

УДК 624.072.31

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.155469

Разработка алгоритма подбора жестких упоров в сталебетонных балках

А. Н. Петров, М. В. Павлюченков, А. В. Нанка, А. П. Палий

Розрахунок сталебетонних балок проводиться з жорстким з'єднанням бетону зі сталевую смугою. Це можливо здійснити, якщо встановити жорсткі упори, які перешкоджають зміщенню смуги відносно бетону. Зусилля, діюче на упор, кількість жорстких упорів та крок визначаються через кути повороту між двома суміжними упорами. Для визначення зусиль, діючих на жорсткі упори, та кроку необхідно спочатку визначити кут повороту між двома суміжними перерізами в межах балки. Кути повороту перерізів визначаються графо-аналітичним методом. Розрахунок по деформаціям залізобетонних та сталебетонних балок виконується за приведеними жорсткостями поперечних перерізів.

При виборі кроку жорстких упорів та їх кількості необхідно прагнути оптимізувати конструкцію сталебетонних балок. Оптимізація полягає в тому, щоб максимальні напруження в сталевій смугі дорівнювали її граничному значенню, а зусилля, діюче в упорах, та крок упорів були однаковими. Для того, щоб зусилля в кожному упорі були однаковими, необхідно нульову ділянку робити меншу за інші.

В ході досліджень був розроблений алгоритм підбору кількості, кроку жорстких упорів та зусиль в них. Підбір проведено по завданім характеристикам використаних матеріалів, діючого зовнішнього навантаження, довжині балки, зв'язним розмірам поперечних перерізів бетону та сталевій смугі. При цьому зусилля в усіх упорах однакові, крок упорів, окрім нульової ділянки, постійний, максимальне зусилля в сталевій смугі, виникаюче в середині прольоту, не перевищує граничного значення, отриманого за розрахунком. Наведений алгоритм дозволяє проводити розрахунок жорстких упорів при завданому значенні зусиль, що діють на них при існуючому навантаженні

Ключові слова: сталебетонна балка, жорсткий упор, крок упорів, зусилля в упорі, сталева смуга, приведена жорсткість, графо-аналітичний метод

1. Введение

Конструкции с внешним армированием – интенсивно развивающееся направление. Сталебетонные конструкции в целом, и сталебетонные балки в частности, получают все большее распространение, как элементы нового строительства, так и при реконструкции существующих зданий и сооружений самого разнообразного назначения.

Многие исследования [1, 2] в этой области проводятся с целью повышения прочности бетона, т. к. бетон является самым распространенным в строительстве материалом. Проведенные исследования имеют два направления: конструкторское и технологическое. Технологическое направление предусматривает изменение состава смеси. Конструкторское направление – вопросы рацио-

нального сочетания бетона с арматурой или применение того или иного типа самой арматуры. В сталебетонных конструкциях такое сочетание является рациональным, так как позволяет повысить прочностные свойства бетона, что приводит к увеличению несущей способности конструкции в целом.

Применение сталебетонных конструкций позволяет эффективно использовать материал конструкции, как в период строительства, так и в период эксплуатации. Кроме того, применение сталебетонных конструкций является прогрессивным решением при усилении, как элементов, так и конструкций в целом самых разнообразных зданий и сооружений в промышленном и гражданском строительстве.

Несмотря на все преимущества сталебетонных конструкций, существуют и определенные сложности, связанные как с изготовлением, так и с конструктивными решениями. Для сталебетонных балок, в частности, актуальной является задача соединения бетона и стального листа. В большинстве случаев для этой цели применяются жесткие упоры или гибкие анкера. Однако задача расчета усилий в жестких упорах изучена недостаточно.

В нормативных документах, как например ДБН В.2.6-160:2010 [3], рассмотрены разнообразные типы сталебетонных балок и приведены рекомендации по их расчету. В пункте 9.2.1.4.1.a данного документа отмечается, что между конструкционной сталью, арматурой и бетоном существует полное взаимодействие. Использование жестких упоров обеспечивает соединение стальной полосы с бетоном, что, в свою очередь, приведет к совместной работе бетона и стали. В пункте 6.1.1 Еврокод 4 [4] также отмечается, что объединение является полным, если увеличение количества объединительных деталей не приводит к увеличению расчетной несущей способности элемента по изгибающему моменту.

В пункте 9.5 ДБН В.2.6-160:2010 [3] приведены рекомендации по конструированию и расчету количества сдвиговых соединений. В частности отмечается, что сдвиговые соединения должны устанавливаться для передачи продольных усилий сдвига между бетоном и стальным профилем. В ДСТУ Б В.2.6-216:2016 [5] приведены основные положения по расчету соединительных элементов сталебетонных конструкций. В пункте 4.3.1 приводится ограничение по размерам анкерных упоров. Такие упоры должны иметь высоту не менее 4 диаметра самого упора и его диаметр не менее 16 мм и не более 25 мм. В пункте 6.6.1.2 [4] приведены такие же рекомендации. Следовательно, количество таких упоров желательно минимизировать с целью экономии материала и снижения трудозатрат, связанных с креплением упоров к стальному листу. В пункте 4.4.1 [5] указывается, что соединительные элементы должны располагаться по длине балки таким образом, чтобы передавать продольный сдвиг и предотвращать отслаивание бетона от стального листа. В связи с этим, желательно решить данную задачу с минимальным количеством упоров. В пункте 4.4.5 [5] отмечается, что необходимое количество соединительных элементов может распределяться между точкой максимального положительного момента и прилегающей опорой, либо точкой максимального отрицательного момента соответственно закону распределения усилий продольного сдвига. Таким образом,

желательно, учитывая распределение сдвиговых усилий, расставить упоры как можно более рационально.

Учитывая вышеизложенное, необходимость проведения предложенных авторами исследований заключается в том, чтобы оптимизировать конструкцию сталебетонной балки за счет сокращения количества жестких упоров. Такое уменьшение, хотя и не дает значительной экономии материала, но позволяет уменьшить трудозатраты на изготовление балок. Кроме того, процесс изготовления связан с соединением жестких упоров со стальной полосой. Одним из способов соединения является сварка. Стальная полоса имеет малую толщину, что может привести к ее деформированию в процессе сварки. Уменьшение количества упоров приведет к уменьшению брака.

