

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.072.2.012.45.014:006.015.2

Ю. П. КИТОВ<sup>1</sup>, Г. Л. ВАТУЛЯ<sup>2</sup>, М. А. ВЕРЕВИЧЕВА<sup>3</sup>, С. В. ДЕРИЗЕМЛЯ<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> Кафедра «Строительная механика и гидравлика», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха 7, Харьков, Украина, 61050, тел./факс +38 (057) 730 10 70, эл. почта budmekh@ukr.net

<sup>2</sup> Кафедра «Строительная механика и гидравлика», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха 7, Харьков, Украина, 61050, тел./факс +38 (057) 730 10 70, эл. почта vatulya@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-3823-7201

<sup>3</sup> Кафедра «Строительная механика и гидравлика», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха 7, Харьков, Украина, 61050, тел./факс +38 (057) 730 10 70, эл. почта budmekh@ukr.net

<sup>4\*</sup> Кафедра «Строительная механика и гидравлика», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха 7, Харьков, Украина, 61050, тел./факс +38 (057) 730 10 70, эл. почта s.deryzemlia@kart.edu.ua, ORCID 0000-0001-6556-4454

### РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ СЕЧЕНИЙ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК

**Цель.** Целью предлагаемой статьи является определение оптимальных с точки зрения стоимости и прочности формы и размеров комбинированного сечения с учетом характеристик составляющих материалов. **Методика.** Численные исследования комбинированных равнопрочных сечений, основанные на свойствах приведенных сечений, составляющих материалов и результатах экспериментальных данных различных авторов. **Результаты.** На основании сортамента стальных двутавров был выполнен расчет и подбор комбинированного двутаврового сечения, у которого верхняя полка заменена на тонкостенное стальное «корыто», заполненное бетоном, и его сравнение с двутавровым сечением, усиленным бетонной плитой. Для достижения условия равнопрочности подбираются высота и ширина бетонной плиты. Показано, что наиболее выгодным с точки зрения стоимости является тавровое стальное сечение с верхней полкой в виде тонкостенного стального «корыта» с бетонной плитой. **Научная новизна.** В результате выполненных расчетов, на основании условия равнопрочности, выбраны оптимальные вид и размеры сталебетонного сечения, обеспечивающие наименьшую стоимость. **Практическая значимость.** В настоящее время сталежелезобетонные конструкции все чаще используются в строительстве. Это связано с тем, что они имеют меньший по сравнению с железобетоном собственный вес, а также их стальная часть может использоваться в качестве несъемной опалубки. Усовершенствование таких конструкций приводит к повышению прочностных характеристик и снижению стоимости.

*Ключевые слова:* сталебетон; приведенное сечение; равнопрочное сечение; сталежелезобетонная балка; изгибающий момент

#### Введение

Вопросы повышения несущей способности строительных конструкций, экономии бетона и стали оказывают значительное влияние при строительстве новых и реконструкции существующих зданий и сооружений, в том числе транспортных. Наряду с совершенствованием традиционных железобетонных конструкций большое внимание уделяется использованию конструкций с внешним армированием стальным листом, профилем или замкнутой обоймой, т.е. сталебетонных или сталежелезобетонных конструкций. В настоящее время такие конструкции находят широкое применение при

реализации в строительстве сооружений различных видов систем (колонн, балок, ферм, арок, комбинированных систем) [1-3]. Элементы этих систем испытывают различные виды напряженно-деформированного состояния – центральное растяжение и сжатие, внецентренное сжатие, сжатие с изгибом, продольные изгибы.

#### Обзор исследований и цель работы

В ряде работ [4-6] изучаются комбинированные сечения, однако выбор размеров этих сечений и их преимущества перед другими не обосновываются.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

В работах [5, 13] предлагается использовать сталежелезобетонные конструкции с сечением в виде симметричных стальных профилей, заполненных бетоном. Однако прочность таких сечений ниже прочности используемых стальных профилей [8]. В связи с этим возникает задача выбора формы и размеров комбинированного сечения с учетом характеристик составляющих материалов.

