

АНАЛИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ БАЛОК С ПЕРФОРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ

Г. А. Ганеман, А. А. Кикоть

Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Приведен обзор видов и особенностей металлических балок с перфорированной стенкой. Проведены возможные подходы к расчету. Проанализирована экономическая эффективность перфорированной металлической балки в сравнении с прокатным двутавром.

Ключевые слова: балка с перфорированной стенкой, виды перфорации, эффективность, методы расчета.

Повышение эффективности строительных конструкций на основе совершенствования конструктивных форм и методов их расчета – одна из актуальных задач капитального строительства. Один из способов повышения эффективности конструкции – это уменьшение ее веса.

Балочные конструкции в строительной сфере представляют собой безраспорные несущие конструкции покрытий и перекрытий, которые работают на изгиб от поперечных нагрузок и передают вертикальные опорные реакции на стены или колонны.

Поиски путей увеличения эффективности балочной конструкции натолкнули исследователей еще в первые десятилетия XX века к следующей идее: стенка прокатного двутавра разрезается по зигзагообразной линии (рисунок 1), затем обе части балки соединяются в местах примыкания выступов с помощью сварки (рисунок 2) [1]. В итоге получается специфическая конструктивная форма – двутавр с отверстиями в стенке. В технической литературе он получил несколько наименований – двутавр с перфорированной стенкой, двутавр с развитым сечением, сквозной двутавр.

Балки с перфорированной стенкой применяются в промышленном, гражданском, транспортном строительстве, в конструкциях производственных, уникальных спортивных, торгово-развлекательных зданий и сооружений. Преимуществами перфорированных двутавровых балок являются повышенная несущая способность и жесткость за счет увеличения высоты сечения в сравнении с прокатными.

В последние годы наблюдается увеличение использования балок с перфорированными стенками, как в металлоконструкциях,

так и в других отраслях. Перфорированные балки предлагают архитекторам привлекательные и практические решения с точки зрения использования пространства без экранирующего эффекта.

Сегодня прокатные двутавры с параллельными гранями поясов, в том числе широкополочные высотой до 1 м, позволяют перекрывать значительные пролёты. Удельная трудоёмкость изготовления таких двутавров по основным операциям меньше, чем в аналогичных по пролёту фермах. Уменьшение высоты конструкции, особенно в перекрытиях многоэтажных зданий, всегда выгодно, однако при маленькой высоте перфорированной балки уменьшается плечо изгибающего момента, от этого увеличивается усилие в поясах и их площадь, поэтому для использования такой балки в конструкции необходим точный расчет.

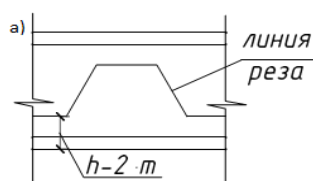


Рисунок 1 – Балка с перфорированной стенкой: вид балки до разрезки

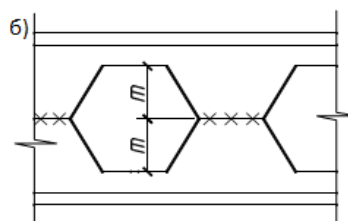


Рисунок 2 – Балка с перфорированной стенкой

Положительный результат при использовании сквозного двутавра по сравнению с исходным объясняется тем, что высота двутавра с перфорированной стенкой возрастает примерно в 1,5 раза, наличие отверстий в стенке нового двутавра изымает из неё до 35-40% металла [2].

Двутавры с перфорированной стенкой позволяют сэкономить 20-30% материала в отличие от прокатных двутавров [3]. Трудоёмкость изготовления двутавров с перфорированной стенкой также ниже, чем сварных двутавров, благодаря сокращению операций обработки и объёма сварки.

Разнообразие балок с перфорированной стенкой связано со схемами резов стенки. Резы стенки перфорированной балки приведены на рисунке 3. Разрез может быть симметричным и несимметричным относительно середины исходного двутавра. При симметричном разрезе балка типа I, балка складывается из двух половин разных двутавров. Балки типа II можно создать из одного исходного двутавра, однако в этом случае нижнюю половину требуется разрезать на элементы 2 и 3, повернуть их, сварить в середине и предусмотреть вставки на опорах. Балки типа III могут быть использованы в качестве прогонов. Тут появляются обрезки. При несимметричном разрезе типа IV предусматриваются вставки на одном конце.