В пункте 6.6.5.5 [4] приведены рекомендации относительно шага объединительных деталей. Эти рекомендации, хотя и накладывают определённые ограничения, все же позволяют варьировать шаг, а, следовательно, и количество жестких упоров. Как уже отмечалось, уменьшение количества упоров приведет к снижению трудозатрат. Кроме того, изменение шага и количества упоров позволит регулировать величину усилия в стальной полосе, добиваясь того, чтобы усилие равнялось предельному значению. Все это позволит более рационально использовать материал конструкции. Таким образом, результаты исследований могут иметь практическую ценность. Следовательно, оптимизация сталебетонных балок является актуальной проблемой.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В работе [1] рассмотрены сталебетонные балки из композитного бетона с добавлением резины. Как показано в работе, такое решение позволяет улучшить соединение стали с бетоном и пластические свойства анкеров. Однако предложенное решение направлено на улучшение использованного материала, а не оптимизацию конструкции. В работе [2] рассмотрены балки из бетона с добавлением металлической фибры. Фибробетон сегодня получает большое распространение в различных конструкциях. Однако оптимизация сталебетонных балок, как и в предыдущей работе, достигается за счет использования более прогрессивного материала.

В работе [6] балки использованы в составе сложных конструкций зданий в районах с повышенной сейсмоактивностью. Акцент исследований поставлен на компьютерное моделирование расчетных схем таких конструкций. Предложенный материал, кроме всего прочего, показывает, что рассматриваемые конструкции могут применяться и в сложных условиях работы.

Материал, предложенный в [7], представляет собой численные исследования сталебетонных балок. Данные исследования проводились с целью изучения влияния удаления нижней плиты, влияния изменения высоты стальной балки и толщины бетонной плиты. Такой подход, хотя и является связанным с улучшением конструкции, но не связан с оптимальной расстановкой анкеров. В то же время, анкерные упоры в конструкции используются. В работе [8] представлены аналитические решения, основанные на общих дифференциальных уравнениях и формулировках конечных элементов для анализа балок, в частности ис-

следование взаимодействия бетона и стали посредством применения гибких сдвиговых соединений. Вопрос же количества таких соединений и способы их расстановки не рассматривается.

Необходимо также отметить, что вопросы расчета увеличения прочности бетона при многоосном напряженном состоянии остались нерешенными или решенными недостаточно полно. В исследованиях разных ученых имеются значительные расхождения в численных значениях полученных результатов. [9–15]. Причина этого заключается в том, что процент увеличения несущей способности сталебетонной конструкции, за счет трансформации одноосного напряженного состояния в многоосное, в значительной степени зависит от многих факторов. К этим факторам относятся как физические, так и механические свойства бетона, способы передачи внешней нагрузки, соотношение величин главных напряжений, конструктивные особенности и т. п.

Вариантами преодоления соответствующих трудностей могут быть различные способы. Такими способами могут являться экспериментальные исследования, как численные, так и натурные, компьютерное моделирование или новые конструктивные решения.

В работе [9] проведены такие исследования. Показано, что в качестве упрочняющего элемента сталебетонной балки может являться анкер. Способы рациональной расстановки анкеров не рассматривались. В работе [10] экспериментальные исследования направлены на изучение особенности напряженно-деформированного состояния преднапряженных сталежелезобетонных изгибаемых элементов при действии кратковременной статической нагрузки с учетом физической нелинейности бетона и стали.

В работе [11] представлена компьютерная модель неразрезной балки. Изучается изменение несущей способности балок в зависимости от процента их армирования. Вопросы соединения стали с бетоном в данной работе не рассматриваются.

Работа [12] посвящена регулированию положения нейтральной оси сталебетонных конструкций за счет изменения размеров поперечных сечений составных элементов балок. Такие исследования позволяют оптимизировать саму конструкцию балки, но вопросы соединения стали с бетоном не рассматриваются.

Проблема является актуальной для всех сталебетонных конструкций в целом. Для сталебетонных балок в частности, важной является задача соединения стального листа с бетоном. Такое соединение должно обеспечить совместную работу стали и бетона под нагрузкой. В работе [13] предложено соединять стальной лист с бетоном путем склеивания. Известны работы, как например [14], в которых исследована возможность применения акриловых клеев для соединения стального листа с бетоном. Этот способ хотя и имеет свои преимущества, но не может считаться универсальным. Работа таких конструкций на данный момент изучена недостаточно. Кроме того клеевое соединение имеет свои особенности работы, которые при расчете и проектировании сталебетонных конструкций необходимо учитывать. Так, в работе [13] отмечается, что графики изменения прогиба в зависимости от напряжения свидетельствуют о резком увеличении де-

формативности после отрыва стали от бетона. Таким образом, можно сказать, что использование клея для соединения стали и бетона, хотя имеет право на существование, пока не может заменить все другие способы.

Сегодня в большинстве случаев для этой цели применяются жесткие упоры или гибкие анкера. Такой способ соединения рассматривается в работах ученых известных на Украине научных школ [15, 16] и других. Однако в этих работах акцент делается на другие проблемы, связанные со сталебетонными балками. Это поиск новых конструктивных решений, применение новых видов анкеров и способов соединения стали с бетоном и т. п.

Так, в работе [15] предложен новый тип сталежелезобетонных балок. Конструкция такой балки представляет собой железобетонную полку с арматурным каркасом и стального таврового элемента. Исследования посвящены применению различных типов соединений бетона со стальным тавровым элементом.

В работе [16] приведены экспериментальные исследования пяти серий сталебетонных балок. Серии отличались между собой различным соотношением листовой и стержневой арматуры. Задачей данных исследований, кроме прочего, являлось установление оптимального соотношения использования листовой стали Ст-3 в объединении со стержневой арматурой классов Ат-800 и А-1000.

В работе [17] были приведены результаты исследования напряженно-деформированного состояния сталебетонных балок. Соединение стального листа с бетоном произведено посредством гибких анкеров. Показано, что гибкие анкера обладают определенной податливостью. Кроме того, соединение самих анкеров со стальным листом может быть произведено различными способами. Такое разнообразие конструктивных решений само по себе создает определенные трудности для разработки единой методики расчета. Различные виды гибких анкеров имеют неодинаковую степень податливости. Учет податливости гибкого анкера в значительной степени влияет на несущую способность конструкции. Сама же методика расчета зачастую вообще не учитывает податливость гибких анкеров или учитывает недостаточно точно. Таким образом, вопросы, связанные с созданием единой методики расчета гибких анкеров, остались нерешенными. Уточнить данную методику, вероятно, представляется возможным, распространив предложенный в данной статье метод расчета жестких упоров на расчет гибких анкеров, что оставляет поле деятельности для дальнейших исследований. Постановка проблемы данных исследований заключается в оптимизации сталебетонных балок. Рассматривается сталебетонная балка на двух опорах. Способ внешнего нагружения принят в виде сосредоточенной силы $F=10$ кН, приложенной посередине пролета балки.

