



УДК 624.012

Замалиев Фарит Сахапович

кандидат технических наук, доцент

E-mail: zamaliiev49@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Фекир Эл Кахина

инженер

E-mail: fekirkahina5@gmail.com

Компания ИНФРАФЕР

Адрес организации: 16017, Алжир, г. Руиба, вилайет Алжира

Особенности оценки прочности сталебетонного изгибаемого элемента с напрягаемой арматурой без сцепления с бетоном

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследовательской работы – анализ методик расчета преднапряженных металлических и железобетонных балок и оценка на их основе напряженно-деформированного состояния преднапряженных сталежелезобетонных балок и плит с напрягаемой арматурой без сцепления с бетоном. Задачи работы: анализ отечественной и зарубежной технической литературы и выявление состояние вопроса по оценке напряженно-деформированного состояния преднапряженных сталебетонных, как изолированных балок, так и балок в составе ребристого монолитного перекрытия. На основе анализа аналитических выражений преднапряженных металлических и железобетонных балок записать новые зависимости сталежелезобетонного сечения, учитывающие особенности работы составного преднапряженного сечения.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в анализе сегодняшнего подхода к оценке прочности сталежелезобетонных балок и плит, металлических и железобетонных балок, в выявлении напряженно-деформированного состояния изгибаемого преднапряженного сталебетонного элемента и в выводе формул для оценки прочности преднапряженных изолированных балок и балок в составе ребристого перекрытия с напрягаемой арматурой без сцепления с бетоном.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в выявлении напряженно-деформированного состояния изгибаемого сталежелезобетонного элемента. Аналитические выражения оценки прочности сечения сталежелезобетонных балок и перекрытий могут быть использованы при возведении ребристых плит и балок новых зданий в сталежелезобетонном, деревобетонном, сборно-монолитном железобетонном вариантах и при восстановлении перекрытий зданий, отслуживших свой нормативный срок эксплуатации.

Ключевые слова: сталежелезобетонные балки и плиты, преднапряженные элементы, напряженное состояние, арматура без сцепления с бетоном.

Введение

Преднапряжение в строительной практике применяется достаточно давно и нашло применение в основном в железобетонных и металлических конструкциях – в балках, в плитах и в решетчатых конструкциях. Сталежелезобетонные плиты и балки являются конструкциями составного сечения, которые объединяют в одном сечении элементы металлических и железобетонных конструкций, и в преднапряженном варианте должны использовать преимущества, как металлических, так и железобетонных сечений.

Общеизвестно, что в железобетонных преднапряженных изгибаемых конструкциях в основном используют два вида преднапряжения: на упоры и на бетон. В металлических конструкциях по концам балок приваривают специальные упоры, на которые прикрепляют напрягающую арматуру (трос, канат) параллельно нижнему поясу. В целях создания балки, рациональной по материалоемкости, сечение верхнего пояса металлической балки принимается на порядок больше, а использование прокатных

профилей становится нерациональным. В сталежелезобетонных преднапряженных балках при использовании прокатного профиля работе сжатой зоны сечения помогает бетон, поэтому нет необходимости увеличить сечение верхнего пояса как в металлических преднапряженных балках. Упрощается и конструктивное решение балки, в отличие от железобетонных балок, где для восприятия усилий натяжения на торцах необходимо устраивать специальные анкерные устройства, в сталежелезобетонных балках эти усилия воспринимают опорные металлические ребра.

Состояние вопроса и обзор литературы

Практическая ценность исследований по оценке несущей способности сталежелезобетонных преднапряженных балок заключается в рассмотрении внутреннего напряженно-деформированного состояния, в регулировании внутренних усилий и напряжений, что позволяет правильно оценить несущую способность этих конструкций и запроектировать экономичные и надежные сталежелезобетонные конструкции.

Несмотря на значительное количество новых технических решений, защищенных патентами, работ, посвященных изучению способов преднапряжения, оценок напряженно-деформированного состояния преднапряженных сталежелезобетонных изгибаемых конструкций мало.

