

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТЕРЖНЕЙ С ГОФРИРОВАННОЙ (РИФЛЕНОЙ) СТЕНКОЙ

С. С. Коханский, В. П. Уласевич

1. Общие сведения. Стержень – конструктивный элемент, два размера (поперечное сечение) которого имеют существенно меньшие размеры в сравнении с третьим (длиной). Конструктивные системы, состоящие из прямолинейных стержней, соединенных между собой, образуют стержневую систему. Стержень, работающий на поперечный изгиб, называют балкой. Стержень, как конструктивный элемент стержневой системы, испытывающий центральное или внецентренное сжатие (сжатие с изгибом), называют колонной. В общем случае стержни могут образовывать стержневые системы сложной геометрической структуры.

Металлические стержни как конструктивные элементы представляют собой тонкостенные сечения, состоящие из набора соединенных между собой пластинок, образуя поперечные сечения замкнутого или открытого профиля.

Среди многочисленных типов поперечных сечений металлических стержней особое место занимает двутавровое сечение, которое очень хорошо подходит с точки зрения работы материала на изгиб, т. к. при изгибе верхняя полка хорошо работает на сжатие, а нижняя – на растяжение. При этом в стенке напряжения небольшие, поэтому нет смысла изготавливать ее толстой. Но если стенка будет слишком тонкой, она склонна терять устойчивость, поэтому её приходится изготавливать достаточно толстой, что не очень эффективно с точки зрения потребления металла. Чтобы иметь возможность проектировать стенку более рациональной, но достаточной для восприятия поперечных сил, разработаны и на протяжении многих десятилетий зарекомендовали себя положительно такие конструктивные решения, как «перфорированные балки», «балки с тонкой стенкой».

Другой путь получить экономичное по расходу стали двутавровое сечение стержня путем снижения толщины стенки – применить *балку с гофрированной стенкой* [1, 2, 3], иначе – *Sin-балку* [4] (рисунок 1).

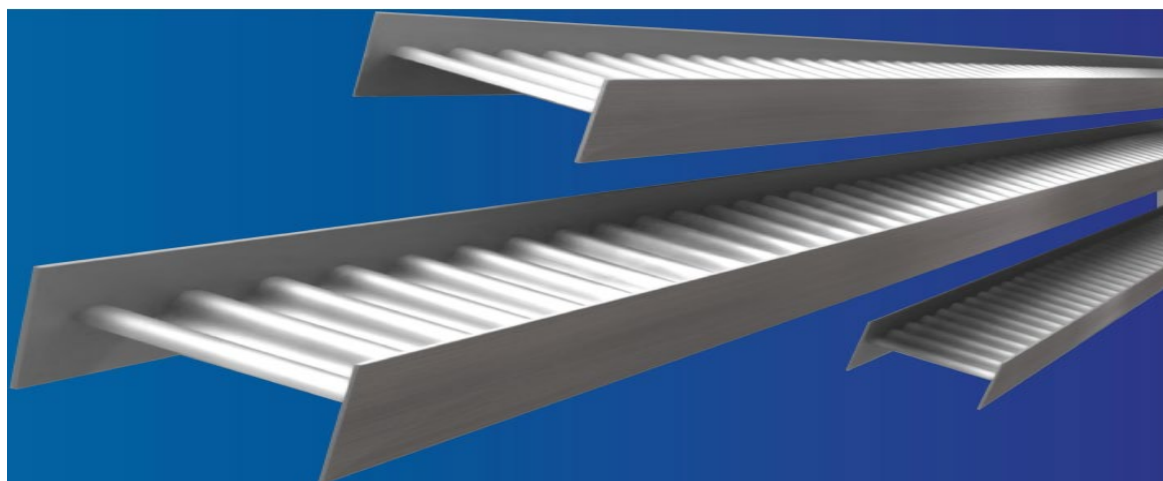


Рисунок 1 – Общий вид Sin-балки

В *Sin-балке* стенка имеет форму волны, что позволяет ей иметь хорошую устойчивость, а поэтому такую стенку можно сделать гораздо тоньше обычной. Название *Sin* происходит от слова *sinus* — изгиб.