Оптимизировать такие конструкции предполагается за счет рационального размещения жестких упоров. Рациональным можно считать такой шаг, при котором усилия в жестких упорах одинаковые, а усилие в стальной полосе равно предельному значению.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка алгоритма подбора жестких упоров в сталебетонных балках.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

– рассчитать шаг упоров с одинаковыми усилиями за счет рациональной их расстановки и получить усилие в стальной полосе, которое равно предельному значению, что и позволит оптимизировать конструкцию сталебетонной балки;

– провести численный эксперимент для подтверждения достоверности исследований.

4. Материалы и методы разработки алгоритма подбора жестких упоров в сталебетонных балках

Для решения поставленных задач используются как нормативные методы [3–5], так и методы, предложенные ранее [18, 19].

Согласно нормативным документам [3, 4], принимается гипотеза о полном взаимодействии бетона и стального листа, что в рассматриваемой конструкции достигается путем постановки жестких упоров. Также принимается гипотеза абсолютной жесткости применяемых упоров. Вид рассматриваемых упоров в тех же нормативных документах регламентируется как абсолютно жесткий.

Расчет сталебетонных балок производится с жестким соединением бетона со стальной полосой. Это можно осуществить постановкой в балках жестких упоров, которые препятствуют смещению полосы по отношению к бетону. Усилие, действующее на упор, число и шаг, определяется через углы поворота между двумя смежными упорами. Поэтому определим удлинение волокон через углы поворота сечений между смежными упорами.

Для определения углов поворота сечений в работе используется графо-аналитический метод определения перемещений. Определение продольных усилий производится путем вычисления относительных удлинений на том же участке, где действует данные продольные силы.

Поперечное сечение сталебетонной балки является составным. Такое сечение включает в себя бетон и сталь. Расчет таких конструкций производится по приведенной жесткости. Геометрические характеристики рассматриваемого сечения также являются приведенными величинами.

5. Результаты разработки алгоритма подбора жестких упоров

Радиус кривизны изогнутой оси балки изменяется от бесконечности до какого-либо определенного его значения [19]. При изгибе нейтральная ось не меняет своей длины l_0 . На расстоянии h_2 от нейтральной оси длина дуги увеличивается до l_2 , на расстоянии h_1 уменьшается до l_1 .

Из рис. 1 можно определить удлинение дуги l_2 . $\Delta l_2 = \alpha \cdot h_2$.

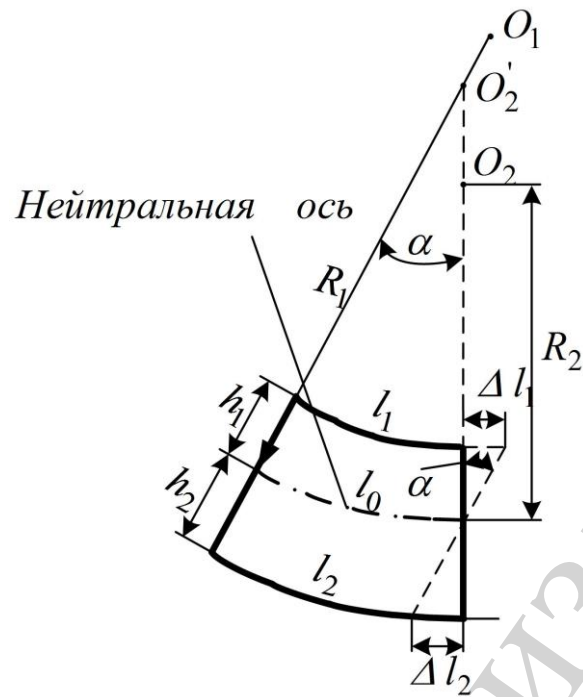


Рис. 1. К определению удлинений волокон через углы поворота сечений

Для определения усилий, действующих на жесткие упоры, и их шага необходимо вначале определить угол поворота между двумя сечениями в пределах балки. Поэтому рассмотрим балку, приведенную на рис. 2. Получим формулу для определения взаимного угла поворота участка балки между точками 1 и 2.

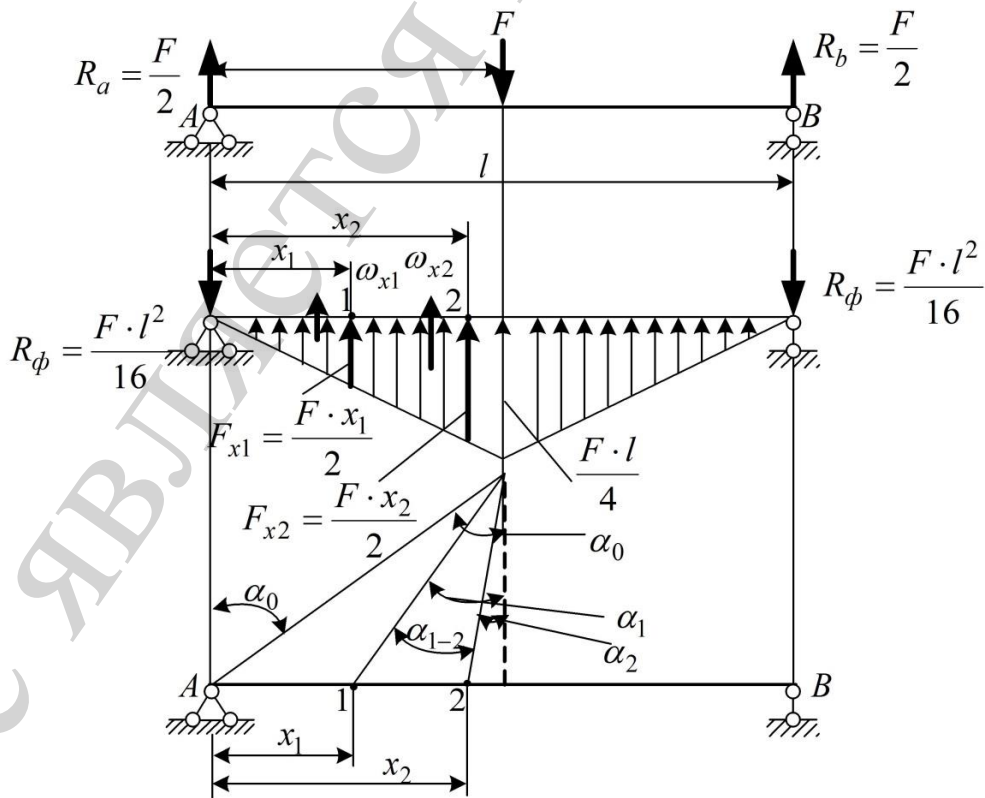


Рис. 2. К определению взаимных углов поворота двух сечений в пролете балки

Используя графо-аналитический метод, определим угол поворота в точке 1 на расстоянии $x=x_1$ при действии на балку сосредоточенной силы F .