В последние годы в разных странах начали использовать преднапряженные железобетонные конструкции с размещением натянутой арматуры в специальных неметаллических трубках, тем самым, исключая контакт преднапряженной арматуры с бетоном [1].

Учет стадийности возведения сталежелезобетонных конструкций описан в некоторых работах [2-3]. В ряде работ [4] изложены результаты исследований балок при преднапряжении гибкой арматуры аналогично железобетонным конструкциям.

Статья авторов [5] посвящена сталежелезобетонным балкам, в основном, без преднапряжения, поэтому выражения, приведенные для оценки их несущей способности, не могут быть использованы в преднапряженных сталежелезобетонных изгибаемых элементах. В ряде источников [6-10] приведены новые технические решения, разработанные в КГАСУ и защищенные федеральной службой по интеллектуальной собственности РФ.

Статьи ряда авторов [11-14] посвящены экспериментам сталежелезобетонных балок. В одной из статей [11] дана оценка эффективности преднапряжения по очертаниям эпюр изгибающих моментов. Предложены аналитические формулы для определения жесткости. В другой статье [12] дается методика и результаты экспериментальных исследований, влияние усадки на жесткость сталежелезобетонных балок, а также отмечены необходимость учета усадочных эффектов при рабочих нагрузках и влияние усадки на работу анкеров. Некоторые статьи [13, 14] посвящены экспериментальным исследованиям коробчатых сталежелезобетонных балок преднапряженных наружными тяжами. На основе результатов эксперимента в одной из работ [15] предложена методика расчета, учитывающая объемные напряжения в каждой точке. Численным исследованиям преднапряженной сталежелезобетонной балки посвящена статья, опубликованная в издании «Journal of Structural Engineering» [16]. Рассмотрены двухпролетные балки. Преднапряженная арматура размещена внутри стальной коробчатой балки.

В данной статье [16] приведено численное моделирование предварительно напряженной сталежелезобетонной балки, разработана конечно-элементная модель для кратковременных и длительных нагружений. Однако нет сравнений численных исследований с данными экспериментов.

В статье Lou T. и Karavasilis T.L. [14] описаны экспериментальные исследования сталежелезобетонных балок с разным расположением тяжей внутри двутавра и, на основе экспериментальных исследований, предложена методика расчета составных балок с внешними тяжами на основе прямоугольных эпюр напряжений. А статья Chen S. и Gu P. [15] посвящена усилению мостовых сталежелезобетонных балок внешними преднапряженными тяжами стальных подкрепляющих балок, предложена методика расчета. Дана корреляция методики с результатами эксперимента.

Статья, опубликованная в издании «Journal of Constructional Steel Research» [17] посвящена экспериментальным исследованиям преднапряженных сталежелезобетонных балок на действие негативного момента. Испытаны четыре преднапряженные балки с тяжами в области отрицательных моментов. Исследованы характеристики трещинообразования бетона в зоне негативного момента и предельная прочность.

Однако в рассмотренных исследованиях для преднапряжения сталежелезобетонных балок не учитывалось внутреннее напряженное состояние, преднапряжение сталежелезобетонных элементов выполнено по аналогии с железобетонными конструкциями при совместной работе напрягаемой арматуры с бетоном [18-19].

Теоретические исследования

Оценка прочности и деформативности сталежелезобетонных балок требует выявить напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонных сечений сначала от действия внутренних сил преднапряжения на стальную балку с учетом дальнейшего участия бетонной части, затем – от внешних воздействий (эксплуатационных нагрузок).

Умение правильно учитывать внутреннее напряженно-деформированное состояние сечения в зависимости, как от строения сечения, так и от технологии компоновки сечения, а в дальнейшем – от внешних воздействий, является совершенно необходимым для создания экономичных и надежных в эксплуатации преднапряженных конструкций составного сечения.

Рассмотрим работу предварительно напряженной балки в зависимости от строения сечения и внешних силовых воздействий.