Но если методики оценки несущей способности первых двух типов балок получили прописку в СНиП II-23-81*, то возможность оценки несущей способности *гофро-балки* в нормах РФ, гармонизированных с нормами СНиП II-23-81*, впервые отражена в 2017 г. в СП.1325800.2017 – Конструкции стальные. Правила проектирования. По-видимому, такой поздний интерес к нормативной оценкой напряженно-деформированного состояния (НДС) *гофро-балок* в нормах РФ связано с тем, что до недавнего времени они не имели широкого применения в строительной практике РФ, несмотря на то, что научная общественность СССР, а в последующем и стран СНГ, постоянно проявляла к ним повышенный интерес. Достаточно сказать, что эксперименты с использованием стержней с волнистой стенкой впервые произвел российский ученый профессор Горнов В. Н., опубликовав в 1937 году свои исследования, но которые были успешно использованы только в 1966 году в Швеции. Там же отмечалась повышенная трудоемкость их изготовления, тормозящая широкое применение в строительной практике.

Широкое применение в практике проектирования и строительства зданий различного функционального назначения с использованием в качестве несущих конструкций двутавровых стержней с гофрированной стенкой (*Sin-балок*) началось, когда в 90-х годах прошлого столетия на строительном рынке появилась австрийская компания ZEMAN BAUELEMENTE, разработавшая автоматизированную технологическую линию по изготовлению *Sin-балок* (балок с гофрированной стенкой) со скоростью до двух метров в минуту. Оборудование компании ZEMAN BAUELEMENTE позволяет получить *Sin-балки* высотой от 0,3 до 1,5 м и перекрывать пролеты до 45 м, что позволяет им конкурировать с фермами, максимальная длина одной балки — 20 м, хотя балку длиннее чем 18 м перевезти проблематично. Оптимальное применение *Sin-балки* имеют в области возведения стальных несущих конструкций, где обычно используются прокатные профили с высотой стенки более 450 мм или низкие фермы с высотой ниже 1800 мм.

Апробацию применения изготавливаемых ей *Sin-балок* компания ZEMAN BAUELEMENTE провела в 1998 году на строительстве здания магазина площадью 55000 м² за 3 месяца в Польше под Катовице для компании Metro, выиграв тендер. Общий вес стальных конструкций составлял 2100 тонн. ZEMAN BAUELEMENTE предложила использовать в проекте *Sin-балки*, что позволило сэкономить на строительстве 700 тонн стали.

В настоящее время многочисленными исследованиями доказаны их очевидные преимущества в сравнении с другими балочными конструкциями:

- экономия металла по сравнению с традиционным прокатным двутавром: материалоемкость *гофро-балок* на (10 ÷ 30)% меньше в сравнении с обычными сварными балками и на (40 ÷ 60)% меньше в сравнении с горячекатаными;

- высокая надежность работы балок с гофрированными стенками под статическими и динамическими воздействиями [5];

- отпадает необходимость в постановке поперечных ребер жесткости, за исключением опорных мест и мест сосредоточения значительных сил;

- благодаря высокой антикоррозийной защите (оцинкованное покрытие), отпадает необходимость в дополнительной обработке гофробалок;
- при больших пролётах (20 м и более) высота классической фермы может достигать 2,4 м и более, в то время как высота балки с гофрированной стенкой такой же жесткости доходит до 1,5 м. Поэтому здание можно сделать ниже, сэкономив на ограждающих конструкциях и на отоплении, так как обогреваемый объём здания будет меньше, а полезный – останется без изменений;
- ригели каркасов в виде балок с гофрированной стенкой отличаются высокой малоцикловой прочностью и минимальной металлоемкостью;
- оригинальный внешний вид гофробалок, используемых в зданиях в качестве основных несущих конструкций, может сделать их характерным элементом дизайна.