$$\alpha_1 = \frac{1}{EJ}(-R_\phi + \omega_{x_1}) = -\frac{F \cdot l^2}{16EJ} + \frac{F \cdot x_1^2}{4EJ} = -\frac{F}{16EJ}(l^2 - 4x_1^2). \quad (1)$$

Угол поворота в точке 2 на расстоянии $x=x_2$

$$\alpha_2 = \frac{1}{EJ}(-R_\phi + \omega_{x_2}) = -\frac{F \cdot l^2}{16EJ} + \frac{F \cdot x_2^2}{4EJ} = -\frac{F}{16EJ}(l^2 - 4x_2^2). \quad (2)$$

Тогда взаимный угол поворота сечений 1 и 2 будет равен

$$\alpha_{1-2} = \alpha_1 - \alpha_2 = -\frac{F}{16EJ}(l^2 - 4x_1^2) - \left[-\frac{F}{16EJ}(l^2 - 4x_2^2) \right] = \frac{F}{4EJ}(x_1^2 - x_2^2). \quad (3)$$

По этой формуле определяется взаимный угол поворота двух сечений между точками 1 и 2.

Эта формула справедлива, если $0 \leq x_1, x_2 \leq l/2$. Знак в формуле (3) определяется по повороту сечения. Если сечение поворачивается по часовой стрелке, то знак угла поворота отрицательный, и наоборот.

Расчет по деформациям железобетонных и сталебетонных балок согласно [3, 18], выполняется по приведенным жесткостям поперечных сечений. Приведенная жесткость определяется по формуле

$$B = \phi_{b1} E_b I_{red}, \quad (4)$$

где I_{red} – приведенный осевой момент инерции поперечного сечения балки, ϕ_{b1} – коэффициент, учитывающий влияние кратковременной ползучести бетона и принимаемый для тяжелого бетона 0,85, E_b – модуль деформации бетона.

Поэтому формула (3) примет вид

$$\alpha_{1-2} = -\frac{F}{4B}(x_2^2 - x_1^2). \quad (5)$$

Приведенный осевой момент инерции поперечного сечения сталебетонной балки определяется следующим образом (рис. 3).

Определяем положение центра тяжести приведенного сечения. Для этого вначале определяем приведенный статический момент сечения

$$S_{x1} = bh \left(\frac{h}{2} + \delta \right) + b\delta \frac{\delta}{2} n_1,$$

где

$$n_1 = \frac{E_s}{E_b}. \quad (6)$$

Определяем приведенную площадь

$$A = bh + b\delta n_1. \quad (7)$$

Положение центра тяжести

$$z_c = \frac{S_{x1}}{A} = \frac{bh \left(\frac{h}{2} + \delta \right) + bn_1 \frac{\delta^2}{3}}{bh + b\delta n_1}. \quad (8)$$

Приведенный осевой момент инерции поперечного сечения

$$I_{red} = \frac{bh^3}{12} + bh \left(z_c - \frac{h}{2} \right)^2 + \frac{b\delta^3}{12} n_1 + n_1 b\delta \left(z_c - \frac{\delta}{2} \right)^2. \quad (9)$$

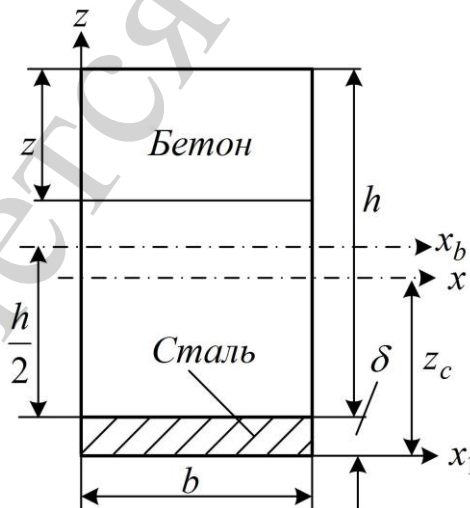


Рис. 3. Поперечное сечение сталебетонной балки

Для определения усилий между упорами в стальной полосе рассмотрим половину длины балки длиной l , в которой установлено n жестких упоров с шагом c (рис. 4).

Учитывая, что нейтральная ось проходит через центр тяжести приведенного сечения, удлинение середины стального листа сталебетонной балки участка

длиной c определяем с использованием формулы $\Delta l_2 = \alpha \cdot h_2$. Расстояние от нейтральной оси до центра тяжести стального листа равно $b_1 = z_c - \delta/2 \cdot b_1$. Шаг упоров $c = x_2 - x_1$.

Удлинение волокна балки между двумя сечениями 1 и 2.

$$\Delta l = \alpha_{1-2} \cdot b_1 = \frac{F \cdot (x_2^2 - x_1^2)}{4B} b_1. \quad (10)$$

Тогда формула (10) примет следующий вид

$$\Delta l_c = \alpha_{1-2} \cdot b_1 = \frac{F \cdot (x_2 - x_1)(x_2 + x_1)}{4 \cdot B} \left(z_c - \frac{\delta}{2} \right). \quad (11)$$

Для определения продольной силы, действующей на участке длиной c , необходимо определить относительное удлинение этого участка

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta l_c}{c} = \frac{F(x_2 - x_1)(x_2 + x_1)}{4 \cdot B(x_2 - x_1)} \left(z_c - \frac{\delta}{2} \right) = \frac{F(x_2 + x_1)}{4 \cdot B} \left(z_c - \frac{\delta}{2} \right). \quad (12)$$

Продольная сила на участке длиной c действует в результате удлинения стального листа, которая определяется по формуле.

$$N_{1-2} = \sigma_s \cdot A_s = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot A_s = \frac{F(x_2 + x_1)}{4 \cdot B} \left(z_c - \frac{\delta}{2} \right) \cdot E_s \cdot A_s.$$

$$N_{1-2} = \frac{F(x_2 + x_1)}{4 \cdot B} \left(z_c - \frac{\delta}{2} \right) \cdot E_s \cdot A_s = A_1(x_2 + x_1), \quad (13)$$

где

$$A_1 = \frac{F}{4B} \left(z_c - \frac{\delta}{2} \right) E_s \cdot A_s, \quad (14)$$

где A_s – площадь поперечного сечения стального листа, σ_s – напряжение в стальном листе, E_s – модуль упругости стали, δ – толщина стального листа, x_1 – расстояние от опоры до первой точки, x_2 – расстояние от опоры до второй точки, z_c – положение центра тяжести приведенного сечения.