Материалы сталебетонных конструкций имеют, с одной стороны, различные физико-механические характеристики, с другой стороны – различные стоимости. Например, бетон работает преимущественно на сжатие, значит его надо располагать в сжатой зоне сечения; сталь одинаково воспринимает и растяжение, и сжатие, поэтому основную ее массу естественно сосредотачивать в растянутой зоне; механические характеристики сопротивления деформации и разрушению у стали значительно выше, чем у бетона, а это значит, что бетона в составе конструкции должно быть больше, чем стали; вес бетонной конструкции больше, чем стальной; стоимость бетона меньше, чем стали, и т.д.

На рис. 1 показаны два варианта составного сечения сталежелезобетонной балки, работающей на изгиб. На основании анализа работ [6, 7] с предложениями по усилению стальных стержней бетоном, в статье [8] приведены обоснования того, что эффективным усилением при восприятии деформации при изгибе является расположение плиты в сжатой зоне двутаврового сечения (см. рис. 1, б). Такая форма сечения приемлема при реконструкции сооружения для его усиления.

Во вновь проектируемых сталежелезобетонных конструкциях форма и размеры элементов сечения должны выбираться в соответствии с указанными выше особенностями НДС составного сечения.

Поэтому в предлагаемом рациональном сечении (см. рис. 1, а) верхняя (сжатая) полка стального двутавра, в которой нет необходимости для восприятия сжимающих напряжений, отбрасывается и заменяется тонкостенным «корытом». Это «корыто», во-первых, и в основном, необходимо для обеспечения совместной работы бетонной плиты и стального нижнего пояса сечения, во-вторых, целесообразно для использования в качестве опалубки плиты.

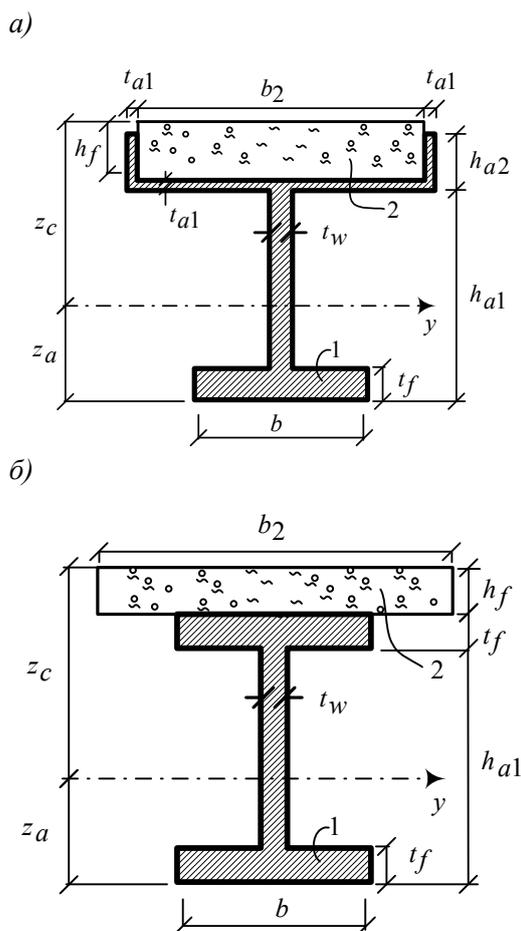


Рис. 1. Поперечное сечение сталежелезобетонной балки:

- а) – тонкостенного «корыта» с бетонной плитой;  
б) – прокатного профиля (1) с железобетонной плитой (2)

### Общие положения

Чтобы сечение было рациональным, необходимо учесть одно из требований оптимальности конструкции – равнопрочность. Равнопрочность для сечения означает, что напряжения в наиболее удаленных от нейтральной оси волокнах одновременно достигают предельных значений. Для бетона это  $\sigma_c = f_{cd}$  в сжатых волокнах, в стали –  $\sigma_a = f_{yd}$  в растянутых волокнах.

Положение нейтральной оси определим, используя метод приведенного сечения [9]. Суммарная осевая сила, действующая в поперечном сечении, должна быть равна нулю, то есть

$$\int \sigma_a dA + \int \sigma_c dA = 0. \quad (1)$$

При изгибе

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$$\sigma_a = \frac{E_a z}{\rho}, \quad \sigma_c = \frac{E_c z}{\rho}, \quad (2)$$

где  $E_a, E_c$  – модули упругости стали и бетона.