2. К оценке несущей способности гофробалок. Как уже выше сказано, балка с гофрированной стенкой – конструкция, состоящая из поясов определенного сечения и тонкой металлической стенки, которая в поперечном направлении изогнута (гофрирована). Виды гофрировки стенки могут быть разные: треугольные, трапециевидные, прямоугольные, волнистые или другой, повторяющейся формы.

В настоящее время, в связи с получившим широкое распространение автоматизированным оборудованием компании ZEMAN BAUELEMENTE [4] применяют гофробалки, получившие наименование Sin-балки (рисунок 2).

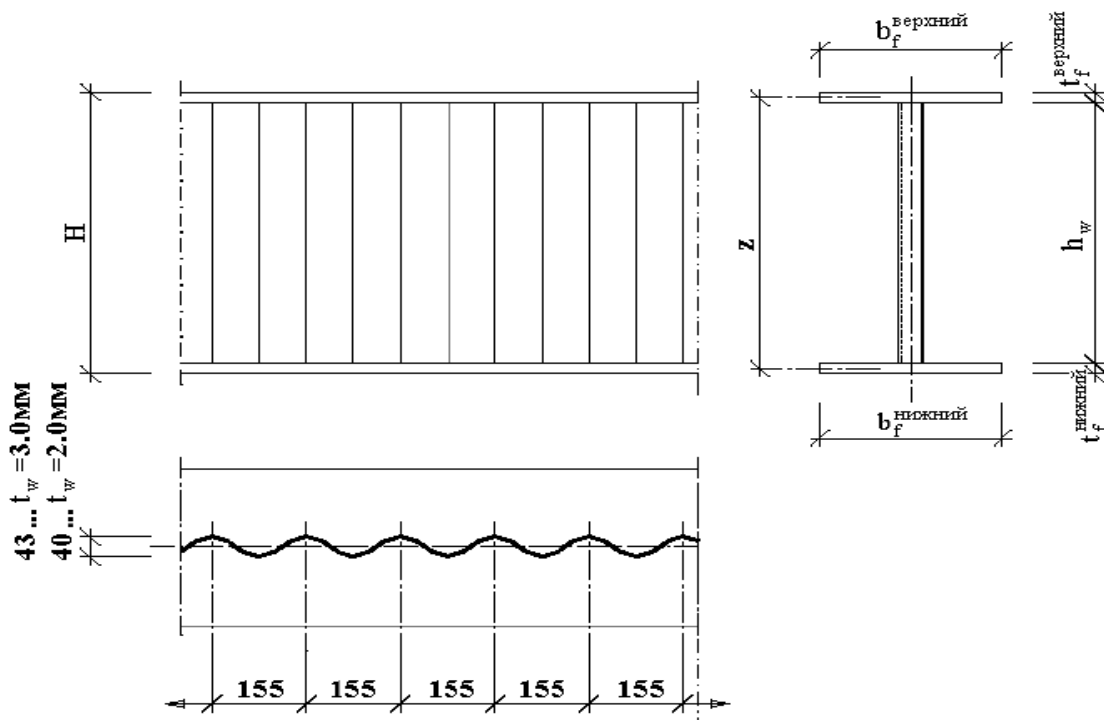


Рисунок 2 – Sin-балки компании ZEMAN BAUELEMENTE [4]

Благодаря профилированному ребру, конструкция эффективно гасит изгибающие нагрузки. В условиях статической нагрузки балка рассчитывается по схеме, в которой изгибающие моменты и нормальные силы передаются только через боковые полки, а поперечные силы распределяются только через диагонали и вертикали балки – в данном случае через гофрированную стенку.

Среди методик расчета Sin-балки, известных на территории СНГ, заслуживает внимания методика инженерного расчета и конструирования, разработанная фирмой «Металлист» (Харьков, Украина), изложенная в «Рекомендациях ...» [6]. В своем составе «Рекомендации...» вобрала в себя как опыт проектирования компании ZEMAN BAUELEMENTE [4], так и известные наиболее ценные исследования, выполненные учеными России [1, 2], Украины [3], Казахстана [5]. Кроме того, представляют интерес изложенные в «Рекомендациях ...» приложения, в которых приведены: обозначения геометрических и физико-технических характеристик сечений и сортамент Sin-балок; примеры конструирования узлов; приведены примеры расчета ригелей и колонн одноэтажных производственных зданий из Sin-балок компании ZEMAN BAUELEMENTE.

