

17-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos  
**TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA**,  
vykusios 2014 m. gegužės 8 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 17th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'  
**TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT**, 8 May 2014, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 17-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»  
**ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК**, 8 мая 2014 г., Вильнюс, Литва

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БАЛОК С ПЕРЕМЕННОЙ ВЫСОТОЙ СТЕНКЕ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРИМЕРЕ ПЕШЕХОДНОГО МОСТА

Сергей Билык<sup>1</sup>, Вадим Шпында<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup>*Кафедра металлических и деревянных конструкций,  
Киевский национальный университет строительства и архитектуры  
просп. Воздухофлотский 31, г. Киев, Украина*

**Аннотация.** В статье описывается вид двутавровых балок переменного сечения (с арочным вырезом в стенке балки и фигурной полочкой) – арочных балок. Рассматриваются особенности распределения напряжений и усилий в стенке и полках арочно-балковых элементов пешеходного моста. Проводится сравнение вариантов мостовой конструкции с главными балками из классических сварных двутавров с постоянной высотой стенки и арочно-балковых двутавров.

**Ключевые слова:** Арочная – балка, мост, сварной двутавр, распорные усилия, строительство.

### Введение

Одной из актуальных задач капитального строительства есть задача повышения эффективности конструкций на основании усовершенствования конструктивных форм и методов их расчета. В наше время на территории Украины существует большое количество сооружений отнесенных к архитектурным памяткам, уникальных за своими конструктивными формами, что требуют реконструкции, а также новое строительство, что возвращается к историческим архитектурным направлениям и стилям. Поэтому использования новых видов конструкций которые могли бы упростить и улучшить строительство и реконструкцию объектов индивидуального строительства остается важным вопросом. Арочно-балковые конструкции нашли применение в частных случаях реконструкции, а также нового строительства, когда есть необходимость повторения уникальных архитектурных форм.

**Цель.** Целью этой статьи есть исследование распределения напряжений а также особенностей работы арочных двутавровых балок на примере их использования в пешеходном мосте, а также сравнение их с двутавровыми балками постоянного по высоте сечения.

Арочная балка – это вид двутавровой балки с переменной высотой стенки в виде арочного выреза необходимой формы и размера и криволинейного нижнего пояса. Использование переменной высоты

стенки (стенки с арочным вырезом) у двутавровых балках носит экономический эффект с точки зрения эффективного использования материала, в зонах экстремумов распределения усилий (рисунок 1).

В данном случае предлагается рассмотреть использование арочно – балковых двутавровых конструкций на примере пешеходного моста.



**Рис. 1.** Пример использования арочных балок в реконструкции станции метро

Мост являет собой трех пролетное сооружение с общей длиной 51.4 м (I – 15 м; II – 19 м; III – 15 м). Основные несущие элементы – арочные двутавровые балки которые расположены на расстоянии 2.5 м в поперечном направлении, они соединены системой

горизонтальных и вертикальных связей. Максимальная высота арочных двутавров на опорах составляет – 1.451 (м), минимальная в среднем прольоте – 0.593 (м), в крайних соответственно – 0.593 (м). Толщина стенки составляет 12 (мм), сечение полки 350 × 16 (мм).

Решение по применению арочно-балковых конструкций было вызвано двумя факторами: первый – это реализация определенных архитектурных форм, а второе – это эффективное использование материалов.

Так как длина моста составляет 51 м, расчетная схема представляет собой пространственную трехпролетную неразрезную конструкцию, с верхним поясом в виде одной большой арки, стенки с тремя арочными вырезами и нижнего пояса который повторяет геометрию стенки (Рисунок 2). Поскольку такая система предусматривает появление распорных усилий то условие закрепления моста – шарнирно- подвижное на шести с восьми опор в продольном направлении и соответственно шарнирно-неподвижное на двух опорах в середине моста. В поперечном направлении конструкция моста – шарнирно – неподвижная (Корнеев 2003; Ефимов 2006).

Поскольку расчет и работа арочных – балок не исследована и не описана в отечественных и зарубежных нормах проектирования, то расчет данной конструкции произведен детально с помощью современных расчетных комплексов, а именно ПК «Лира – Сапр 2013». Расчетная схема была смоделирована в виде пространственной конструкции. При этом для моделирования балок были использованы пластинчатые четырех угольные пластинчатые элементы (КЭ 41), с целью точного определения распределения напряжений в стенке и поясах балок, а также для получения точных значений горизонтальных и вертикальных перемещений, что необходимо для правильного проектирования деформационных швов (которые расположены между крайними консолями и подпорной стенкой).

