

УДК 624.014.2

**ОПЫТ УСИЛЕНИЯ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК БИМОМЕНТНЫМИ СВЯЗЯМИ****Е.Ю. Давыдов, К.В. Кононович**Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь  
e-mail: kononovichkv@gmail.com

*В статье рассматривается подкрановая балка, требующая усиления. Для обеспечения её общей устойчивости, предлагается усиление балки в виде бимоментных связей. Такой вид усиления увеличивает крутильную и секториальную жёсткость сечения, а также предотвращает развитие деформаций сечения. В статье приводятся теоретические предпосылки к использованию такого метода усиления, и приведены расчёты согласно действующих норм, с построением конечно-элементной модели.*

**Ключевые слова:** балка, кручение, бимомент, усиление, связи, крутильная жёсткость, устойчивость

**EXPERIENCE OF USING BIMOBENT STIFFENERS IN RUNWAY BEAM****E. Davydov, K. Kononovich**Belarusian National Technical University, Republic of Belarus  
e-mail: kononovichkv@gmail.com

*This article is focused on the runway beam which needs the reinforcement. To prevent beam from lateral buckling, the bimobent stiffeners a proposed. This type of reinforcement increase torsional and warping moments of inertia and prevent cross-section from warping. In article showed theoretical background of using this type of reinforcement, and demonstrated calculations of beam in accordance with actual codes, and FEM modeling.*

**Keywords:** beam, torsion, bimoment, reinforcement, stiffeners, torsional moment of inertia, lateral buckling

**Введение.** За всё время развития расчёта и конструирования металлических конструкций, наиболее распространение получили конструктивные схемы из открытых тонкостенных профилей. По сравнению со стержнями закрытого профиля, они обладают преимуществами ввиду простоты изготовления и эксплуатации. Поэтому чаще всего применяются стержни незамкнутого профиля из прокатных двутавров, швеллеров и т.д., как в отдельности, так и в виде сложных составных сечений.

Однако, недостатком тонкостенных открытых профилей, по сравнению с закрытыми, является их низкая сопротивляемость крутящим моментам.

**Усиление открытых профилей.** Достаточно очевидно, что разработка и обоснование какого-либо конструктивного или иного метода, который позволит сохранить преимущества стержней открытого профиля и придать им преимущества стержней закрытых профилей (значительное увеличение сопротивления кручению) представляет большую ценность. Впервые такие мероприятия были предложены автором теории расчёта упругих стержней, профессором В.З.Власовым в его монографии [3]. Метод

предложенный Власовым заключался в добавлении к стержням поперечных планок, закрепляющие продольные края от взаимного продольного смещения, тем самым значительно уменьшающие деформации поперечного сечения стержня при кручении. Так же в его монографии [3] был описан возможный метод расчёта тонкостенных стержней, усиленных планками.

В ЦНИПСе в 1993г профессором Д.В.Бычковым и кандидатом технических наук А.К.Мрощинским были проведены эксперименты, подтвердившие теорию Власова. Некоторые результаты этих экспериментальных исследований были представлены в [2].

Все перечисленные авторы в основном исследовали влияние бимоментных связей на сопротивление стержня кручению, а также влияние этих связей на возникновение напряжений от деформации сечения. Во всех исследованиях изучалась работа тонкостенных стержней с бимоментными связями при их работе на свободное кручение, стеснённое кручение или кручение с изгибом. Однако слабо освещённым остается вопрос о влиянии бимоментных связей на устойчивость тонкостенных открытых стержней при изгибе. По результатам исследований можно сделать вывод о значительном повышении крутильной жёсткости  $G I_k$ . Т.к. момент инерции стержня при свободном кручении имеет значительное влияние на устойчивость стержня при изгибе, можно сделать вывод о её повышении.

Так же остаются слабоизученными вопросы о влиянии бимоментных связей на изгибную жёсткость стержня, и местную устойчивость элементов сечения. Одним из недостатков упомянутых выше экспериментов является то, что испытания проводились на масштабных мелкогабаритных образцах, поэтому изучение поведения образцов выполненных в натуральную величину, так же представляет интерес.

Бимоментные связи могут использоваться для повышения крутильной жёсткости как при новом строительстве, так и при усилении уже существующих конструкций. Одним из примеров такого использования является разработанное авторами статьи усиление подкрановой балки сборочного цеха завода «Амкодор».