Оценка несущей способности Sin-балок, изложенная в [6], построена на основных теоретических предпосылках, многократно подтвержденных экспериментально [1, 2, 3, 4, 5]:

а) установлено, что нормальные напряжения σ_x , возникающие от изгиба, наблюдаются в стенке только у поясов (полок) и очень быстро падают практически до нуля, так как стенка поперек гофр сопротивляться не может (рис. 3,а); касательные напряжения распределяются по высоте стенки практически равномерно (рис. 3,б);

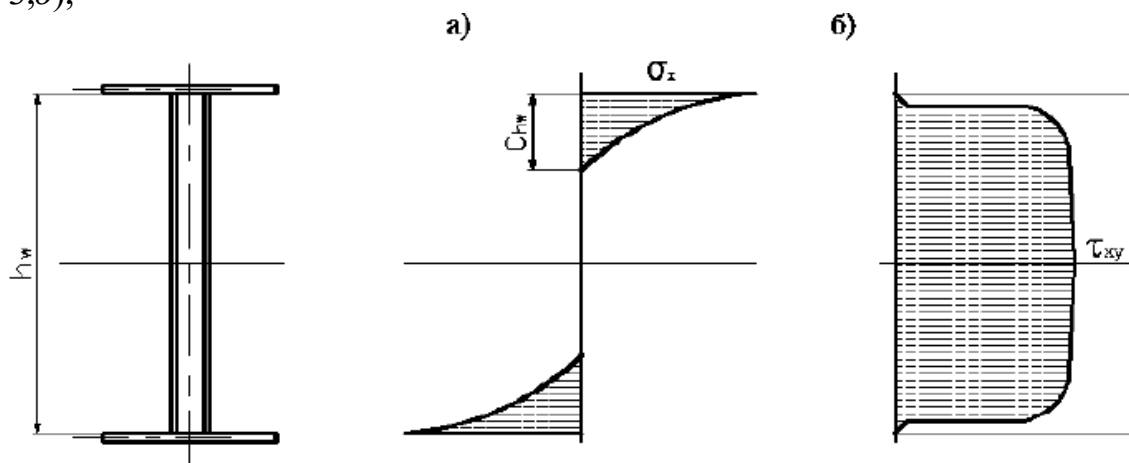


Рисунок 3 – Характер распределения напряжений в сечениях Sin-балки

б) гофры стенки передают усилия на пояс, заставляя его испытывать определенный, меняющийся по направлениям изгиб в своей плоскости;

с) несущая способность гофрированных балок, в сравнении с балками с тонкой или гибкой стенкой, повышается, так как пояс не испытывает изгиба в плоскости балки, как это происходит в балках с тонкой стенкой, предельное состояние которых наступает вследствие потери местной устойчивости стенок под действием местных воздействий сосредоточенных сил, если в этом месте не установлены ребра жесткости;

д) характер предельного состояния Sin-балки зависит от гибкости стенки (λ_w), параметров гофров, наличия ребер жесткости в зонах сосредоточенных сил и на опорах;

е) стенка и пояса воспринимают только те усилия, которые действуют в плоскости их поперечного сечения, поэтому поперечная сила воспринимается только стенкой;

h) экспериментальные исследования показали, что несущая способность Sin-балок несколько выше, чем балок с тонкой или гибкой стенкой, так как в них пояса не испытывают изгиба в плоскости балки [1, 2].

Современное оборудование компании ZEMAN BAUELEMENTE позволяет получить балки с гофрированной стенкой типа Sin-балка высотой от 0,3 до 1,5 м и перекрывать пролеты до 45 м, что позволяет им конкурировать с фермами, максимальная длина одной балки — 20 м.