При натяжении арматуры, расположенной в растянутой зоне балки, в ней развиваются напряжения, обратные по знаку тем (рис. 1а), которые должны возникнуть от эксплуатационной нагрузки (рис. 1б). При загрузке балки эксплуатационной нагрузкой сначала прорабатываются начальные напряжения, созданные предварительным напряжением, затем сечение нагружается от момента, создаваемого эксплуатационной нагрузкой. Общая возможная эксплуатационная нагрузка на балку увеличивается, преднапряженная арматура, расположенная в растянутой зоне, дополнительно нагружается.

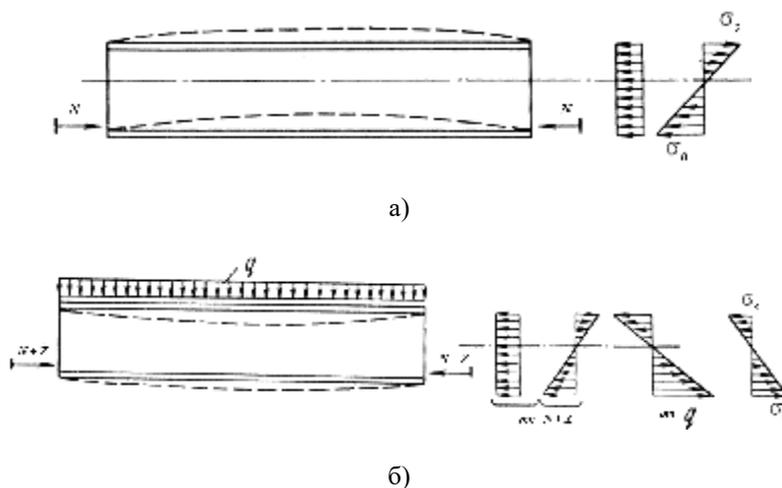


Рис. 1. Предварительно напряженная балка:
 а) напряженно-деформированное состояние от преднапряжения;
 б) то же от совместного действия усилий преднапряжения и эксплуатационных нагрузок
 (иллюстрация авторов)

При изготовлении преднапряженных балок сечение может состоять из прокатного профиля, бетона и преднапряженной арматуры в растянутой зоне (рис. 2). В металлических преднапряженных балках для предотвращения потери устойчивости нижнего пояса, к нижнему поясу (через который пропускают натянутую арматуру) приваривают направляющие хомутики.

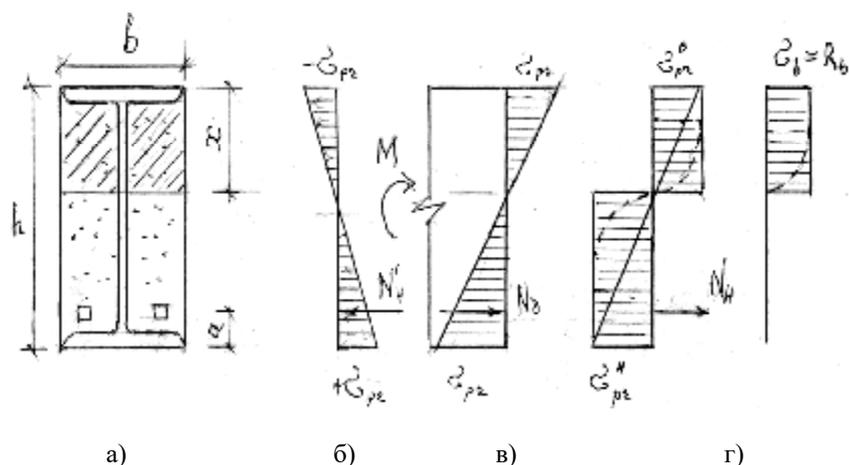


Рис. 2. Схема напряжений и усилий в сталебетонном сечении:
 а) сечение; б) эпюра напряжения от N_H ; в) эпюра напряжения от q ;
 г) результирующие напряжения и внутренние усилия (иллюстрация авторов)

Исходя из аналогии с металлической балкой, в сталежелезобетонной балке можно установить внутренние хомуты, которые будут выполнять одновременно функции поперечной арматуры (как в железобетонных балках) и роль хомутика, обеспечивающего устойчивость натянутой арматуры и нижней части стальной балки (рис. 3). Кроме того в этом сечении появится в сжатой зоне балки обычная арматура.