Подставив (2) в (1), получим

$$\int z dA + n \int z dA = 0, \quad (3)$$

где  $n = E_c / E_a$ .

### Определение наибольшего изгибающего момента

Согласно уравнению изогнутой оси, наибольший расчетный изгибающий момент  $M_{Ed}$  определяется выражением

$$M_{Ed} = \frac{\gamma_{M0} f_{yd} J_{np}}{z_a}. \quad (4)$$

$$z_a = \frac{\frac{bh_f^2}{2} + \frac{h_{a1}^2 - t_f^2}{2} t_w + (b_2 + 2t_{a1}) t_{a1} \left( h_{a1} + \frac{t_{a1}}{2} \right)}{bt_f + (h_{a1} - t_f) t_w + (b_2 + 2t_{a1}) t_{a1} + 2(h_{a2} - t_{a1}) t_{a1} + \frac{E_c}{E_a} b_2 h_f} + \frac{2(h_{a2} - t_{a1}) t_{a1} \left( h_{a1} + \frac{h_{a2} + t_{a1}}{2} \right) + \frac{E_c}{E_a} b_2 h_f \left( h_{a1} + t_{a1} + \frac{h_f}{2} \right)}{bt_f + (h_{a1} - t_f) t_w + (b_2 + 2t_{a1}) t_{a1} + 2(h_{a2} - t_{a1}) t_{a1} + \frac{E_c}{E_a} b_2 h_f} \quad (6)$$

Здесь в наиболее удаленных от нейтральной оси волокна возникают наибольшие напряжения, которые по условию прочности не должны превышать расчетных значений:

$$\sigma_{a \max} = \frac{M_{Ed} z_a}{J_{np}} \leq \gamma_{M0} f_{yd}, \quad (7)$$

$$\sigma_{c \max} = \frac{E_c}{E_a} \sigma_{np \max} = \frac{E_c}{E_a} \frac{M_{Ed} z_c}{J_{np}} \leq f_{cd}, \quad (8)$$

где  $\gamma_{M0}$  – коэффициент надежности стали;  $J_{np}$  – момент инерции приведенного сечения.

Чтобы сечение было равнопрочным и, следовательно, оптимальным, условия прочности бетона и стали при одном и том же изгибающем моменте  $M_{Ed}$  должны выполняться в виде равенств. Отсюда имеем:

Момент инерции приведенного сечения определяется формулой

$$J_{np} = J_a + \frac{E_c}{E_a} J_c, \quad (5)$$

где  $J_a, J_c$  – моменты инерции стальной и бетонной части сечения относительно нейтральной оси сечения.

### Сечение с верхней полкой в виде тонкостенного «корыта» с бетонной плитой

Подставив в условие (3) подинтегральные выражения, в соответствии с рисунком (см. рис. 1, а), получим уравнение относительно  $z$ , решением которого является положение нейтральной оси  $z_a$  (6).

Расчетное сечение соответствует максимальному изгибающему моменту.

$$\frac{M_{Ed}}{J_{np}} = \frac{f_{cd}}{(E_c/E_a) z_c} = \frac{\gamma_{M0} f_{yd}}{z_a}. \quad (9)$$

Размеры отдельных элементов, составляющих сечение, должны находиться из условия постоянства соотношения расстояний до крайних волокон бетона и стали от нейтральной оси:

$$\frac{z_c}{z_a} = \frac{f_{cd}}{(E_c/E_a) \gamma_{M0} f_{yd}}. \quad (10)$$

Из рисунка (см. рис. 1, а) видно, что

$$z_c = h_{a1} + h_f + t_{a1} - z_a. \quad (11)$$

Из (10) и (11) находим

$$z_a = \frac{(h_{a1} + h_f + t_{a1})(E_c/E_a) \gamma_{M0} f_{yd}}{f_{cd} + (E_c/E_a) \gamma_{M0} f_{yd}}. \quad (12)$$

Уравнение для определения оптимальных размеров составного сечения получаем, при-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