По формуле (13) определяется продольная сила, действующая между двумя жесткими упорами с расстоянием между ними $c = x_2 - x_1$.

Зная, как определить продольную силу на каждом участке между упорами, можно определить число и шаг упоров, а также усилия в них.

При выборе шага и числа жестких упоров необходимо стремиться к оптимизации сталебетонных балок, чтобы максимальное напряжение в стальной полосе равнялось ее предельному значению, а усилия, приходящиеся на упоры и шаг упоров, были одинаковыми. Кроме этого, чтобы усилия во всех упорах были одинаковыми необходимо нулевой участок (рис. 4) делать несколько меньше остальных. Обозначим длину этого участка через величину x .

При количестве упоров на половине длины балки n число участков длиной c также будет равно n (рис. 4). Теперь можно записать выражение для определения усилия на участке $n-1/2$, используя формулу (13). Здесь $x_2=nc+x$, а $x_1=(n-1)c+x$.

$$N_{n-1/2} = A_1(x_2 + x_1) = A_1[nc + x + (n-1)c + x] = [2nc - c + 2x]A_1. \quad (15)$$

Полученная величина усилия на участке $n-1/2$ должна соответствовать силе, полученной в [17] для проверки напряжений в бетоне и стальном листе.

$$N_{n-1/2} = F_1 = \frac{M}{a_1} = \frac{Fl}{4a_1},$$

где

$$a_1 = h_0 - z/2. \quad (16)$$

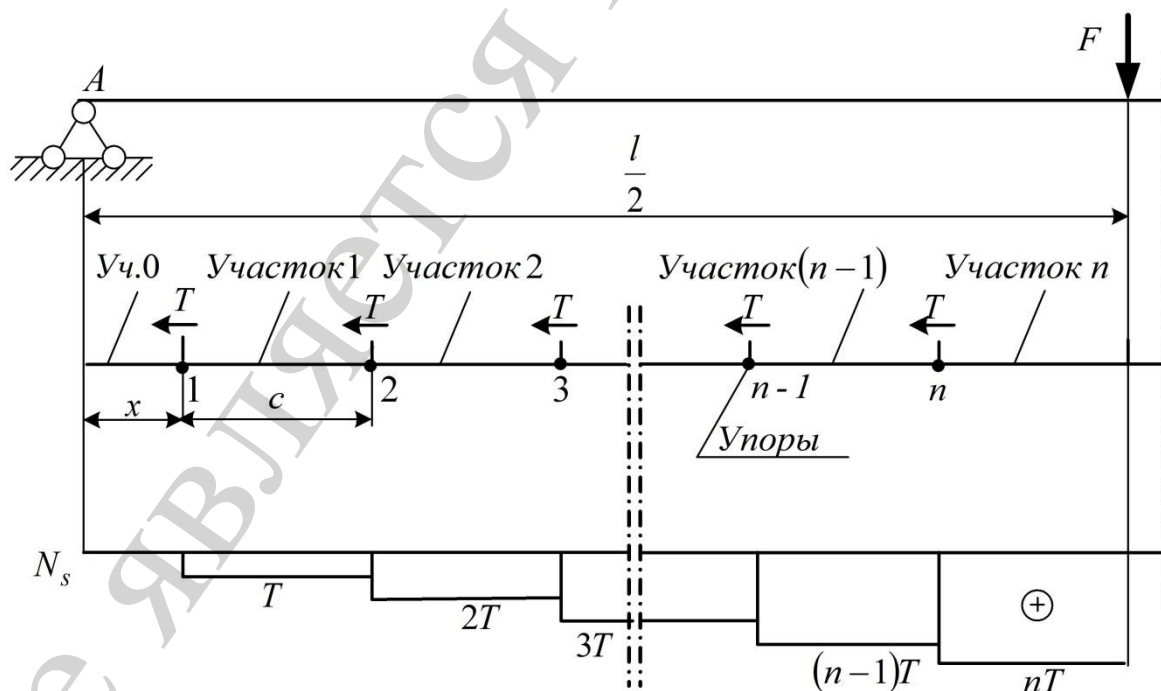


Рис. 4. Расположение жестких упоров и эпюра продольных сил в стальной полосе на половине сталебетонной балки

Из выражения (15) определяем

$$2x = \frac{N_{n-1/2} - 2ncA_1 + cA_1}{A_1}. \quad (17)$$

Выразим длину балки через длину участков и число упоров

$$\frac{l}{2} = nc + x, \quad l = 2nc + 2x.$$

Отсюда

$$2x = l - 2nc. \quad (18)$$

Приравняем (17) и (18), преобразуем и получим формулу, по которой можно определять длину участка, если известны величины A_1 , l , $N_{n-1/2}$.

$$c = \frac{A_1 l - N_{n-1/2}}{A_1}. \quad (19)$$

Однако длина участков зависит и от усилия, воспринимаемого упорами и от числа упоров. В формуле (19) это не отражено. Поэтому выразим шаг упоров через усилие, действующее на упор и число упоров. Для этого определим усилие, действующее на первый упор.

$$T = (c + 2x)A_1. \quad (20)$$

Отсюда определим

$$x = \frac{T - cA_1}{2A_1}. \quad (21)$$

Из выражения (18) также определяем длину нулевого участка x . При такой длине нулевого участка усилия во всех упорах будут одинаковыми

$$x = \frac{l - 2cn}{2}. \quad (22)$$

Приравняем выражения (22) и (21) и после несложных преобразований получим формулу для определения длин участков с учетом числа упоров и усилий, которые они воспринимают.

$$c = \frac{lA_1 - T}{A_1(2n - 1)}. \quad (23)$$

Максимальное значение продольной силы, действующей на стальную полосу можно определить по формуле

$$N_{n-1/2} = nT. \quad (24)$$

В формуле (22) две неизвестных величины n и c . Поэтому преобразуем ее. Подставим в формулу (15) значение формулы (21)

$$N_{n-1/2} = [2nc - c + 2x]A_1 = 2ncA_1 - cA_1 + 2A_1 \frac{T - cA_1}{2A_1} = 2ncA_1 - cA_1 + T - cA_1.$$

Отсюда определяем

$$c = \frac{N_{n-1/2} - T}{2A_1(n - 1)}. \quad (25)$$

Приравнявая формулы (23) и (25), после несложных преобразований, получим формулу для определения шага упоров

$$\frac{lA_1 - T}{A_1(2n - 1)} = \frac{N_{n-1/2} - T}{2A_1(n - 1)}, \quad n = \frac{2A_1l - N_{n-1/2} - T}{2(A_1l - N_{n-1/2})}. \quad (26)$$

Возможен вариант, когда усилие, действующее на упор, неизвестно. В этом случае шаг упоров определяется по формуле (19). Для определения числа упоров используем формулы (20), (22) и (24).