С учетом сказанного изложенные в [2, 3, 5, 6] методики проверки Sin-балок на прочность по нормальным и касательным напряжениям, на местную устойчивость гофрированной стенки и на жесткость приближены к нормам СНиП II-23-81* с введением корректирующих экспериментально установленных поправок, учитывающих особенности их напряженно-деформированного состояния под воздействиями.

3. Расчет гофробалок по Еврокоду 3. В Республике Беларусь расчет стальных стержней типа гофробалка может быть выполнен по Еврокоду 3 с использованием ТКП EN 1993-1-5 (Приложение D, Справочное), который содержит методику их оценки под расчетными воздействиями.

В п. D.1 даны общие положения, изложены правила определения основных параметров для гофробалок с трапециевидными и синусоидальными гофро-стенками и поясами согласно рисунку 4.

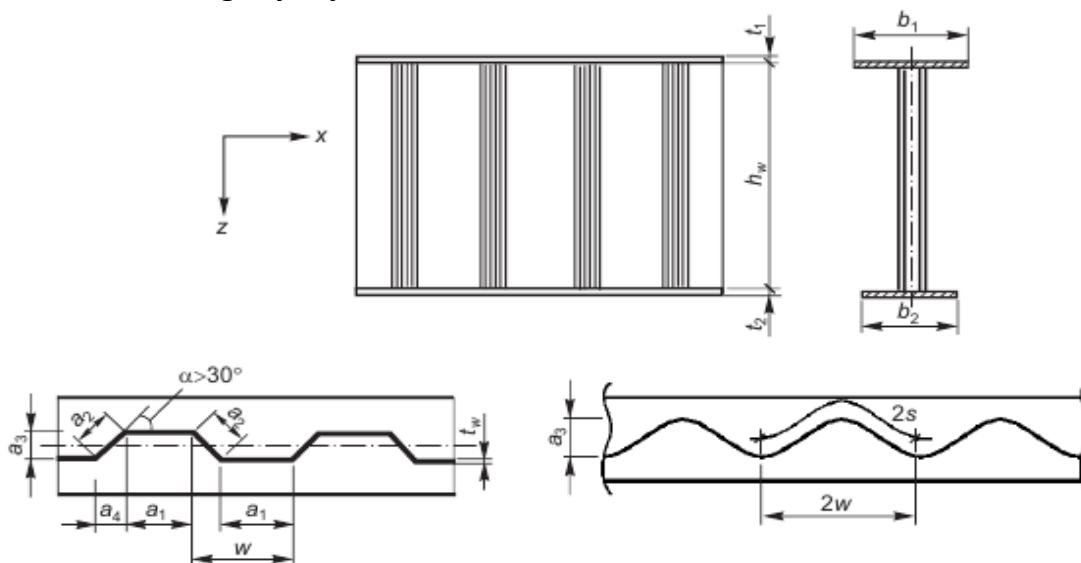


Рисунок 4 – Обозначения геометрических параметров гофробалок

В п. D.2 изложена методика оценки предельных состояний несущей способности:

- D.2.1 – оценка сопротивления изгибающему моменту;
- D.2.2 – оценка сопротивления сдвигу;
- D.2.3 – оценка требований к опорным элементам жесткости.

В последнее время в развитие к вышесказанному в Российской Федерации разработан и введен в действие свод правил СП 294.1325800.2017 [8], в котором содержится раздел 20.6 – Элементы двутаврового сечения с гофрированной стенкой.

4. Несущая способность гофробалок по СП 294.1325800.2017. Согласно СП 294.1325800.2017, для расчета двутавровых стержней с гофрированной стенкой Минстроем Российской Федерации разработана нормативная база, изложенная в разделе «20.6 Элементы двутаврового сечения с гофрированной стенкой».

СП 294.1325800.2017 [8] совместно с СП 16.13330.2017 – «СНиП II-23-81* Стальные конструкции» [9] представляет собой единый нормативный документ Российской Федерации по проектированию стальных строительных конструкций. Оба эти нормативных документа устанавливают требования и распространяются на расчет и проектирование стальных строительных конструкций зданий и сооружений различного назначения, работающих при температуре не выше 100°C и не ниже минус 60°C.