равнивая правые части условия равнопрочности (12) и выражения (6) для нейтральной оси:

$$\frac{\frac{bh_f^2}{2} + \frac{h_{a1}^2 - t_f^2}{2} t_w + (b_2 + 2t_{a1}) t_{a1} \left( h_{a1} + \frac{t_{a1}}{2} \right)}{bt_f + (h_{a1} - t_f) t_w + (b_2 + 2t_{a1}) t_{a1} + 2(h_{a2} - t_{a1}) t_{a1} + \frac{E_c}{E_a} b_2 h_f} +$$

$$\frac{2(h_{a2} - t_{a1}) t_{a1} \left( h_{a1} + \frac{h_{a2} + t_{a1}}{2} \right) + \frac{E_c}{E_a} b_2 h_f \left( h_{a1} + t_{a1} + \frac{h_f}{2} \right)}{bt_f + (h_{a1} - t_f) t_w + (b_2 + 2t_{a1}) t_{a1} + 2(h_{a2} - t_{a1}) t_{a1} + \frac{E_c}{E_a} b_2 h_f} = \frac{(h_{a1} + h_f + t_{a1})(E_c/E_a)\gamma_{M0} f_{yd}}{f_{cd} + (E_c/E_a)\gamma_{M0} f_{yd}}. \quad (13)$$

Уравнение (13) решаем приближенно относительно размеров бетонной плиты  $b_2$  и  $h_f$  (см. рис. 1, а). Для этого задаемся номером двутаврового сечения [10] и принимаем в качестве  $b, t_f, t_w, h_{a1} = h - t_f$  размеры его элементов.

Так как уравнение (13) является нелинейным, можно получить различные сочетания  $b_2$  и  $h_f$  равнопрочных сечений. Из них необходимо выбрать то, для которого  $M_{\max} = M_{Ed}$ , где  $M_{\max}$  – максимальный изгибающий момент,

возникающий в балке от заданной внешней нагрузки.

Получив рациональные значения  $b_2$  и  $h_f$ , находим значение расчетного изгибающего момента для этого сечения и сравниваем его с максимальным для балки. Если эти моменты не совпадают, меняем номер двутавра и производим перерасчет. Далее находим объемы материалов и стоимость погонного метра балки.

Для определения наибольшего изгибающего момента выразим моменты инерции стальной и бетонной составляющих сечения (см. рис. 1, а):

$$J_a = 2 \frac{t_{a1} (h_{a2} - t_{a1})^3}{12} + 2 \frac{t_{a1} (h_{a2} - t_{a1}) \cdot \left( h_{a1} + \frac{h_f + t_{a1}}{2} - z_a \right)^2}{12} + \frac{(b_2 + 2t_{a1}) \cdot t_{a1}^3}{12} +$$

$$+ \frac{(b_2 + 2t_{a1}) \cdot t_{a1} \left( h_{a1} + \frac{t_{a1}}{2} - z_a \right)^2}{12} + \frac{t_w (h_{a1} - t_f)^3}{12} + t_w (h_{a1} - t_f) \cdot \left( z_a - t_f - \frac{h_{a1} - t_f}{2} \right)^2 +$$

$$+ \frac{bt_f^3}{12} + bt_f \left( z_a - \frac{t_f}{2} \right)^2. \quad (14)$$

$$J_c = \frac{b_2 h_f^3}{12} + b_2 h_f \left( h_{a1} + \frac{h_f}{2} + t_{a1} - z_a \right)^2. \quad (15)$$

Зная моменты инерции (14), (15), найдем момент инерции приведенного сечения  $J_{пр}$  (5) и наибольший изгибающий момент (4).

#### Стоимость погонного метра балки

Стоимость погонного метра балки определяется по формуле

$$C = V_a \gamma_a c_a + V_c \cdot c_c = (A_a \cdot 1) \gamma_a c_a + (A_c \cdot 1) \cdot c_c, \quad (16)$$

где  $c_a, c_c$  – стоимости погонного метра стали и бетона (грн/м<sup>3</sup>);  $V_c$  и  $A_c$  – объем погонного метра (м<sup>3</sup>) и площадь бетонной части поперечного сечения (м<sup>2</sup>);  $V_a$  и  $A_a$  – объем погонного метра (м<sup>3</sup>) и площадь стальной части поперечного сечения (м<sup>2</sup>).

#### Сравнение различных видов сечений

Произведем сравнительный анализ стоимости погонного метра балок с различными видами комбинированных сечений (двутавр с верхней полкой в виде «корыта» с бетонной плитой

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

и двутавр с верхней полкой, усиленной бетонной плитой), а также с сечением в виде стального широкополочного двутавра [10].