Подставим в формулу (20) значение формулы (22).

$$T = (c + 2x)A_1 = cA_1 + 2 \frac{l - 2nc}{2} A_1 = cA_1 + lA_1 - 2cnA_1.$$

Подставим в эту формулу выражение (24).

$$\frac{N_{n-1/2}}{n} = A_1 \frac{lA_1 - N_{n-1/2}}{A_1} + A_1l - 2nA_1 \frac{lA_1 - N_{n-1/2}}{A_1}.$$

После преобразований получим квадратное уравнение относительно n

$$2n^2 \left(lA_1 - N_{n-1/2} \right) - n \left(2lA_1 - N_{n-1/2} \right) + N_{n-1/2} = 0.$$

Решая квадратное уравнение, получим

$$n = \frac{2lA_1 - N_{n-1/2}}{4 \left(lA_1 - N_{n-1/2} \right)} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{8 \left(lA_1 - N_{n-1/2} \right) N_{n-1/2}}{\left(2lA_1 - N_{n-1/2} \right)^2}} \right]. \quad (27)$$

Имея набор формул, можно осуществлять подбор шага, числа жестких упоров и определять усилий в них.

Результатом проведенных исследований является алгоритм подбора жестких упоров, если известны характеристики материалов, размеры поперечных сечений балки, длина балки l и внешняя нагрузка, действующая на балку F . Последовательность действий, согласно предложенному алгоритму, приводится ниже.

По формуле (9) определяем приведенный осевой момент инерции поперечного сечения балки.

$$I_{red} = \frac{bh^3}{12} + bh \left(z_c - \frac{h}{2} \right)^2 + \frac{b\delta^3}{12} n_1 + n_1 b \delta \left(z_c - \frac{\delta}{2} \right)^2.$$

По формуле (4) определяем приведенную жесткость поперечного сечения балки.

$$B = \phi_{b1} E_b I_{red}.$$

По формуле (14) определяем коэффициент

$$A_1 = \frac{F}{4B} \left(z_c - \frac{\delta}{2} \right) E_s \cdot A_s.$$

По формуле (16) определяем

$$N_{n-1/2} = \frac{Fl}{4a_1} = \frac{Fl}{4 \left(h_o - z/2 \right)}.$$

По формуле (19) определяем шаг упоров

$$c = \frac{A_1 l - N_{n-1/2}}{A_1}.$$

По формуле (27) определяем число упоров

$$n = \frac{2cA_1 + N_{n-1/2}}{4cA_1} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{8cA_1 N_{n-1/2}}{(2cA_1 + N_{n-1/2})^2}} \right].$$

Определяем усилие, действующее на упор по формуле (24)

$$T = \frac{N_{n-1/2}}{n}.$$

Определяем длину нулевого участка по формуле (22)

$$x = \frac{l - 2cn}{2}.$$

Проверяем максимальное усилие в стальной полосе

$$N_{\max} = [2nc - c + 2x] A_1 \approx N_{n-1/2}$$

или

$$N_{\max} = nT \approx N_{n-1/2}.$$

Проверяем полную длину балки

$$l = 2nc + 2x.$$

Зная усилия, действующие на упоры, можно осуществлять подбор их размеров.

6. Численные исследования сталебетонных балок

По разработанному алгоритму подбора жестких упоров в сталебетонных балках были проведены численные расчеты. Рассматривалась балка на двух опорах, пролетом 2м. К балке прикладывалась нагрузка величиной 10 кН. Нагрузка была приложена в середине пролета. Поперечное сечение балки показано на рис. 5.

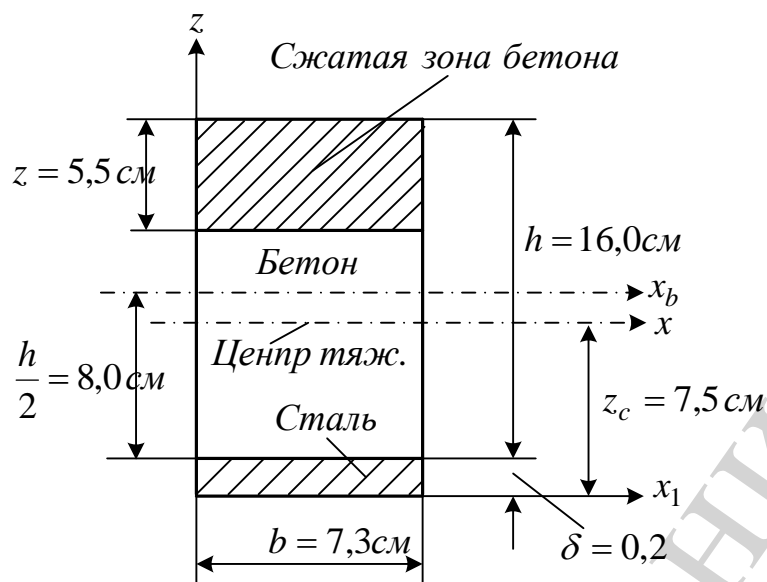


Рис. 5. Сечение сталебетонной балки

Из расчета по предложенному алгоритму количество жестких упоров равно четырем. Шаг упоров равен 22.2 см. Нулевой пролет равен 11.11 см. Величина усилий в жестких упорах одинакова и равна 9.363 кН. Максимальное продольное усилие в стальном листе равно 37.453 кН, что равняется предельному значению, вычисленному по тому же алгоритму.

Для сравнительных исследований были рассчитаны две балки с аналогичными размерами и нагрузкой. Отличие состояло в количестве жестких упоров – три и пять соответственно. Величины усилий в жестких упорах изменились. Максимальное продольное усилие также не соответствует предельному значению. Схема балки и эпюры продольных сил в стальном листе показаны на рис. 6.