Чтобы снизить степень концентрации напряжений в углах отверстий используются криволинейные резы (рисунок 4), при использовании которых появляются небольшие отходы материала. Очень эффективен способ закругления углов окон радиусом до $2,5t_w$, благодаря этому концентрация напряжений уменьшается в 2,5-3,5 раза [4].

Возможно изготовление перфорированных балок переменной высоты с помощью реза стенки на участке, наклонённом к оси балки (рисунок 5, а). Рез исходного двутавра в этом случае осуществляется по зигзагообразной линии диагонального направления. После резки стенки осуществляется поворот одной из полученных частей вокруг вертикальной оси на 180° и сварка половинок выступающими частями вместе. При этом высота сечения полученной балки с одной стороны почти удваивается, с другой – остается близкой к исходной. Такие балки эффективно работают на изгиб и сжатие с изгибом [3]. Так же разработан способ реза по кривым и изготовление криволинейных перфорированных балок стягиванием двух половинок и последующей сварки (рисунок 5, б).

Высокими технико-экономическими показателями обладают перфорированные двутавры с повышенной степенью развития сечения (рисунок 5, в). В этом случае между отверстиями перфорации устанавливаются дополнительные прямоугольные планки.

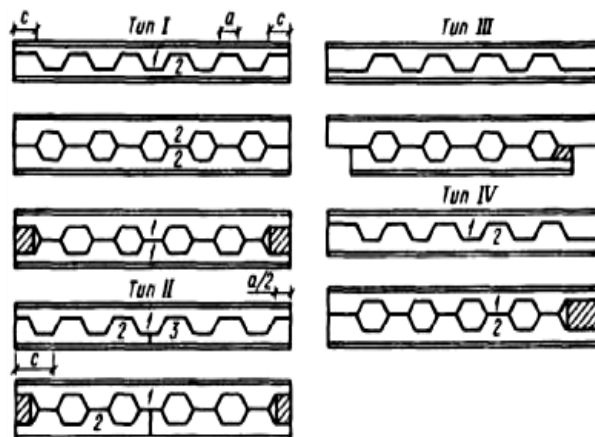
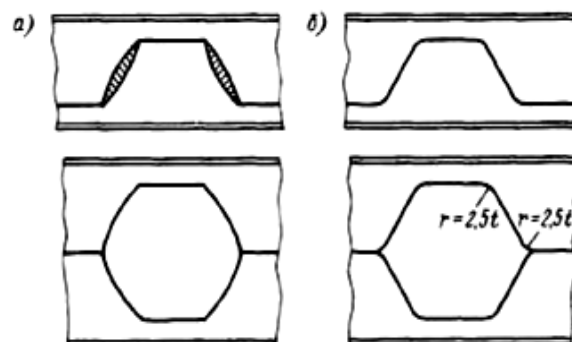
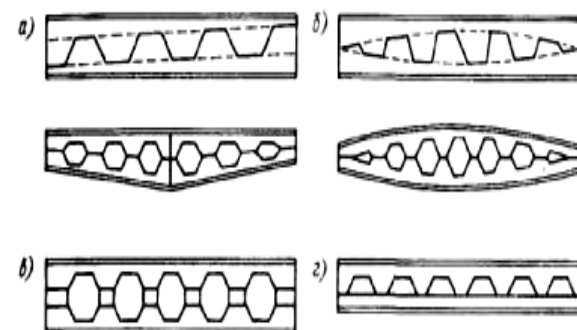


Рисунок 3 – Тип реза стенки:
I, II, III – симметричный; IV – несимметричный



а – рез с отходом; б – рез с закруглениями в углах

Рисунок 4 – Стенки балок с криволинейными резами



а – с наклонным резом стенки; б – с криволинейным резом; в – с повышенной степенью развития элементов