Геометрия поясов главных балок была вызвана двумя факторами: первый – это необходимая минимальная высота стенки с точки зрения максимальных допустимых перемещений и усилий в элементах конструкции, второй – это архитектурные требования к формам арок и общей геометрии моста. Для сравнения работы арочно-балковых конструкций с традиционными двутавровыми балками был произведен расчет мостовой конструкции с главными балками из сварных двутавров с постоянной высотой стенки. Пространственная расчетная модель представлена на рисунке 3. Подбор сечения главных балок был произведен по

аналитической методики приведенной в (Корнеев 2003) и (Ефимов 2006). Усилия в главных балках найдены для неразрезной трехпролетной балки:

- $M_{max} = 1203.98$  кНм;
- $M_e = 1203.98$  кНм;
- $Q_{max} = 390.86$  кН;
- $Q_e = 330.84$  кН;
- $M_{max}$  – максимальное граничное значение момента;
- $Q_{max}$  – максимальное граничное значение вертикального усилия.
- $M_{max}$  – максимальное эксплуатационное значение момента;
- $Q_{max}$  – максимальное эксплуатационное значение вертикального усилия;

Необходимый момент сопротивления:

$$W_{cal} = \frac{M_{max}}{R_y \cdot \gamma_c} = \frac{1203.98 \cdot 10^2}{345 \cdot 10^{-1} \cdot 1.1} = 3172.5 \text{ cm}^3 \quad (1)$$

- $W_{cal}$  – необходимый момент сопротивления;
- $R_y$  – расчетное сопротивление стали;
- $\gamma_c$  – коэффициент условий работы.

Оптимальная высота балки (Нилов *et al.* 2010):

$$h_{opt} = k_\lambda \cdot \sqrt[3]{W_{cal} \cdot \lambda_w} = 1.1 \cdot \sqrt[3]{3172.5 \cdot 134.4} = 82.79 \text{ (cm)} \quad (2)$$

$$\text{где } \lambda_w = \bar{\lambda}_w \cdot \sqrt{E / R_y} = 5.5 \cdot \sqrt{2.06 \cdot 10^5 / 345} = 134.4 \quad (3)$$

- $h_{opt}$  – оптимальная высота балки;
- $E$  – модуль упругости стали;
- $\lambda_w$  – гибкость и условная гибкость;

Проверка на допустимые перемещения (Горев 2002):

$$\begin{aligned} \frac{l}{f} &= \frac{5 \cdot M_e \cdot l}{48 \cdot E \cdot I_x} = \frac{5 \cdot 1018.87 \cdot 19 \cdot 10^5}{48 \cdot 2.06 \cdot 10^5 \cdot 135 \cdot 518} = \\ &= 3.487 \cdot 10^{-3} = \frac{1}{286} < \frac{1}{250} \end{aligned} \quad (4)$$

- $l$  – длина балки;
- $f$  – максимальный прогиб;
- $I_x$  – момент инерции;

Значения нормальных напряжений и вертикальных перемещений моста с арочными-балками представлено в изополях на рисунках 4–6.



Рис. 2. Пространственная модель моста



Рис. 3. Пространственная модель моста с применением в виде главных балок сварных двутавров