В соответствии с п. 8.1 СП 16.13330 конструкции из двутавров с гофрированной стенкой, в том числе и бистальные, относятся к 1-му классу и рассчитываются в пределах упругих деформаций. Гофрированные стенки могут состоять из трапециевидных, треугольных или волнистых гофров.

Расчетными параметрами сложного двутаврового сечения с волнистой (синусоидальной) поперечно-гофрированной стенкой (рисунок 5) являются: a_s – шаг гофра; h_{ef} – расчетная высота стенки, которая равняется в сварных балках с гофрированной стенкой полной высоте стенки h_w ; t_w – толщина гофрированной стенки; f – высота волны гофра; s – развернутая длина полуволны гофра $s = a_s(1 + \pi^2 f^2 / 16 a_s^2)$.

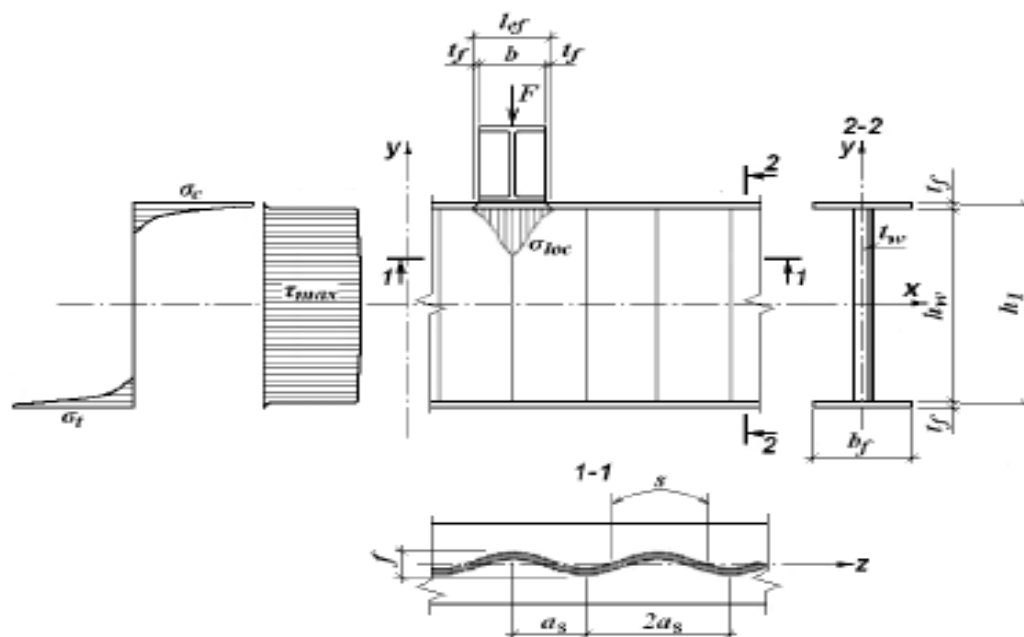


Рисунок 5 – Схема элемента с волнистой гофрированной стенкой

Гофрированную стенку следует принимать толщиной не менее 1.5 мм; гибкостью гофрированных стенок в пределах $\lambda_w \leq 200 \dots 500$; условной гибкостью панели гофра $\lambda_c = s / t_w \sqrt{R_y / E} \leq 2,3$.

Параметры гофров следует принимать такими, чтобы были обеспечены условия, при которых $\tau_{p,cr} > \tau_{0,c}$, где $\tau_{p,cr}$ и $\tau_{0,cr}$ согласно 20.6.3.8 и 20.6.3.9 соответственно.

В сварных двутаврах с гофрированными стенками следует применять односторонние поясные швы, за исключением мест приложения больших сосредоточенных усилий или подвижных нагрузок.