Рисунок 5 – Разновидности балок с криволинейными резами

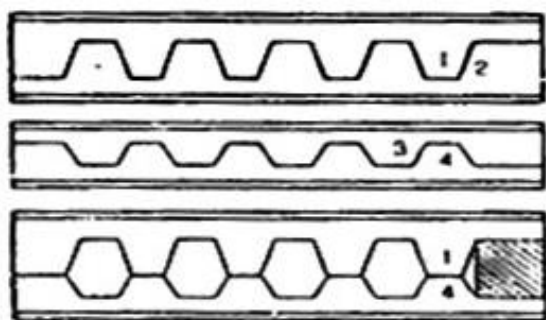


Рисунок 6 – Бистальная перфорированная балка с линейной перфорацией стенки

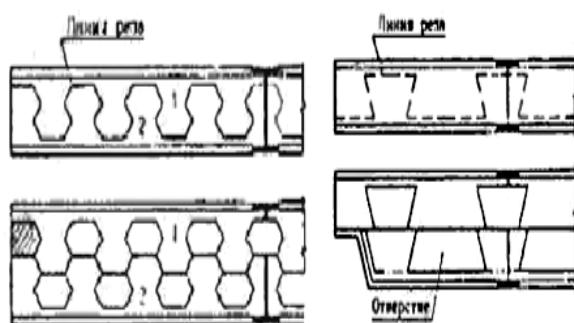


Рисунок 7 – Перфорированные балки с шахматной перфорацией стенки

При роспуске двутавра с развитием сечения в 3 раза, несущая способность увеличивается в 3,2 раза, а жесткость в 7,3 раза, но возникает опасность потери местной устойчивости стенки и увеличивается трудоемкость изготовления конструкции [5]. Возможна сборка балок из элементов с зигзагообразным резом по стенке и тавра из различных элементов и марок стали (рисунок 5, г).

Стенки перфорированных балок могут выполняться с линейной (рисунок 6), шахматной (рисунок 7) и с двойной перфорациями [12].

Так же перфорированные балки отличаются по следующим параметрам:

По форме продольной оси: прямолинейные и криволинейные перфорированные стержни. Прямолинейные стержни – это колонны, стойки, ригели и т.д. К криволинейным относятся кольца, арки.

По форме профиля поперечного сечения: перфорированные стержни открытого и замкнутого профилей поперечного сечения.

По форме поперечного сечения: прокатные и составные двутавры, швеллеры и др. В случае роспуска швеллера получается г-образный профиль.

По форме отверстий: отверстия в форме круга, овала, квадрата, прямоугольни-

ка, шестиугольника, восьмиугольника.

По количеству перфорированных граней: одна, две, несколько или все грани стержня.

По способу соединения составных частей профиля: сварные, болтовые, заклепочные.

По виду вставок между половинками профиля: с листовыми пластинами, с гофрированными вставками. Дополнительные вставки увеличивают высоту, момент инерции и несущую способность.

Перфорированные двутавры могут быть из стали одной марки – моноставные, из двух разных марок стали – бистальные (рисунок 6) [6]. Исследования показывают, что для однопролетных балок более экономично применять сквозные двутавры из двух марок сталей: верхнюю часть из обычной малоуглеродистой стали, из двутавра с более толстой стенкой, а нижнюю часть – из более прочной стали, из двутавра с более тонкой стенкой [1]. Двутавр для перфорированной балки, как правило, выбирается из сортамента стальных горячекатаных двутавров с параллельными гранями полок с индексами «Б» и «Ш» в соответствии с ГОСТ 26020-83 [7].

Возможность расчета балок с перфорированной стенкой предусмотрено в нормах расчета многих стран мира [8-10].

Существует несколько моделей расчета перфорированной балки:

- **Пластинчато-стержневая расчетная модель.**

Эта расчетная модель является наиболее точной. Согласно этой модели, перфорированный стержень представляется в виде системы одно- и многосвязных пластин, которые соединены друг с другом упругими континуальными швами, причем упругие свойства пластин и швов считаются одинаковыми [11]. Примером данной расчетной модели является расчет МКЭ. МКЭ позволяет рассчитывать системы, составленные из тел с различными физическими свойствами, а также имеющие сложные граничные условия. Особенности расчета МКЭ описаны в [12-14].