Согласно проведенному обследованию, прочность подкрановой балки была обеспечена, однако при проверке устойчивости, эти балки имели напряжения в 1.5 раза превышающие расчётное сопротивление. Основную часть из этих напряжений составляют напряжения от учёта потери устойчивости балки при изгибе использованием коэффициента  $\varphi_b$ :

$$\sigma = \frac{M_F}{\varphi_b W_x} + \frac{M_T}{W_y} = \frac{34882}{0.399 \cdot 3719} + \frac{1168}{242} = 32.126 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} > R_y \frac{I_x}{I_y} = 25.26 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \quad (1)$$

Балка и её сечение изображены на рисунке 1.

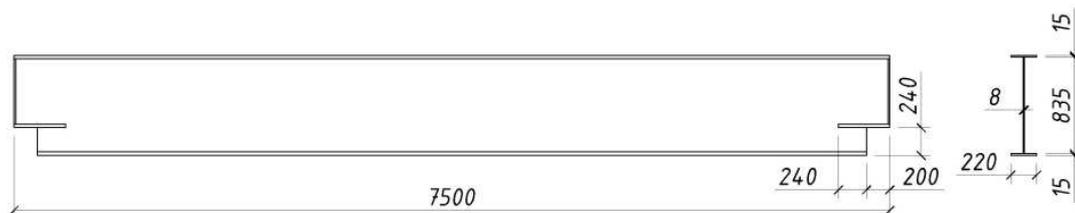


Рисунок 1. – Геометрические размеры усиленной балки

Сечение имеет следующие геометрические характеристики:  $I_x=158\,037\text{ см}^4$ ,  $I_y=2\,665\text{ см}^4$ ,  $I_k=82,87\text{ см}^4$ ,  $W_x=3\,718\text{ см}^3$ ,  $W_y=242\text{ см}^4$ .

Для обеспечения общей устойчивости авторами было предложено усиление бимоментными связями в виде раскосов, что должно было повысить жёсткость стержня при свободном кручении. Предлагаемое усиление представляет собой решётку из уголков 50x5, выполненных из стали С235, приваренных к полкам балки с одной стороны. Предложенный метод усиления обусловлен тем, что рядом с балкой возведены стены, что мешает размещению дополнительных конструкций, раскрепляющих балку из плоскости её работы, а также каких-либо других конструкций, повышающих её устойчивость. Предлагаемое усиление располагается со стороны, к которой есть доступ для производства работ, и не препятствует технологическому процессу. Схема усиления представлена на рисунке 2.

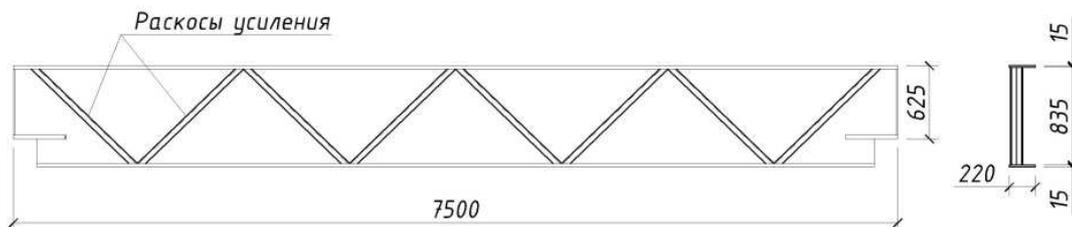


Рисунок 2. – Схема усиления балки

Для аналитического изучения, были построены три модели подкрановой балки в программе ANSYS.

Первая модель представляла собой балку постоянного сечения без изменения высоты сечения на опоре, а также без рёбер жёсткости. Данная модель была необходима для сопоставления результатов моделирования с теоретическими результатами вычисления крутильной жёсткости по формуле:

$$I_k = \frac{\alpha}{3} \sum (t_i^3 b_i) \quad (2)$$

где:

$\alpha$  - коэффициент зависящий от вида сечения (для двутавров обычно принимается  $\alpha = 1,3$ )

$t_i, b_i$  - толщина и ширина пластин, из которых состоит сечение соответственно.