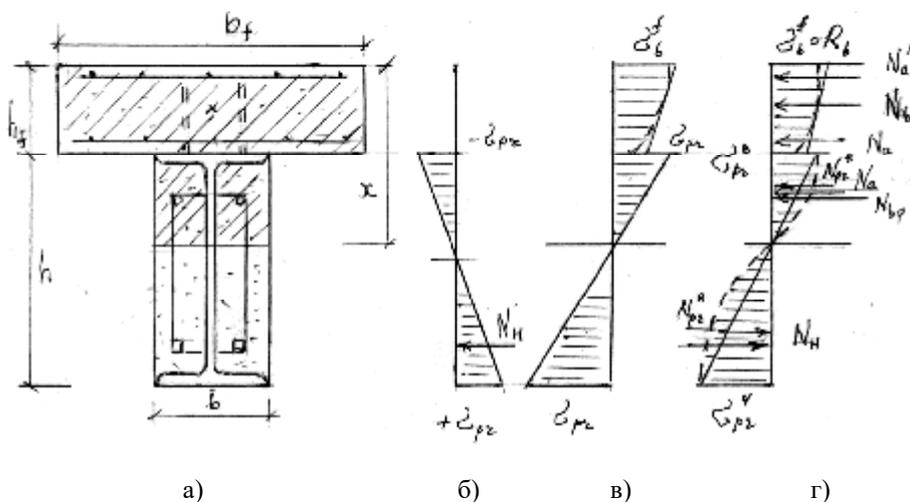


Рис. 3. Схема усилий и напряжений в расчетном сечении перекрытия:
 а) расчетное сечение; б) эпюра напряжений от преднапряжения;
 в) эпюра напряжения от внешней нагрузки; г) суммарные эпюра напряжений и внутренние усилия (иллюстрация авторов)

При расчете преднапряженной балки ее работа учитывается поэтапно. Вначале, при предварительном натяжении затяжки, стальная балка подвергается внецентренному сжатию, вызывая в верхнем поясе растяжение, а в нижнем – сжатие (рис. 1а), значения которых приведены в работе Замалиева Ф.С. К оценке напряженного состояния преднапряженных сталежелезобетонных балок // Известия КГАСУ. 2017. № 3 (41). С. 87-97. При дальнейшем обетонировании полостей двутавра, балка превращается в сталебетонное сечение с напряженной арматурой. При обетонировании двутавра с неметаллической толстостенной трубкой для натянутой арматуры и натяжении арматуры после приобретения бетоном гостированной прочности будем иметь сечение наподобие железобетонных балок с натяжением на бетон с той лишь разницей, что преднапряженная арматура работает изолированно без сцепления с бетоном, наподобие затяжки в металлических балках.

Запишем для нахождения неизвестных при расчете преднапряженной балки, по аналогии со стальной преднапряженной балкой¹. Площадь сечения напрягающей затяжки (арматуры) определим из равенства суммы проекций всех сил на горизонтальную ось:

$$A_H = \frac{A_{pr} R_{pr} + A_b R_b}{R_H} \quad (1)$$

Находим значение усилий преднапряжения арматуры N_H из выражения:

$$N_H + Z = A_H R_H, \quad (2a)$$

$$N_H = A_H R_H - Z. \quad (2b)$$

Усилие самонапряжения – Z находим по аналогии со стальной преднапряженной балкой, Z – как дополнительное усилие в затяжке, которое начинает развиваться под воздействием эксплуатационной нагрузки (рис. 1б). В стальных преднапряженных балках его называют самонапрягающей силой:

$$Z = \frac{2Mh_a}{3 \left[h_a^2 + \frac{J_{прив}}{A_{прив}} + \frac{E_s J_{pr} + E_b J_b}{E_H A_H} \right]}, \quad (3)$$

где M – момент от эксплуатационной нагрузки;

J_{pr} , J_b , $J_{прив}$ – жесткости стального профиля, бетонной части и приведенного сечения;

$E_H A_H$ – жесткость напрягающей арматуры (затяжки).