Рассмотрим двухопорную балку пролетом  $l = 24$  м, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой  $q = 1,7$  кН/м. Механические характеристики материалов:  $f_{cd} = 30,5$  МПа,  $\gamma_{M0} f_{yd} = 200$  МПа,  $E_a = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $E_c = 4 \cdot 10^5$  МПа. Стоимости погонного метра стали и бетона  $c_a = 18$  грн/м<sup>3</sup>,  $c_c = 2500$  грн/м<sup>3</sup>.

Максимальный расчетный изгибающий момент для такой балки равен:

$$M_{\max} = ql^2 / 8 = 1224 \text{ кНм.}$$

Рассмотрим балку с поперечным сечением, соответствующим рисунку (см. рис. 1, а). Отыскиваем номер широкополочного двутавра, для которого расчетный момент  $M_{Ed}$  несколько меньше  $M_{\max}$  при условии, что толщина бетонной плиты  $h_f$  не превышает 6 см. Получаем двутавр 60ШЗ [10], для которого:  $W_y = 5273 \text{ см}^3$ ,  $M_{Ed} = \gamma_{M0} f_{yd} W_y = 1054,6$  кНм.

Размеры стального профиля без верхней полки примем такими же, как у двутавра 60ШЗ:  $b = 32$  см,  $h_{a1} = h - t_f = 57,05$  см,  $t_f = 2,45$  см,  $t_w = 1,8$  см, размеры «корыта» принимаем равными:  $t_{a1} = 0,5$  см,  $h_{a2} = 5$  см.

Решая приближенно уравнение (11) относительно  $h_f$  при значениях  $b_2$  в некотором диапазоне, например, 50...80 см, подберем сечение, для которого расчетный момент равен максимальному:  $M_{Ed} = M_{\max}$ . Получаем размеры  $b_2 = 57,7$  см,  $h_f = 12$  см (табл. 1).

Таблица 1

## Характеристики рационального сечения

$b_2$ , см	$h_f$ , см	$z_a$ , см	$J_{пр}$ , см <sup>4</sup>	$M_{Ed}$ , кНм
50	16,5	42,0	274160	1305,1
55	13,5	40,3	252701	1253,7
57,7	12,0	39,5	241572	1224,4
60	11,0	38,9	234581	1206,3
65	9,5	38,0	225463	1185,3

Получим для двутаврового сечения, усиленного бетонной плитой (см. рис. 1, б) выражения, аналогичные (11)-(15), для определения положения нейтральной оси и наибольшего расчетного изгибающего момента. Проведем для этого сечения расчеты размеров равнопрочного сечения  $b_2, h_f$ , перебирая номера двутавров до выполнения условия  $M_{Ed} \geq M_{\max}$ . В результате получим двутавр 60ШЗ,  $b_2 = 34$  см,  $h_f = 23$  см,  $M_{Ed} = 1234,1$  кНм.

В табл. 2 приведены сравнительные результаты, полученные для двух равнопрочных комбинированных сечений с различным усилением и для двутавра 70ШЗ, обеспечивающего прочность балки при изгибающем моменте  $M = M_{\max}$  ( $W_y = 7059 \text{ см}^3$ ). Стоимость погонного метра определяется согласно (16).

Таблица 2

## Сравнение поперечных сечений

Вид усиления	$b_2$ , см	$h_f$ , см	$M_{Ed}$ , кНм	$C$ , грн/м
Усиление в виде «корыта»	57,7	12,0	1224,4	3147,9
Усиление в виде плиты на верхней полке двутавра	34,0	23,0	1234,1	3292,3
Двутавр	70ШЗ		1411,8	4235,8

Как видно из таблицы (см. табл. 2), наименьшая стоимость имеет место для сечения, усиленного тонкостенным «корытом» с бетонной плитой.

## Выводы

Предложены критерий оптимальности и метод выбора рационального поперечного сечения сталежелезобетонной балки. Рациональным считается сечение, обладающее свойством равнопрочности.

Показано, что наиболее выгодным с точки зрения стоимости является тавровое стальное сечение с верхней полкой в виде тонкостенного стального «корыта», заполненного бетоном (см. рис. 1, а).