Вторая модель была выполнена по чертежам подкрановой балки без усиления.

Третья модель выполнялась с усилением в виде раскосов. Ко всем моделям прикладывались противонаправленные крутящие моменты по концам балки в  $M_k=200\text{ Нм}$ . Моменты создавались парой сил, приложенных к верхнему и нижнему поясу. Для создания свободного кручения в торцах балок по середине высоты сечения моделировались выступающие участки стенки размерами 2x2 см, на нижние ребра которых накладывались ограничения перемещения по 3 осям. Такое закрепление не ограничивает деформации сечений, а также позволяет точно обозначить центр кручения. Материал балок задавался как сталь С235 с модулем упругости  $E=206\text{ ГПа}$  и модулем сдвига  $G=76,9\text{ ГПа}$ .

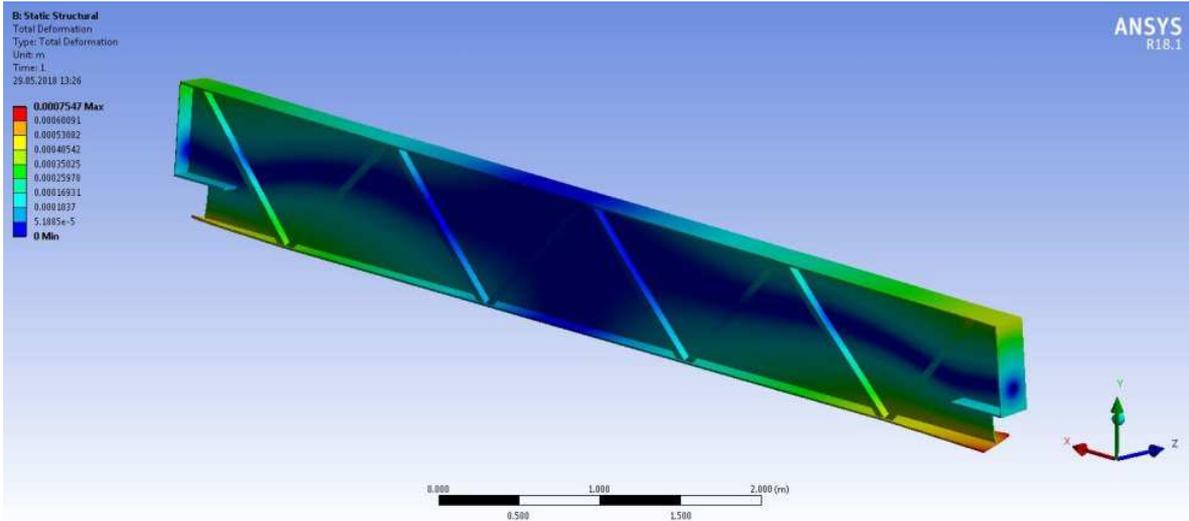


Рисунок 3. – Модель балки с усилением

После расчёта моделей определялся угол поворота сечения, и вычислялся момент инерции при свободном кручении по формуле:

$$I_K = \frac{M_K}{\varphi \theta} \quad (3)$$

По результатам вычислений момента инерции при кручении была для всех моделей была составлена таблица 1.

Таблица 1. – Результаты конечно-элементного моделирования

Модель	Угол поворота сечения, рад.	Относительный угол закручивания, рад.	Момент инерции при свободном кручении, см <sup>4</sup>	Отношение полученного момента инерции к расчетному $I_K/I_K^{теор}$
Балка	0.0212	0.002826	92.01	1.11
Балка без усиления	0.0153	0.002035	127.79	1.54
Балка с усилением	0.0028	0.00037	702.84	8.48

Отношение полученного по первой модели момента инерции к вычисленному теоритически составляет 1,11. В исследованиях Д.В.Бычкова и А.К.Мрощинского указано, что коэффициент для двутавров  $\alpha = 1,3$  принят усреднённым и имеет значения в пределах от 1,1 до 1,5. Экспериментальные исследования показали, что для двутавров с высотой сечения больше 500мм коэффициент  $\alpha$  принимает значения близкие к 1,5 [2]. Учёт этого факта объясняет расхождение между результатами, полученными в модели с теоретическими в 11%. Поэтому, с достаточной уверенностью можно сказать о правильности моделирования балки и точности определения момента инерции при кручении для всех моделей, т.к. они имеют одинаковые условия закрепления и нагружения.