В процессе изготовления балки во время натяжения арматуры усилие в затяжке необходимо контролировать. Воспользуемся известной формулой для стальных преднапряженных балок¹:

$$N_k = \frac{N_H}{0,95} + \Delta_a \frac{E_H A_H}{l}, \quad (4)$$

где 0,95 – коэффициент релаксации;

Δ_a – податливость анкера затяжки: 0,1 см – для гаек; 0,2 см – для анкеров с прокладками; l – длина балки.

Контролируемое усилие – N_k в затяжке не должно быть больше усилия, которое может воспринять нижний пояс стального профиля, сжимаемый в процессе предварительного напряжения с другой стороны, не больше трещиностойкости бетона верхней зоны.

Предельное усилие для обеспечения устойчивости нижнего пояса:

$$N_{пред} = \frac{R \varphi_y^H A_{pr} W_H}{W_H + h_H A_{pr}}, \quad (5)$$

где R – расчетное сопротивление стали профиля;

φ_y^H – коэффициент продольного изгиба нижнего пояса;

A_{pr} – площадь сечения профиля;

W_H – момент сопротивления нижнего пояса;

h_H – расчетная высота напрягаемой арматуры.

Если арматура натягивается после приобретения бетоном гостированной прочности, предельные усилия затяжки не должны вызывать трещины бетона в верхней зоне балки:

$$N_{пред} = R_{bt} A_{bc} = R_{bt} b x, \quad (6)$$

где R_{bt} – расчетное сопротивление бетона на растяжение;

b – ширина профиля;

x – высота сжатой зоны бетона при действии эксплуатационной нагрузки.

В любом случае усилие в затяжке не должно превышать $N_{пред}$:

$$N_k \leq N_{пред}. \quad (7)$$

Рассмотрим моментное состояние преднапряженной балки на действие эксплуатационной нагрузки:

а) Сечение стальной балки преднапряжена, обетонировано, после приобретения бетоном гостированной прочности действует эксплуатационная нагрузка (рис. 2).

Определяем высоту сжатой зоны из условия равенства внутренних сил:

$$\int \sigma_b(\varepsilon_b) b dx + \sigma_{pr}^H 0,5(h-x) A_{pr}' - \sigma_{pr}^B 0,5x A_{pr}' = 2 \int \sigma_{pr} t_{\omega} d(0,5h-x) + N_H \quad (8)$$

¹Муханов К.К. Металлические конструкции. Учебник для вузов. Изд-е 3-е испр. и доп. М.: Стройиздат, 1978. С. 237-250.

или в случае прямоугольной эпюры напряжений в предельном состоянии:

$$2R_{pr}t_{\omega}x + R_bbx = 0,5x\sigma_{pr}^B A_{pr}'' - 0,5x\sigma_{pr}^H A_{pr}' = R_{pr}t_{\omega}h + 0,5\sigma_{pr}^H hA_{pr}' + N_H, \quad (9)$$

где внутренние напряжения в верхней и нижней зонах профиля:

$$\sigma_{pr}^B = -\frac{N_H Z}{A_{pr} + A_{bc}n} - \frac{M - (N_H + Z)h}{W_B + nJ_b / y_1}, \quad (10)$$

$$\sigma_{pr}^H = -\frac{N_H Z}{A_{pr} + A_{bc}n} + \frac{M - (N_H + Z)h}{W_B + nJ_b / y_1}. \quad (11)$$

Высота сжатой зоны сечения:

$$x = \frac{R_{pr}t_{\omega}h + 0,5\sigma_{pr}^H hA_{pr}' + N_H}{2R_{pr}t_{\omega} + R_b b - 0,5(\sigma_{pr}^B A_{pr}'' + \sigma_{pr}^H A_{pr}')}, \quad (12)$$

где $n = E_{pr}/E_b$ – коэффициент приведения модулей Юнга;

t_{ω} – толщина стенки профиля;

b, h – ширина и высота профиля;

A_{pr}', A_{pr}'' – площадь сечения растянутой и сжатой зон сечения профиля;

y_1 – расстояние до сжатой зоны бетона.