Особо следует отметить, что основной свод правил по проектированию и расчету стальных строительных конструкций изложен в СП 16.13330 [8]. Поэтому все виды оценки напряженно-деформированных состояний, возможные под расчетными воздействиями, требующие их учета, представлены в разделе по следующей схеме:

а) в п. 20.6 СП 294.1325800.2017 [8] приведен перечень возможных видов НДС сечений стержней с гофрированной стенкой: – центральное растяжение и сжатие; – изгиб в одной и двух плоскостях; – внецентренное сжатие. Делается ссылка на соответствующие формулы оценки указанных предельных состояний при проверке их на прочность, общую и (или) местную устойчивость, изложенные в СП 16.13330.2017 – «СНиП II-23-81* Стальные конструкции» [9];

б) в п. 20.6 СП 294.1325800.2017 [8] содержится достаточная информация, учитывающая при проверке предельных состояний по формулам СП 16.13330.2017 [9] некоторые специфические особенности деформирования гофростержней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. На основании изученного и изложенного в настоящей статье материала можно сделать следующие выводы:

1. Применение в проектировании металлических каркасов в зданиях различного функционального назначения стержней с гофрированной стенкой позволяет существенно снизить материалоемкость (на 15÷30)% на основе более рационального распределения стали как строительного материала;

2. Несущая способность балок с гофрированной стенкой выше, чем балок с плоской стенкой за счет большей местной устойчивости стенки и возможности принять ее более тонкой (2 – 3) мм;

3. Наиболее экономичной формой стальных колонн рам, работающих на горизонтальные сейсмические нагрузки только одного направления, является стальной двутавр с гофростенкой;

4. Для ригелей стальных рамных каркасов многоэтажных зданий целесообразно использовать двутавровые балки с поперечно-гофрированной стенкой, обладающей минимальной материалоемкостью и высокой малоцикловой прочностью;

5. Некоторые из утверждений, приведенных в литературных источниках, требуют дальнейших экспериментальных и теоретических подтверждений. Одно из таких утверждений – высказывание о большей жесткости гофробалок в сравнении с равнонесущей балкой с плоской стенкой.

Список использованных источников

1. Кудрявцев, С.В. Несущая способность балок с гофрированной стенкой, ослабленной круговым отверстием : автореф. дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук : спец. 05.23.01 „Строительные конструкции, здания и сооружения” / С.В. Кудрявцев. – Екатеринбург, 2011. – 175 с.

2. Кудрявцев, С.В. Расчет двутавровой балки с гофрированной стенкой на изгиб в своей плоскости под действием статических нагрузок (часть I: Методика расчета) / С.В. Кудрявцев. ГОУ ВПО «Уральский государственный технический ун-т – УПИ». – Екатеринбург, 2007. – 17 с.
3. Лазнюк, М.В. Балки з тонкою поперечно-гофрованою стінкою при дії статичного навантаження : давтореф. дис. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук : спец. 05.23.01 / М.В. Лазнюк. – Київ, 2006. – 18 с.
4. Zeman & Co Gesellschaft mbH. Балки с гофрированной стенкой. Техническая документация. Текст. / Zeman (Zeman Beteiligungsgesellschaft mbH). – Vienna, Austria, 1993. – 13 p.
5. Остриков, Г.М. Стальные сейсмостойкие каркасы многоэтажных зданий / Г.М. Остриков, Ю.С. Максимов. – Алма-Ата (Казахстан), 1985. – 117 с.
6. Балки двутавровые гофрированные облегченные (Гофробалки ТУ У В.2.6-28.1-30653953-007:2007). Рекомендации по проектированию. Металлист. Украина. – Харьков, 2013. – 140 с.
7. ТКП EN 1993-1-5. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-5. Пластинчатые элементы конструкций / Министерство архитектуры и строительства РБ. – Минск, 2014. – 51 с.
8. СП 294.1325800.2017. Конструкции стальные. Правила проектирования / Министерство строительства и коммунального хозяйства РФ. Издание официальное; разработан АО НИЦ «Строительство» – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко» и др. – Москва, 2017. – 167 с.
9. СНиП II-23-81* Стальные конструкции: СП 16.13330.2017. Приказ № 126 / пр. Минстрой РОССИИ. – Москва, 2017. – 148 с.