Используя полученные из модели балки с усилением данные о повышении момента инерции при кручении в 8,5 раз, можно сделать заключение о повышении её устойчивости по формуле:

$$\alpha = 1,54 \frac{I_x}{I_y} \left( \frac{l_{ef}}{h} \right)^2 = 1,54 \frac{702,84}{2665} \left( \frac{7500}{865} \right)^2 = 30,49 \quad (4)$$

$$\psi = 1,75 + 0,09 \cdot \alpha = 1,75 + 0,09 \cdot 30,49 = 4,49 \quad (5)$$

$$\varphi_b = \psi \frac{I_x}{I_y} \left( \frac{h}{l_{ef}} \right)^2 \frac{E}{R_y} = 0,865 \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{M_P}{\varphi_b \cdot W_x} + \frac{M_T}{W_y} = \frac{34882}{0,865 \cdot 3718} + \frac{1168}{242} = 15,65 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 25,26 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \quad (7)$$

Представленные вычисления подтверждают теоретические предпосылки и доказывают эффективность принятого метода усиления.

**Заключение.** Исследования, проведенные в этой области показывают, что бимоментные связи повышают крутильную жёсткость, что позволяет открытым профилям лучше сопротивляться закручивающим нагрузкам. Однако, так же они повышают и устойчивость стержней при изгибе, что было показано в данной работе. Поэтому очевидно, что изучение этого вопроса, а также создание рекомендаций и методики расчёта, может оказать влияние на развитие как конструктивных методов усиления существующих конструкций, так и на создание новых конструктивных форм. Авторами были сделаны первые шаги в этом направлении, однако вопрос нуждается в дальнейшем углубленном изучении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бычков, Д.В. Структура механических стержневых тонкостенных конструкций. – М.: Госстройиздат, 1962. – 475 с.
2. Бычков, Д.В. Кручение металлических балок / Д.В. Бычков, А.К. Мрощинский. – М.: Государственное издательство строительной литературы, 1944. – 260 с.
3. Власов, В.З. Тонкостенные упругие стержни. – М.: Гос. издательство физико-математической литературы, 1959. – 568 с.
4. Стальные конструкции. Нормы проектирования: СНиП II-23-81\*. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 2008 г. – 89 с.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:  
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ  
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 28–29 ноября 2019 г.)

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет  
2020

1 – дополнительный экран – сведения об издании

УДК 72:624/628+69(082)

Редакционная коллегия:

Л. М. Парфенова (председатель),  
А. С. Катульская (отв. секретарь), Е. Д. Лазовский,  
Н. В. Давыденко, Р. М. Платонова

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**  
[Электронный ресурс] : электронный сборник статей II международной научной конференции, Новополоцк, 28–29 нояб. 2019 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. Л. М. Парфеновой. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

ISBN 978-985-531-701-3.

Рассмотрены вопросы архитектуры и градостроительства в современных условиях, прогрессивные методы проведения инженерных изысканий и расчета строительных конструкций. Приведены результаты исследований ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов и технологий, энергоресурсосберегающие и природоохранные инновационные решения в инженерных системах зданий и сооружений. Проанализированы организационные аспекты строительства и управления недвижимостью, проблемы высшего архитектурного и строительного образования.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов строительных специальностей учреждений образования.

*Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса.  
Регистрационное свидетельство № 3671815379 от 26.04.2018.*

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь  
тел. 8 (0214) 53 53 92, e-mail: a.bakatovich@psu.by; l.parfenova@psu.by

**№ госрегистрации 3671815379.**

**ISBN 978-985-531-701-3**

@Полоцкий государственный университет, 2020

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Архитектурно-строительный комплекс: Проблемы, перспективы, инновации» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:  
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ  
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 28–29 ноября 2019 г.)

Технический редактор *Т. А. Дарьянова.*

Компьютерная верстка *Т. А. Дарьяновой.*

Компьютерный дизайн обложки *Е. А. Балабуевой.*

---

Подписано к использованию 09.09.2020.

Объем издания: 21,05 Мб. Тираж 3 диска. Заказ 420.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,  
г. Новополоцк,  
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44  
<http://www.psu.by>