Проверку прочности сечения выполняем по формуле:

$$M \leq 0,5 \int \sigma_b b x^2 + R_{pr} [W_{pl} + (0,5h - x)^2 t_{\omega}] + 0,5 \int \sigma_{pr}^B (bt_f + t_{\omega}x) dx - hf + 0,5 \int \sigma_{pr}^H [bt_f + t_{\omega}(h - x)] \cdot d(h - x) + N_H(h - x - a), \quad (13)$$

где W_{pl} – пластический момент сопротивления профиля;

$\sigma_{pr}^B, \sigma_{pr}^H$ – напряжение в верхней и нижней зонах профиля;

t_f – толщина полки профиля.

б) Монолитное перекрытие с преднапряженной стальной обетонированной балкой с напрягаемой и ненапрягаемой арматурой.

Уравнение равновесия внутренних сил для определения положения границы сжатой зоны:

$$N_{bf} + N_a' + N_a'' + N_a + N_b + N_H + N_{prb}^B - N_{pr}^H = 0, \quad (14)$$

где

$$N_{bf} = \int_0^{h_f} \sigma(t) b_f dh_s; N_a' = \sigma_a' A_a'; N_a'' = \sigma_a''(t) A_a''; N_a = \sigma_a A_a; N_{bp} = \int \sigma_{bp}(\varepsilon_b) b d(x - h_f); N_{pr}^B = \sigma_{pr}^B A_{pr}^B; N_{pr}^H = \sigma_{pr}^H A_{pr}^H.$$

Проверку прочности выполняем по следующей формуле:

$$M \leq N_{ba} z_1 + N_a' z_2 + N_a'' z_3 + N_a z_4 + N_{bp} z_5 + N_H(h - x) + N_{pr}^B z_6 - N_{pr}^H z_7, \quad (15)$$

где $Z_{1...7}$ – плечо соответствующей внутренней силы.

Заключение

Исследовано напряженное состояние преднапряженной балки с размещением затяжки (преднапряженной арматуры) в толстостенных неметаллических трубках и сталежелезобетонного ребристого перекрытия с преднапряженными балками и монолитной плитой. Размещение затяжки в неметаллических трубках исключает сцепление арматуры с бетоном, напряженное состояние сталежелезобетонного сечения отличается от работы изгибаемых железобетонных преднапряженных элементов. Предложены аналитические выражения для оценки прочности балки и перекрытия с учетом усилий преднапряжений, которые могут быть использованы при проектировании сталежелезобетонных перекрытий при новом строительстве и при восстановлении перекрытий старой постройки.

Список библиографических ссылок

1. Кузнецов В. С., Полехина Г. Е., Шапошникова Ю. А. Эффективность применения высокопрочной арматуры без сцепления с бетоном в монолитных безбалочных перекрытиях // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 1. С. 40–47.

