. Поворот балки на опорах относительно продольной оси исключается обжатием в испытательной машине. В качестве нагружающего устройства применен гидравлический пресс П-50.

Опытный образец балки в торцах имеет опорные диафрагмы, которые исключают деформации сечения на концах опытного образца, что соответствует его работе в реальных рабочих условиях. Закрепление соответствует расчетной схеме шарнирно-опертой балки, допуская, что можно пренебречь изгибными – стесняющими деформациями крепежных элементов.

На испытательный стенд под опытный образец устраивается основание из швеллера. На швеллере устанавливаются опорные площадки из прямоугольных стальных пластинок, на которые укладывается испытываемый образец балки; усилие, которое создает испытательная машина, передается в виде двух сосредоточенных сил через траверсу (брус 100×100 мм).

Опытный образец нагружается ступенями, которые составляют около 10 % от несущей способности, определенной теоретическими расчетами. Измерение перемещений и деформаций производится на каждой стадии нагружения в характерных местах конструкции. Отсчеты перемещений и деформаций опытного образца снимаются после стабилизации конструкции от очередной ступени нагрузки. Оценка несущей способности балки составного сечения производится по величине сосредоточенных сил по схеме (рис. 3), которые соответствуют факту достижения предельных напряжений, потери устойчивости верхнего пояса или стенки тонкостенной балки, деформаций элементов сечения в области приложения нагрузки. К внешним признакам потери устойчивости тонкостенной балки относятся: потеря базовых плоскостей полок и стенок (потеря происходит из-за напряжений сжатия в верхнем поясе при изгибе либо при выходе из плоскости изгиба под действием внешней нагрузки); образование переломов, складок по углам профиля.

Результаты испытаний сравниваются с расчетом численными методами. В работе экспериментально определена максимальная нагрузка, которую может выдержать балка составного сечения из тонкостенных оцинкованных профилей. Она составляет  $P=3$  кН, при этом происходит потеря местной устойчивости стенки вблизи опоры. Теоретическая нагрузка составляет 1,65 кН. Она меньше экспериментальной в 1,8 раза.

Полученные экспериментальные и теоретические исследования говорят о возможности конструирования составных сечений из тонкостенных профилей, используя расчеты по СП 260.1325800.2016 [1]. Расчеты выполняются в запас прочности.

Учитывая отсутствие в настоящее время в сорimente профилированных листов одной высоты с разным шагом профилирования, рекомендуется доработать технические условия [8, 9] и разработать технологию производства профлиста с разным шагом гофров, что позволило бы конструировать балки составного сечения, заявленные в патенте RU192781 [6], и получать эффективное сечение составных балок из тонкостенных профилей с минимальной материалоемкостью.

### Литература

1. СП 260.1325800.2016. Свод правил. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутого оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования : утверждено Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального

хозяйства РФ 03.12.2016 : введен 04.06.2017. – Москва : ЦНИИПСК им. Мельникова, 2016. – 116 с.

2. Ограждающие и несущие строительные конструкции из стальных тонкостенных профилей : монография / Л. В. Енджиевский, И. И. Крылов, А. Н. Крестинин, А. В. Терешкова. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2010. – 282 с.

3. Фроловская, А. В. Конструктивное решение стальной балки из тонкостенных холодногнутого профилей / А. В. Фроловская, С. Л. Шамбина, Ю. М. Петрова // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2017. – № 1 – С. 7–13.

4. EN 1993-1-3:2006. Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-3: General Rules. Supplementary Rules for Coldformed Members and Sheeting. – Brussels : CEN, 2006. – 134 p.

5. AISI S100-2007. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. – Washington: American Iron and Steel Institute, 2007. – 198 p.

6. Патент 192781 Российская Федерация, МПКЕ04С 3/02, Е04С 3/07. Балка составного сечения из тонкостенных оцинкованных профилей : опубл. 01.10.2019, бюл. № 28 / И. С. Казакова, Д. А. Каберов ; Патентообладатель ФГБОУВО ВоГУ.

7. ТУ 1121-012-04001508-2011. КНАУФ-профили стальные, оцинкованные, тонкостенные.

8. ТУ 1122-002-97492033-2011. Профили стальные гнутые с трапециевидными гофрами С8.

9. ТУ 1122-002-97492033-2012. Профили стальные гнутые с трапециевидными гофрами С21, НС44.

*I.S. Kazakova*  
*Vologda State University*

### ON DEVELOPMENT OF CONSTRUCTION SOLUTION FOR COMPOSITE BEAMS MADE OF THIN-WALLED STEEL PROFILES

The article presents an experimental and theoretical study of the construction of composite beams made of thin-walled steel profiles using Russian regulatory literature.

Composite cross-section beams, thin-walled steel profiles, theoretical calculations, experimental research, recommendations.