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ  
ИСТОЧНИКОВ

1. Стороженко, Л. І. Сталезалізобетонні конструкції [Текст] : навчальний посібник / Л. І. Стороженко, О. В. Семко, В. Ф. Пенц. – Полтава, 2005. – 181 с.
2. Клименко, Ф. Е. Сталобетонные конструкции с внешним полосовым армированием [Текст] / Ф. Е. Клименко. – Київ : Будівельник, 1984. – 88 с.
3. Ватуля, Г. Л. Расчет и проектирование комбинированных и сталобетонных конструкций [Текст] : дисс. д-ра. техн. наук : 05.23.01 / Ватуля Глеб Леонидович ; Укр. гос. ун-т железнодорож. трансп. – Харків, 2015. – 430 с.
4. Стороженко, Л. І. Експериментальні дослідження балок двотаврового перерізу з верхніми залізобетонними полицями [Текст] / Л. І. Стороженко, О. І. Лапенко, О. Г. Горб // Зб. наук. праць «Галузеве машинобудування, будівництво». – Полтава : ПНТУ, 2009. – Вип. 24. – С. 85 - 90.
5. Стороженко, Л. І. Сталезалізобетонні балки із залізобетонним верхнім поясом [Текст] / Л. І. Стороженко, О. А. Крупченко // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2010. – № 662 : Теорія і практика будівництва. – С. 354-360.
6. Jianguo, Nie. Experimental Studies on Shear Strength of Steel-Concrete Composite Beams / Jianguo Nie, Yan Xiao, Lin Chen // Journal of Structural Engineering, 2004. – Vol 130. – № 8. – pp. 1206 – 1214.
7. Vasdravellis, George. Shear Strength and Moment-Shear Interaction in Steel-Concrete Composite Beams / George Vasdravellis, Brian Uy // Journal of Structural Engineering, 2014. – Vol. 140. № 11. – pp. 04014084-1-11.
8. Китов, Ю. П. О целесообразности усиления двутавровых балок путем заполнения межполочных пустот бетоном [Текст] / Ю. П. Китов, М. А. Веревичева, Л. Б. Кравцов // Будівельні конструкції. Міжнародний науково-технічний збірник «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону». Зб. наук. праць. – 2011. – Вип. 74. – С. 318 – 325.
9. Тимошенко, С. П. Механика материалов [Текст] / С. П. Тимошенко, Дж. Гере – Москва : Мир, 1976. – 564 с.
10. ГОСТ 26020-83. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Сортамент [Текст]. – Введ. 1986-01-01. – Москва : Издательство стандартов, 2003. – 5 с.
11. Державні будівельні норми України. ДБН В.2.6-160:2010. Конструкції будинків і споруд. Сталезалізобетонні конструкції. Основні положення [Текст]. – Надано чинності 2011-11-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – 55 с.
12. Голоднов, К. О. Несуча здатність сталобетонних балок при небагаторазово повторних і знакозмінних режимах навантаження [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Голоднов Костянтин Олександрович ; Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій. – Київ, 2015. – 20 с.
13. Лапенко, О. І. Залізобетонні конструкції з робочим армуванням незнімною опалубкою [Текст] : монографія / О. І. Лапенко. – Полтава : ТОВ «АСМІ», 2009. – 328 с.
14. Weiwei Lin. Experimental and Numerical Study on Mechanical Behavior of Composite Girders under Hogging Moment / Weiwei Lin, Teruhiko Yoda // Advanced Steel Construction - 2013 Vol. 9, No. 4, pp. 309-333.

Ю. П. КИТОВ<sup>1</sup>, Г. Л. ВАТУЛЯ<sup>2</sup>, М. А. ВЕРЕВИЧЕВА<sup>3</sup>, С. В. ДЕРИЗЕМЛЯ<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> Кафедра «Будівельна механіка і гідравліка», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха 7, Харків, Україна, 61050, тел./факс +38 (057) 730 10 70, ел. пошта budmekh@ukr.net

<sup>2</sup> Кафедра «Будівельна механіка і гідравліка», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха 7, Харків, Україна, 61050, тел./факс +38 (057) 730 10 70, ел. пошта vatulya@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-3823-7201