2. Zamaliev F. S., Zakirov M. A. Stress-strain state of a steel-reinforced concrete slab under long-term // Magazine of Civil Engineering. 2018. P. 12–23.
3. Roger P. Jonson Designers' guide to eurocode 4: design of composite steel and concrete structures EN 1994-1-1. 2011. 412 p.
4. Замалиев Ф. С. Численные и натурные эксперименты преднапряженных сталежелезобетонных балок // Вестник МГСУ. 2018. № 3 (114). С. 309–321.
5. Замалиев Ф. С. Новые сталежелезобетонные балки, оценка их несущей способности : сб. докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 150 летию со дня рождения основателя и первого заведующего кафедрой ЖБК профессора А.Ф. Лолейта / МГСУ. Москва, 2018. С. 26–33.
6. Сталебетонная преднапряженная балка : пат. 155802 Рос. Федерация № 2014152337 ; опубл. 20.10.2015, бюл. № 29. 2 с.
7. Сталежелезобетонная преднапряженная балка : пат. 165473 Рос. Федерация. № 2016114023 ; заявл. 11.04.16 ; опубл. 20.10.16, Бюл. № 29. 2 с.
8. Преднапряженная стальная обетонированная балка : пат. 172515 Рос. Федерация № 2017112142/03 ; заявл. 10.04.2017 ; опубл. 11.07.17, Бюл. № 20. 2 с.
9. Преднапряженная сталебетонная балка: пат. 174326 Рос. Федерация № 2017101736/03 ; заявл. 19.01.2017 ; опубл. 11.10.17, Бюл. № 29. 2 с.
10. Преднапряженная сталебетонная балка : пат. 2 674 045 Рос. Федерация. № 2016142556 ; заявл. 28.10.16 ; опубл. 04.12.18, Бюл. № 34. 2 с.
11. Sun Q., Yang Y., Fan J., Zhang Y., Bai Y. Effect of longitudinal reinforcement and prestressing on stiffness of composite beams under hogging moments // Journal of Constructional Steel Research. 2014. 100. P. 1–11.
12. Al-deen S., Ranzi G., Vrcelj Z. Shrinkage effects on the flexural stiffness of composite beams with solid concrete slabs: An experimental study. Engineering Structures. 2011. № 33 (4). P. 1302–1315.
13. Zhang N., Fu C. C. Experimental and theoretical studies on composite steel-concrete box beams with external tendons // Engineering Structures. 2009. № 31 (2). P. 275–283.
14. Lou T., Karavasilis T. L. Numerical assessment of the nonlinear behavior of continuous prestressed steel-concrete composite beams // Engineering Structures. 2019. № 190. P. 116–127.
15. Chen S., Gu P. Load carrying capacity of composite beams prestressed with external tendons under positive moment // Journal of Constructional Steel Research. 2005. № 61 (4). P. 515–530.
16. M., A. B., G., S. Y., Hamid S. Prestressed Composite Girders under Positive Moment // Journal of Structural Engineering. 1990. № 116 (11). P. 2931–2951.
17. Lou T., Lopes S. M. R., Lopes A. V. Numerical modeling of externally prestressed steel-concrete composite beams // Journal of Constructional Steel Research. 2016. № 121. P. 229–236.
18. Chen, S. Experimental study of prestressed steel-concrete composite beams with external tendons for negative moments // Journal of Constructional Steel Research. 2005. № 61 (12). P. 1613–1630.
19. Kayumov R. A., Muhamedova I. Z., Suleymanov A. M., Tazyukov B. F. Development of film- and fabric- composite materials durability assessing methodology under time-dependent influences of temperature and solar radiation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. V. 158. P. 010250.

Zamaliev Farit Sakhapovich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: zamaliev49@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Fekir El Kahina

engineer

E-mail: fekirkahina5@gmail.com

Company INFRAFER

The organization address: 16017, Algeria, City Rouiba

Features of strength assessment of a steel-concrete bending element with prestressing reinforcement without adhesion to concrete

Abstract

Problem statement. The aim of the research work is to analyze the methods for calculating prestressed metal and reinforced concrete beams and, based on them, to assess the stress-strain state of prestressed steel and reinforced concrete beams taking into account internal stresses. The tasks were to analyze domestic and foreign technical literature and to identify the state of the issue in assessing the stress-strain state of prestressed steel-concrete as isolated beams and beams as part of a ribbed monolithic overlap. Based on the analysis of the analytical expressions of prestressed metal and reinforced concrete beams, write down new dependences of the steel-reinforced concrete section, taking into account the features of the work of the composite prestressed section.

Results. The main research results consist of an analysis of the current approach to assessing the strength of steel-reinforced concrete beams and slabs, metal and reinforced concrete shafts in identifying the stress-strain state of a bent prestressed steel-concrete element and deriving formulas for assessing the strength of prestressed insulated beams and beams in a ribbed ceiling.

Conclusions. The significance of the results for the construction industry lies in the identification of the stress-strain state of a bent steel-reinforced concrete element. The research results, analytical expressions for assessing the strength of the T-section of steel-reinforced concrete floors can be used in the construction of ribbed plates and beams of new buildings in steel-reinforced concrete, wood-concrete, precast-monolithic reinforced concrete versions and in the restoration of ceilings of buildings that have served their standard life.