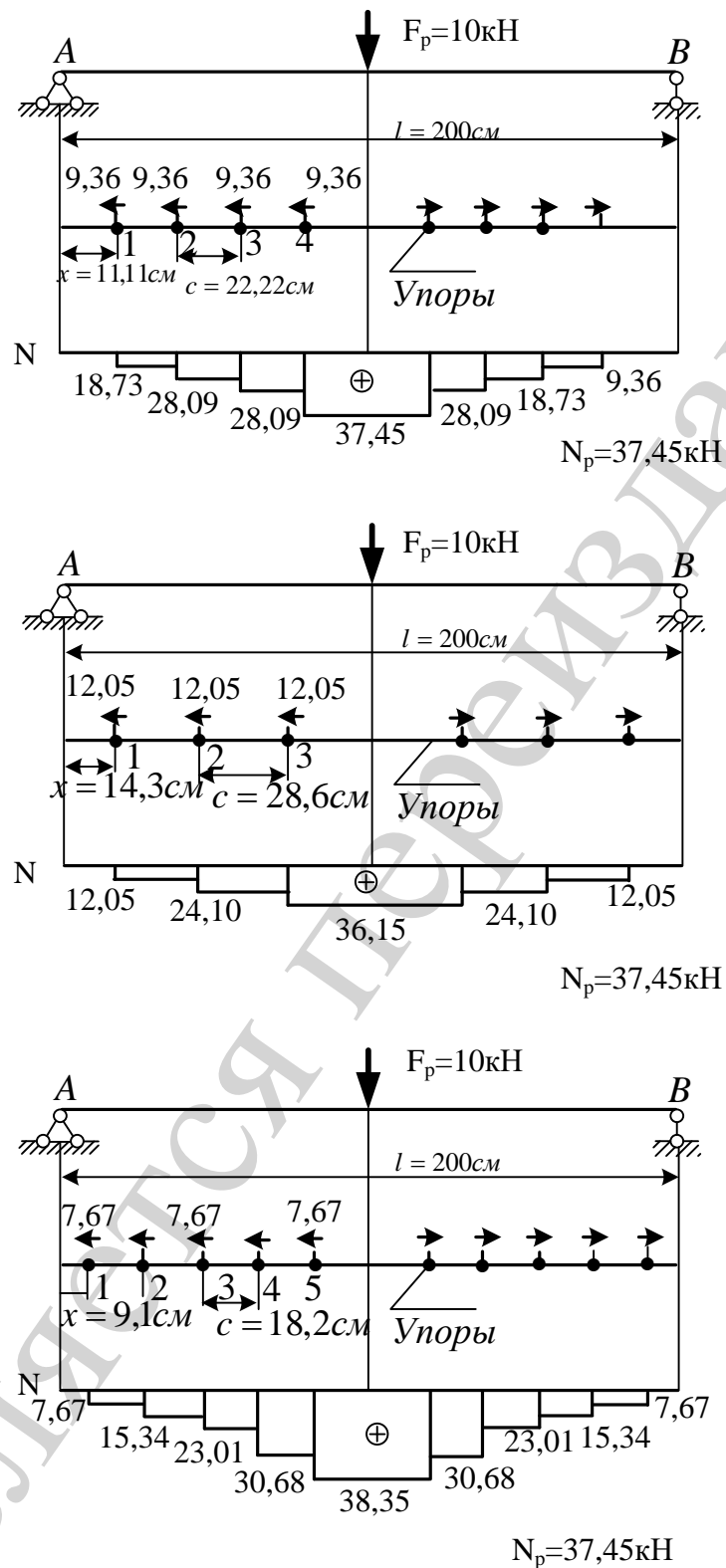


Рис. 6. Схема сталебетонной балки и упоры продольных усилий в стальном листе

Приведенные расчеты показывают, что количество и шаг жестких упоров влияют на величину максимального усилия в стальном листе. Желательно, чтобы предельные усилия возникали в стальном листе и бетоне одновременно. Это

приведет к одновременному разрушению стали и бетона в балке. Такая конструкция, с точки зрения рационального использования материала, будет оптимальной.

Был проведен численный эксперимент расчета сталебетонных балок. Аналогичные балки моделировались и рассчитывались с помощью программного комплекса Лира. Модель балки показана на рис.7, схема расстановки анкеров показана на рис. 8.

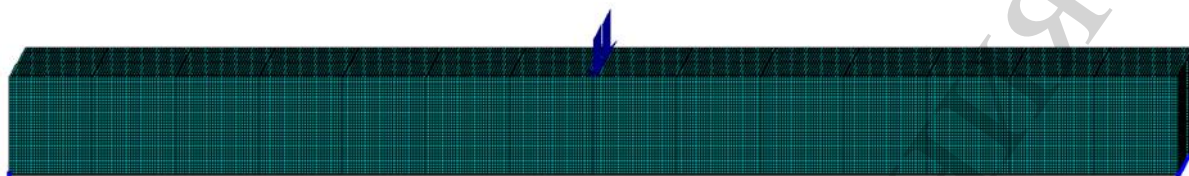


Рис. 7. Модель сталебетонной балки

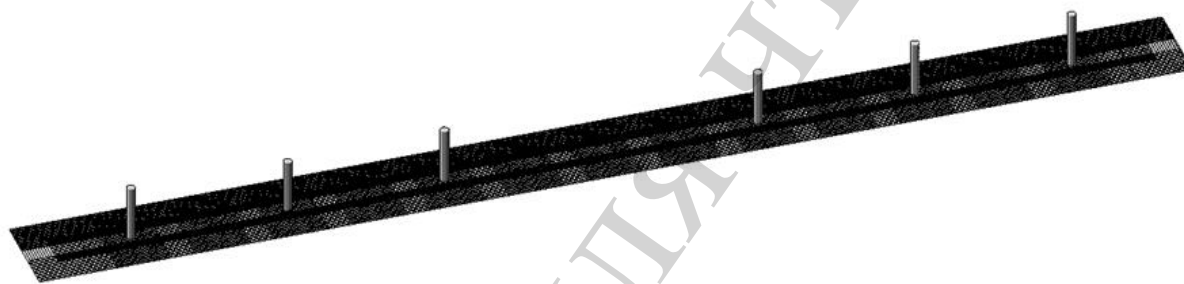


Рис. 8. Схема расстановки анкеров

Проведенные расчетные исследования подтверждают результаты расчета с помощью предложенного алгоритма.

7. Обсуждение результатов разработки алгоритма подбора жестких упоров в сталебетонных балках

В результате проведенных исследований получен алгоритм, позволяющий рассчитывать количество, шаг и сечение жестких упоров таким образом, чтобы усилия в них были одинаковыми. Усилие в стальном листе и усилие в бетоне также одинаковые и соответствует предельным значениям. Это приведет к тому, что разрушение бетона и стального листа будет происходить одновременно. Следовательно, материал конструкции – бетон и сталь, используются более рационально, что является оптимальной конструкцией с точки зрения экономии материала.

Результаты расчета в нормативных документах, как в украинских [3], так и в европейских [4], отсутствуют, что не позволяет провести сравнение результатов приведенных исследований с данными нормативными документами. В работах, посвященных сталебетонным балкам, как правило, проблеме рациональной расстановки анкеров большого внимания не уделяется. Так, например,

в [20] описываются экспериментальные исследования сталебетонных балок с различными видами анкеров. Шаг арматурных стержней принят 50 мм, шаг петлевых анкеров – 100 мм, при этом выбор такого шага не объясняется. Алгоритм, представленный в данной статье, в свою очередь, позволяет вычислить рациональный шаг анкеров. Произвести сравнительный анализ не представляется возможным. Рациональный шаг хомутов подразумевает одинаковые усилия во всех анкерах. В работе же [20] усилия в упорах не приведены.