<sup>3</sup> Кафедра «Будівельна механіка і гідравліка», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха 7, Харків, Україна, 61050, тел./факс +38 (057) 730 10 70, ел. пошта budmekh@ukr.net

<sup>4\*</sup> Кафедра «Будівельна механіка і гідравліка», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха 7, Харків, Україна, 61050, тел./факс +38 (057) 730 10 70, ел. пошта s.deryzemlia@kart.edu.ua, ORCID 0000-0001-6556-4454

## РАЦІОНАЛІЗАЦІЯ ПЕРЕРІЗІВ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК

**Мета.** Метою запропонованої статті є визначення оптимальної з точки зору вартості і міцності форми і розмірів комбінованого перерізу з урахуванням характеристик матеріалів, що містяться. **Методика.** Числові

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

дослідження комбінованих рівномісних перерізів, що базуються на властивостях приведених перерізів, складових матеріалів і результатах експериментальних даних різних авторів. **Результати.** На підставі сортаменту сталених двотаврів був виконаний розрахунок і підбір комбінованого двотаврового перерізу, у якого верхня полиця замінена на тонкостінне стальне «корито», заповнене бетоном, і його порівняння з двотавровим перерізом, посиленого бетонною плитою. Щоб досягти умову рівномісності, підбираються висота і ширина бетонної плити. Показано, що найбільш вигідне з точки зору вартості є тавровий сталевий переріз з верхньою полицею у вигляді тонкостінного сталюго «корита» з бетонною плитою. **Наукова новизна.** У результаті виконаних розрахунків, на підставі умови рівномісності, вибрані оптимальні вид і розміри сталобетонного перерізу, що забезпечують найменшу вартість. **Практична значимість.** У наш час сталезалізобетонні конструкції все частіше використовуються у будівництві. Це пов'язано з тим, що вони мають меншу у порівнянні з залізобетоном власну вагу, в також їх сталева частина може виступати у якості незнімної опалубки. Удосконалення таких конструкцій призводить до підвищення міцнісних характеристик і зниженню вартості.

*Ключові слова:* сталобетон; наведений переріз; рівномісний переріз; сталезалізобетонна балка; згинальний момент

YU. P. KITOV<sup>1</sup>, G. L. VATULIA<sup>2</sup>, M. A. VEREVICHEVA<sup>3</sup>, S. V. DERYZEMLIA<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport, 7 Feuerbach square, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel/fax +38 (057) 730 10 70, e-mail: budmekh@ukr.net

<sup>2</sup> Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport, 7 Feuerbach square, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel/fax +38 (057) 730 10 70, e-mail vatulya@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-3823-7201

<sup>3</sup> Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport, 7 Feuerbach square, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel/fax +38 (057) 730 10 70, e-mail budmekh@ukr.net

<sup>4\*</sup> Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport, 7 Feuerbach square, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel/fax +38 (057) 730 10 70, e-mail s.deryzemlia@kart.edu.ua, ORCID 0000-0001-6556-4454

## RATIONALIZATION OF COMPOSITE BEAM CROSS SECTION

**Purpose.** Authors describe optimal combine cross section's dimensions and form determination from the cost and strength point of view, taking into account physical-mechanical properties of utilizing materials. **Methodology.** Numerical investigations of composite uniform strength cross-sections have been provide based on the reduced cross section properties, peculiarities of structural materials and experimental results of various authors. **Findings.** The calculations and sections analysis done utilizing the double-T iron assortment. The calculation results compared for combine H-beam whose top flange changed on thin-walled steel case filled by concrete and ordinary H-beam strengthened by concrete slab. Its' depth and width chosed due to uniform strength conditions. Provided investigations shown the cost advantages of H-beams with top flange changed on concrete filled thin-walled steel case. **Originality.** Effective costless cross section's dimensions and form peculiarity proved by the results of uniform strength calculations. **Practical value.** Composite structures are widely used in construction and renovation practice. This helps to decrease the materials consumption value and bridge span dead weight. Thin-walled steel case can be use as retained formwork. Described structures advancing helps to increase their strength properties and simultaneously ensure cost decrease.