- **Составной стержень с упругим континуальным швом.**

Согласно этой расчетной модели, перфорированный стержень представляется в виде составного (система элементов, соединенных стержневыми связями: жесткими поперечными и упругими связями сдвига) с применением для оценки НДС теории составных стержней А.Р. Ржаницына [15]. Дискретные связи (участки между перфорация-

ми) заменяются упругим континуальным швом, который противодействует обоюдному сдвигу и расхождению поясов перфорированного стержня, работой которых и определяется несущая способность.

- Безраскосная ферма Виренделя.

Данная расчетная модель применяется в решении задач изгибаемого перфорированного стержня, представляемого в виде безраскосной фермы с жесткими узлами – рамной системы с поясами и стойками. Двутавр с перфорированной стенкой, работающий на изгиб, по своей расчетной схеме представляет многократно статически неопределимую систему, которая с достаточной степенью точности может быть рассчитана как безраскосная ферма по приближенному способу Виренделя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Область применения сквозных двутавров весьма обширна. Двутавры с перфорированной стенкой имеют большое разнообразие в своей конструкции и своем назначении. Увеличение высоты балки за счет перфорированных отверстий повышает эффективность балочной конструкции и позволяет экономить 20-30% материала по сравнению с прокатными двутаврами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудишин, Ю. И. Металлические конструкции: учебник / Ю. И. Кудишин, Е. И. Беленя, В. С. Игнатова. – 13-е изд., испр. – М. : Издательский центр Академия, 2011. – 688 с.
2. Михайлов, В. В. Проектирование стальных конструкций на примере балочной клетки : учебное пособие / В. В. Михайлов, М. С. Сергеев. – Владимир. Гос. ун-т имени А. Григорьевича и Н.Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2012. – 72 с.
3. Енджиевский, Л. В. Каркасы зданий из лёгких металлических конструкций и их элементы : учебное пособие / Л. В. Енджиевский, В. Д. Наделяев, И. Я. Петухова. – М., 1998. – 247 с.
4. Притыкин, А. И. Разработка методов расчета и конструктивных решений балок с однорядной и двухрядной перфорацией стенки: автореф. дис...канд. техн. наук. – Калининград, 2011. – 44 с.
5. Копытов, М. М. Металлические конструкции каркасных зданий: учебное пособие / М. М.

Копытов. – М. : Изд-во АСВ, Изд-во ТГАСУ, 2016. – 400 с.

6. Дымолазов, М. А. Методические указания по выполнению курсовой работы по курсу «Металлические конструкции. Специальный курс» для студентов заочной формы обучения и бакалавров направления 270800 «Строительство» профиль – «Промышленное и гражданское строительство» / М. А. Дымолазов, О. И. Ефимов. – Казань : КГАСУ, 2012. – 22 с.

7. ГОСТ 26020-83. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок : гос. стандарт СССР – Введ. 1986-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1986 – 11 с.

8. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНИП II-23-81*: свод правил. – Введ. 2011-05-20 / Минрегион России. – М. : Минрегион России, 2010. – 173 с.

9. EN 1993-1-1:2005 Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings / European Committee for Standardisation CEN, Brussels, 2005. – 91 p.

10. ANSI/AISC 360-16. Specification for Structural Steel Buildings / American Institute of Steel Construction, Chicago, 2016. – 620 p.

11. Кожихов, А. Г. Совершенствование методики определения силового сопротивления и конструктивной формы перфорированных стоек: автореф. Дис...канд. техн. наук. – Новочеркасск, 2011. – 162 с.

12. Притыкин, А. И. Особенности расчета перфорированных балок МКЭ/ А. И. Притыкин, А. В. Мисник, А. С. Лаврова // Известия КГТУ. – 2016. – № 43. – С. 249-259.

13. Дьяков, И. Ф. Метод конечных элементов в расчетах стержневых систем: учебное пособие/ И. Ф. Дьяков, С. А. Чернов, А. Н. Черный. – Ульяновск : УлГТУ, 2010. – 133 с.

14. Зенкевич, О. С. Метод конечных элементов в технике / О. С. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 541 с.

15. Ржаницын, А. Р. Составные стержни и пластинки. – М. : Стройиздат, 1986. – 316 с.

Ганеман Г.А. – магистрант ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: germanon07@gmail.com.

Кикоть А.А. – к.т.н., доцент кафедры «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: deltaing@mail.ru.