Приведенные в данном исследовании результаты показывают, что изменение шага анкеров приведет к перераспределению усилий в стальном листе. Также показано, что такое перераспределение изменит максимальное усилие в стальном листе. Таким образом, изменение шага анкеров, вероятно, позволило бы оптимизировать предложенную в работе [20] конструкцию.

Предложенный алгоритм, в данный момент, можно использовать только для балок, нагруженных сосредоточенной силой в середине пролета. Однако, изменив формулы, касающиеся определения нагрузок, можно использовать его и для других видов нагружения. Предложенный алгоритм и был разработан с учетом возможности распространения его на другие конструкции и условия их работы. Полученную методику можно использовать и для других видов нагружения, в том числе для балки, нагруженной распределенной нагрузкой и со сменой положения силы по длине.

Предложенная методика также не позволяет рассчитывать сталебетонные балки, если соединение бетона со стальным листом достигается при помощи гибких анкеров. Для расчета таких балок требуется определенная доработка. В дальнейшем планируется распространить данную методику для расчета сталебетонных балок с гибкими анкерами.

Широкомасштабному применению сталебетонных конструкций в сельскохозяйственных сооружениях и зданиях будет способствовать изучение, выявление закономерностей рациональной работы составляющих материалов в этих конструкциях, а также результаты разработки алгоритма подбора жестких упоров. В связи с этим использование метода расчета жестких упоров при расчете гибких анкеров приведёт к вскрытию неиспользованных резервов их несущей способности, повышению их надёжности и долговечности.

8. Выводы

1. Разработан алгоритм подбора числа, шага упоров и усилий в них по заданным характеристикам материалов, внешней нагрузке $F=10$ кН, длине балки, известным размерам поперечных сечений бетона и стального листа. При этом усилия во всех упорах одинаковые, шаг упоров, кроме нулевого пролета, постоянный, максимальное усилие в стальном листе, возникающее посередине пролета, равно предельному значению, равному 37,45 кН.

2. Проведены численные экспериментальные исследования сталебетонных балок с использованием программного комплекса Лира. Результаты совпадают с результатами, полученными с использованием предложенного авторами алгоритма. Расхождения не превышают 15 %.

Литература

1. Experimental and numerical study on static behavior of elastic concrete-steel composite beams / Xing Y., Han Q., Xu J., Guo Q., Wang Y. // *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. Vol. 123. P. 79–92. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.04.023>
2. Sudhir P. P., Keshav K. S. Tests of steel fibre reinforced concrete beams under predominant torsion // *Journal of Building Engineering*. 2016. Vol. 6. P. 157–162. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.02.004>
3. ДБН В.2.6-160:2010. Сталезалізобетонні конструкції. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 93 с.
4. ТКП EN 1994-1-1-2009 (02250). Еврокод 4: Проектирование стале-железобетонных конструкций. Ч. 1-1. Общие правила и правила для зданий. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 95 с.
5. ДСТУ Б В.2.6-216:2016. Розрахунок і конструювання з'єднувальних елементів стале залізобетонних конструкцій. Київ, 2016. 40 с.
6. Hsiao P.-C., Lehman D. E., Roeder C. W. Improved analytical model for special concentrically braced frames // *Journal of Constructional Steel Research*. 2012. Vol. 73. P. 80–94. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.01.010>
7. Mahmoud A. M. Finite element modeling of steel concrete beam considering double composite action // *Ain Shams Engineering Journal*. 2016. Vol. 7, Issue 1. P. 73–88. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.03.012>
8. Analytical solutions for the in-plane behavior of composite steel/concrete beams with partial shear interaction / Luan N. K., Bakhshi H., Ronagh H. R., Barkhordari M. A. // *Asian Journal of Civil Engineering*. 2011. Vol. 12, Issue 6. P. 751–771.
9. Медведев В. Н., Семенюк С. Д. Прочность и деформативность балочных изгибаемых элементов с внешним листовым армированием // *Инженерно-строительный журнал*. 2016. № 3. С. 3–15. doi: <https://doi.org/10.5862/mce.63.1>
10. Замалиев Ф. С. Численные и натурные эксперименты преднапряженных сталежелезобетонных балок // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13, Вып. 3. С. 309–321. doi: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.3.309-321>
11. Рахманов А. Д., Соловьев Н. П., Поздеев В. М. Компьютерное моделирование для исследования напряженно-деформированного состояния балок с комбинированным армированием // *Вестник МГСУ*. 2014. № 1. С. 187–195.
12. Уткин В. А. Регулирование положения нейтральной оси при проектировании сечений сталежелезобетонных балок // *Вестник СибАДИ*. 2010. Вып. 4 (18). С. 55–60.
13. Стороженко Л. І., Лапенко О. І., Горб О. Г. Конструкції залізобетонних перекриттів по профільному настилу із забезпеченням сумісної роботи бетону і сталі за допомогою склеювання // *Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2010. № 662. С. 360–365.
14. Мельман В. А., Торкатюк В. И., Золотова Н. М. Использование акриловых клеев для соединения бетонных и железобетонных конструкций // *Коммунальное хозяйство городов*. 2003. Вып. 51. С. 61–68.

15. Стороженко Л. І., Крупченко О. А. Сталезалізобетонні балки із залізобетонним верхнім поясом // Вісник НУ «Львівська політехніка». 2010. № 662. С. 354–360.

16. Особливості роботи сталобетонних балок армованих стержневою високоміцною арматурою різних класів / Бобало Т. В., Бліхарський З. Я., Ільницький Б. М., Крамарчук А. П. // Вісник НУ «Львівська політехніка». 2011. № 697. С. 35–48.

17. Расчет и конструирование частей жилых и общественных зданий / Вахненко П. Ф., Хилобок В. Г., Андрейко Н. Т., Яровой М. Л. Киев, 1987. 423 с.

18. Петров А. Н., Кобзева Е. Н., Красюк А. Г. Выбор оптимальных по стоимости параметров сталобетонных балок // Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції. Харків-Красний Лиман, 2015. С. 330–336.

19. Дарков А. В., Шпиро Г. С. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1975. 654 с.

20. Крухмалев А. В. Напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонных балок // Вестник ДНУЖТ: Наука и прогресс транспорта. 2010. С. 143–145.

Не являється перевідом