*Keywords:* steel concrete; reduced cross-section; uniform strength cross-section; composite beam; bending moment

## REFERENCES

1. Storozhenko L. I., Semko O. V., Pents V. F. *Stalezalizobetonni konstruktsii* [Composite structures]. Poltava, 2005. 181 p.
2. Klimentenko F. Ye. *Stalezhelezobetonnye konstruktsii s vneshnim polosovym armirovaniem* [Composite structures with external strip reinforcement]. Kyiv, Budivelnyk Publ., 1984. 88 p.
3. Vatulia G. L. *Raschet i projektirovanie kombinirovannykh i stalebetonnykh konstruktsiy* Dokt. Diss. [Calculation and design of composite and steel-concrete structures. Doct. Diss]. Kharkov, 2015. 430 p.
4. Storozhenko L. I., Lapenko O. I., Horb O. H. *Ekspyrymentalni doslidzhennia balok dvotavrovoho pererizu z verkhnimy zalizobetonnyu polytsiamy* [Experimental studies of I-shaped cross section beam with upper concrete flange]. *Zbirnyk naukovykh prats Poltavskoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu im. Yuriia*

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Kondratiuka "Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo"* [Proc. of Poltava National Technical Yuri Kondratiuk University], 2009, issue 24, pp. 85-90.
5. Storozhenko L. I., Krupchenko O. A. Stalezalizobetonni balky iz zalizobetonnyim verkhnim poiasom [Composite beams with reinforced concrete upper flange]. *Visnyk Natsionalnoho Universytetu "Lvivska politekhnika" Teoriia i praktyka budivnytstva* [Proc. of National University Lviv Polytechnic "Theory and practice of building"], 2010, issue 662, pp. 354-360.
  6. Jianguo Nie, Yan Xiao, Lin Chen. Experimental Studies on Shear Strength of Steel-Concrete Composite Beams. *Journal of Structural Engineering*, 2004, Vol 130, issue 8, pp. 1206 – 1214.
  7. Vasdravellis G., Brian Uy. Shear Strength and Moment-Shear Interaction in Steel-Concrete Composite Beams. *Journal of Structural Engineering*, 2014, Vol. 140, issue 11, pp. 04014084-1-11.
  8. Kitov YU. P., Verevicheva M. A., Kravtsiv L. B. O tselesoobraznosti usileniia dvutavrovyykh balok putem zapolneniia mezhplochnyykh pustot betonom [Expediency of I-beams strengthening by their inter flange hollows concreting]. *Budivelni konstruktzii. Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk "Naukovo-tekhnichni problemy suchasnoho zalizobetonu"* [Building Constructions. International Science and Technology journal. "Science and Technology problems of modern reinforced concrete".], 2011, issue 74, pp. 318-325.
  9. Timoshenko S. P., Gere Dzh. *Mekhanika materialov* [Mechanics of materials]. Moscow, Mir Publ., 1976. 564 p.
  10. GOST 26020-83. Dvutavry stalnye goriachekatannye s parallelnymi graniami polok. *Sortament*. [State Standard 26020-83. Hot-rolled steel I-beam with parallel flange edges. Assortment]. Moscow, Standartinform Publ., 2003. 5 p.
  11. DSTU V.2.6-160:2010. *Konstruktzii budynkiv i sporud. Stalezalizobetonni konstruktzii. Osnovni polozhennia*. [State Standard V.2.6-160:2010. Buildings and constructions structures. Composite structures. Main rules]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2010. 55 p.
  12. Holodnov K. O. *Nesucha zdattist stalebetonnykh balok pry nebahatorazovo povtornykh i znakovminnykh rezhymakh navantazhennia. Avtorefetar Diss.* [Carrying capacity of steel concrete beams under frequent iterative and sign-variable load conditions. Author's abstract.] Kyiv, 2015. 20 p.
  13. Lapenko O. I. *Zalizobetonni konstruktzii z robochym armuvanniam neznimnoiu opalobkoiu* [Reinforced concrete structures with working reinforcement by retained formwork]. Poltava, ASMI Publ, 2009. 328 p.
  14. Weiwei Lin, Teruhiko Yoda *Experimental and Numerical Study on Mechanical Behavior of Composite Girders under Hogging Moment*. *Advanced Steel Construction - 2013* Vol. 9, No. 4, pp. 309-333.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. А. А. Плугиным (Украина), д.т.н., проф. Д. О. Банниковым (Украина).

Поступила в редколлегию 26.09.2016.

Принята к печати 26.12.2016.