Keywords: steel-reinforced concrete beams and slabs, prestressed elements, stress state, voltage loss.

References

1. Kuznetsov V. S., Polekhina G. E., Shaposhnikova Yu. A. Efficiency of using high-strength reinforcement without adhesion to concrete in monolithic beam-free ceilings // Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya. 2017. Vol. 18. № 1. P. 40–47.
2. Zamaliev F. S., Zakirov M. A. Stress-strain state of a steel-reinforced concrete slab under long-term // Magazine of Civil Engineering. 2018. P. 12–23.
3. Roger P. Jonson Designers' guide to eurocode 4: design of composite steel and concrete structures EN 1994-1-1. 2011. 412 p.
4. Zamaliev F. S. Numerical and full-scale experiments of pre-stressed steel-reinforced concrete beams // Vestnik MGSU. 2018. № 3 (114). P. 309–321.
5. Zamaliev F. S. New steel-reinforced concrete beams, assessment of their bearing capacity: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 150th anniversary of the founder and first head of the SCC department, Professor A.F. Loleita / MGSU. Moscow, 2018. P. 26–33.
6. Steel pre-stressed beam : patent 155802 of the Rus. Federation. № 2014152337 ; publ. 10.20.2015. Bull, № 29. 2 p.
7. Steel-reinforced concrete pre-stressed beam : patent 165473 of the Rus. Federation. № 2016114023 ; declared 04.11.16 ; publ. 10.20.16, Bull. № 29. 2 p.
8. Pre-stressed steel concrete beam : patent 172515 of the Rus. Federation № 2017112142/03; declared 04.10.2017 ; publ. 07.11.17, Bull. № 20. 2 p.
9. Pre-stressed steel beam: patent 174326 of the Rus. Federation № 2017101736/03 ; declared 01.19.2017 ; publ. 10.10.17, Bull. № 29. 2 p.
10. Pre-stressed steel beam : patent 2674045 of the Rus. Federation № 2016142556 ; declared 10.28.16 ; publ. 12.04.18, Bull. № 34. 2 p.
11. Sun Q., Yang Y., Fan J., Zhang Y., Bai Y. Effect of longitudinal reinforcement and prestressing on stiffness of composite beams under hogging moments // Journal of Constructional Steel Research. 2014. 100. P. 1–11.

12. Al-deen S., Ranzi G., Vrcelj Z. Shrinkage effects on the flexural stiffness of composite beams with solid concrete slabs: An experimental study. *Engineering Structures*. 2011. № 33 (4). P. 1302–1315.
13. Zhang N., Fu C.C. Experimental and theoretical studies on composite steel-concrete box beams with external tendons // *Engineering Structures*. 2009. № 31 (2). P. 275–283.
14. Lou T., Karavasilis T. L. Numerical assessment of the nonlinear behavior of continuous prestressed steel-concrete composite beams // *Engineering Structures*. 2019. № 190. P. 116–127.
15. Chen S., Gu P. Load carrying capacity of composite beams prestressed with external tendons under positive moment // *Journal of Constructional Steel Research*. 2005. № 61 (4). P. 515–530.
16. M., A. B., G., S. Y., Hamid S. Prestressed Composite Girders under Positive Moment // *Journal of Structural Engineering*. 1990. № 116 (11). P. 2931–2951.
17. Lou T., Lopes S. M. R., Lopes A. V. Numerical modeling of externally prestressed steel-concrete composite beams // *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. № 121. P. 229–236.
18. Chen, S. Experimental study of prestressed steel-concrete composite beams with external tendons for negative moments // *Journal of Constructional Steel Research*. 2005. № 61 (12). P. 1613–1630.
19. Kayumov R. A., Muhamedova I. Z., Suleymanov A. M., Tazyukov B. F. Development of film- and fabric-composite materials durability assessing methodology under time-dependent influences of temperature and solar radiation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. V. 158. P. 010250.