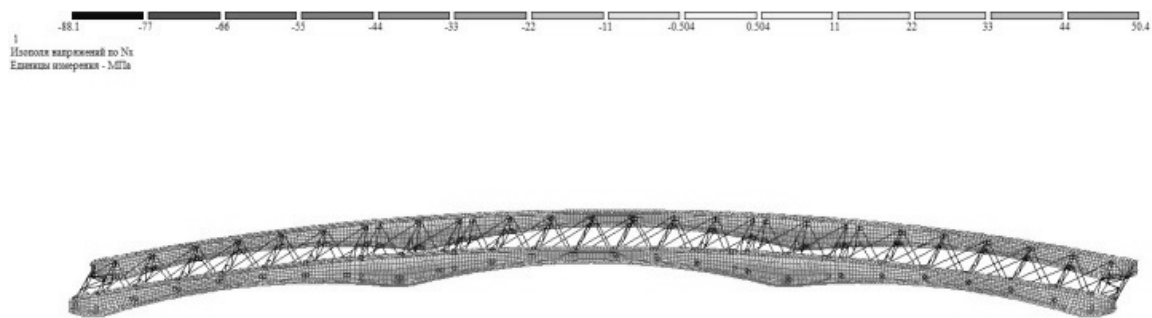


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений  $N_x$

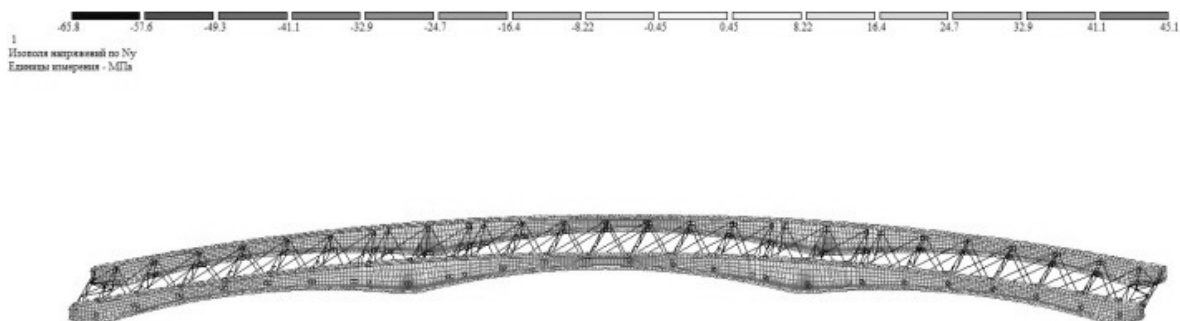


Рис. 5. Распределение нормальных напряжений  $N_y$

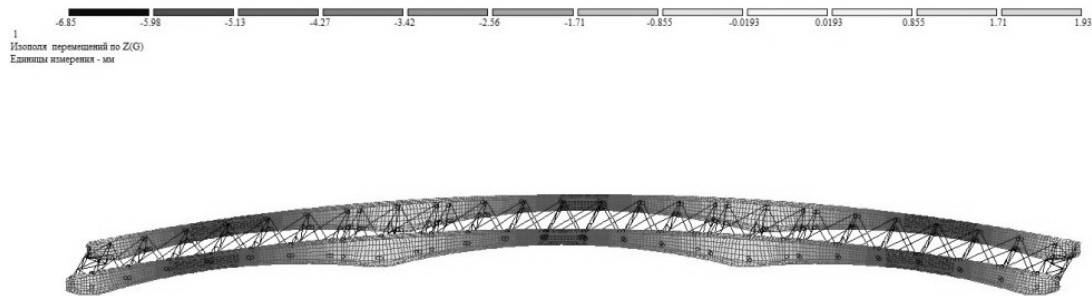


Рис. 6. Изополю вертикальных перемещений  $Z_g$

Принятое сечение двутавра с учетом местной стойкости поясов и стенки:

- полка  $300 \times 14$  мм;
- стенка  $972 \times 10$  мм;

Характер распределения нормальных напряжений эквивалентный эпюре моментов для неразрезной балки. С небольшими смещениями точек нулевых напряжений, этот эффект получен вследствие работы нижнего пояса балки как арки и перераспределением усилий изгиба-

ющего момента в продольные распорные.

Значения вертикальных перемещений моста со сварными двутаврами представлено в изополях на рисунке 7.

Распределения нормальных напряжений полностью повторяет эпюру моментов в эквивалентной неразрезной балке. Характер вертикальных перемещений совпадает для обоих видов балок но предельные значения имеют существенную разницу.

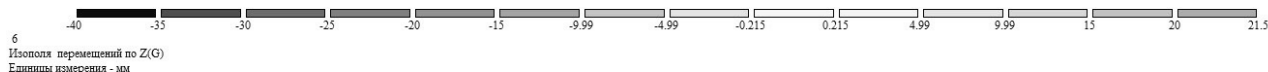


Рис. 7. Изополю вертикальных перемещений  $Z_g$

Использование главных балок моста из сварных двутавров за вторым предельным состоянием в наибольшем пролете при условии что:

$$\frac{l}{f} = \frac{1}{250} \Rightarrow \frac{51.7}{19000} = \frac{1}{368}, \quad (5)$$

$(l \leq 24.м)$

составляет:  $\frac{1}{368} / \frac{1}{250} \cdot 100\% = 67.9\%$ .



**Рис. 8.** Гистограмма сравнения максимальных значений перемещений

На приведенных ниже гистограммах сравнены основные показатели расчета главных балок пешеходного моста. А именно значения перемещений и напряжений, а также сравнение этих конструкций по затратам стали. На рисунке 8, видно что конструкция арочно – балочного моста является более жесткой как в вертикальном (Zg) так и в продольном (Xg) и поперечном (Yg) направлениях, при этом значения вертикальных перемещений меньше более чем в 7 раз. Малая деформативность мостовой конструкции очень важна с точки зрения правильной эксплуатации ограждающих и декоративных элементов моста и предотвращению их преждевременного разрушения.



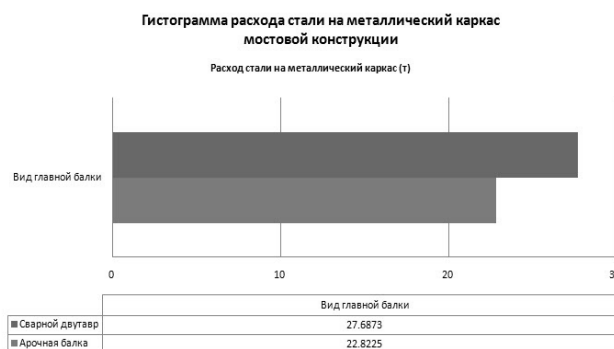
**Рис. 9.** Гистограмма сравнения максимальных значений напряжений

## Литература

Горев, В. В. 2002. *Металлические конструкции. Специальные конструкции и сооружения.* Стр. 336–363. «Высшая школа», 2002.(на русском).

ДБН В.2.3 – 26:2010 *Мосты и трубы, стальные конструкции, правила проектирования.* (на русском).

Поскольку арочные балки делают конструкцию моста более жесткой (с помощи увеличения высоты главных балок на опорах и уменьшением в пролетах моста) на гистограммах видно что значения напряжений которые возникают в приопорных зонах арочных балок значительно больше чем у сварных двутавров, эти концентраторы напряжений возникают в следствии разгрузки менее жесткой пролётной части балки и появлении распора который переходит в нормальные напряжения (Рисунок 9).



**Рис. 10.** Гистограмма сравнения расхода стали для двух вариантов исполнения главных балок

Был также произведен расчет использования материалов (Рисунок 10). При этом затраты стали на арочно – балочный мост на 4.87 (т) меньше чем на аналогичный балочный. То есть, на каждой главной балки было сэкономлено по 2.435 (т).

## Выводы

По представленным выше результатам расчета и сравнения двух вариантов главных балок в конструкции пешеходного моста можно сказать об экономичности использования этого вида конструкций на средних пролетах (10–20 м) в сравнении с классическими двутавровыми балками с постоянной высотой стенки. Уменьшением изгибающего момента в пролетах за счет преобразованием его в распорные усилия, а также максимальным повторением эпюры материалов эпюры моментов, было достигимы максимально эффективные результаты с точки зрения использования материала и работы конструкции в целом.

Использование нового вида не достаточно исследованных конструкций носит экспериментальный характер, но арочная балка, в силу приведенных выше результатов, как новый вид эффективных конструкций, может найти свое использование как в частных случаях реконструкции так и в новом строительстве.

ДБН В.2.6 – 163: 2010 *Конструкции зданий и сооружений металлические.* (на русском).

Ефимов, П. П. 2006. *Проектирование мостов.* Стр. 53-57. Омск 2006.(на русском)

Корнеев, М. М. 2003. *Стальные мосты: Теоретический и практическое пособие по проектированию.* Стр. 115–192. Киев 2003.(на русском).

Нилов, О. О.; Пермяков, В. О.; Шимановский, О. В.; Билык, С. И. 2010. *Металлические конструкции.* Киев, Киевский национальный университет строительства и архитектуры. Стр. 170-203 (на украинском).