Численные эксперименты и натурные испытания сталежелезобетонных балок на основе гнутых профилей*

Ф.С. Замалиев

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ),
420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведена оценка напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок на основе гнутых швеллеров. В последние годы в гражданских зданиях наметилось широкое применение сталежелезобетонных конструкций: балки, плиты, колонны. Использование в сталежелезобетонных конструкциях гнутых профилей пока не нашло такого распространения, как, например, в металлических конструкциях. Описана последовательность составления компьютерной модели составной балки состоящей из двух гнутых швеллеров, замоноличенных бетоном с анкерными связями из винтов-саморезов. Приведены варианты расположения анкерных связей (наклонные и вертикальные). На основе результатов численных исследований подготовлены модели балок. Рассмотрены методика испытаний, результаты экспериментальных исследований и выполнены сравнения результатов натурного эксперимента и численных исследований.

Материалы и методы. Для натурных экспериментов приняты составные стальные двутавры из гнутых швеллеров с заполнением боковых полостей бетоном, в качестве анкерных связей приняты винты-саморезы. В качестве стальных гнутых С-образных стальных профилей использовались стальные профили из сортамента СТО фирмы «Стальные грани». Варьированы как длины винтов, так и их расположение (вертикально и наклонно). Для компьютерного моделирования использован пакет программы ANSYS. Всего рассмотрено 16 сталебетонных балок, для которых в ANSYS получены результаты по оценке прочности, жесткости.

Результаты. Получены данные напряженно-деформированного состояния балок на основе компьютерного моделирования. Результаты численных исследований использованы для изготовления натурных образцов. Данные компьютерного моделирования сопоставлены с показателями натурных экспериментов.

Выводы. Изучены особенности работы сталежелезобетонных балок по численному моделированию, натурным экспериментам. Показано, что численные исследования дают хорошую сходимость с экспериментальными данными. Анкерные связи из винтов-саморезов могут использоваться в исследованиях для моделирования в сталежелезобетонных конструкциях и других анкерных устройствах, обеспечивая в конструкциях совместную работу бетона и стального профиля.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сталежелезобетонная балка, гнутые профили, анкерные связи, компьютерное моделирование, натурные эксперименты, напряжения, прогибы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Замалиев Ф.С. Численные эксперименты и натурные испытания сталежелезобетонных балок на основе гнутых профилей // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 1. С. 22–32. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.22-32

Numerical and experimental investigations of steel-concrete beams with thin-walled section

Farit S. Zamaliev

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE),
1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Conducted is to the evaluation of the stress-strain state of the steel-concrete beams with thin-walled section. In recent times, steel-reinforced concrete structures have become widely used in civilian buildings (beams, slabs, columns). Thin-walled section have not found wide application in steel concrete structures, unlike steel structures. Presents the results of numerical studies of beams consisting of concrete, anchors and steel beams. Two investigating of the location of anchors are given. Numerical investigations are presented of steel-concrete beams with thin-walled section based on numerical studies. Testing procedure and test result are given. Results of calculations, comparison of numerical and experimental studies are presented.

Materials and methods. For full-scale experiments, steel I-beams with filling of side cavities with concrete were adopted, screws are used as anchor ties, with varied both the lengths and their location (vertically and obliquely). As steel curved C-shaped steel profiles were used steel profiles from the range of the company "Steel Faces". ANSYS software package was used for computer modeling. A total of 16 steel concrete beams were considered, for which the results of strength and stiffness evaluation were obtained in ANSYS.

* Статья подготовлена по материалам магистерской выпускной работы А.И. Гайнутдинова, выполненной под руководством и с участием автора.

Results. The data of the stress-strain state of beams on the basis of computer simulation are obtained. The results are used for the production of field samples. Data of computer simulation are compared with the indicators of field experiments. **Conclusions.** The stress-strain state of steel-concrete structures was studied on the basis of numerical and experimental data. The proposed calculation method gives good convergence with the experimental data. Anchor connections made from self-tapping screws can be used in studies for modeling in steel-concrete beams structures and other anchor devices, ensuring the joint operation of concrete and steel profiles in structures..

KEYWORDS: steel-concrete beam, thin-walled section, anchors, computer simulation, full-scale experiments, stresses, deflections

FOR CITATION: Zamaliev F.S. Numerical and experimental investigations of steel-concrete beams with thin-walled section. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14:1:22-32. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.22-32 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Сталежелезобетонные конструкции в виде балок применяются в различных несущих элементах зданий и сооружений. Как составные конструктивные элементы сталежелезобетонные балки используют в своей конструкции бетон, как в верхней зоне, так и по всей высоте сечения. Чаще всего в составных балках используют прокатные профили, с обетонированными боковыми полостями. В настоящее время наметилась тенденция применения в сталежелезобетонных конструкциях гнутых профилей вместо прокатных, как в металлических конструкциях.

Гнутые профили успешно выполняют функции жесткого профиля в сталежелезобетонных сечениях, что подтверждают выданные патенты на изобретения и полезные модели.

Данная статья посвящена численным и натурным исследованиям, оценке напряженно-деформированного состояния составных балок на основе гнутых швеллеров.

Тенденция применения сталежелезобетонных конструкций в строительной практике [1–4] актуализирует их дальнейшие исследования. Они направлены на выявление напряженно-деформированного состояния (НДС) изгибаемых балок и плит [1–6]. Для исследования НДС сталежелезобетонных конструкций используют как аналитические [1–15], так и экспериментальные методы [16–18]. Одновременно с известными используемыми на практике конструктивными решениями исследователи и инженеры предлагают новые технические решения сталежелезобетонных конструкций. Роспатентом выдано значительное количество патентов по сталежелезобетонным балкам и плитам [19–22].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве стальных гнутых С-образных стальных профилей использовались стальные профили из сортамента СТО фирмы «Стальные грани», размеры изготавливаемых профилей по ГОСТ 8282-83

Рис. 1. Моделирование стальных профилей и винтов-саморезов

Fig. 1. Modeling steel profiles and screws self-tapping screws

«Профили стальные гнутые С-образные равнополочные. Сортамент».

По патенту № 183856 на полезную модель сталебетонной балки саморезы служат объединительным элементом для двух гнутых С-образных стальных профилей и конструктивным элементом для совместной работы стали и бетона.

Сначала в ПК ANSYS создается элемент Box1, затем с помощью функции Slice Material вырезается четверть балки размерами 60×200×1000 мм из всей сталебетонной балки (рис. 1) размерами 120×200×2000 для дальнейшего исследования. Симметричная работа балки обеспечивается функцией Symmetry. Эта процедура упрощает расчет, уменьшает количество заданных элементов, что сокращает время затрачиваемое на расчет, влияет на быстродействие и получение корректного результата. В дальнейшем при исследовании данной сталебетонной балки использована получившаяся часть сталебетонной балки для получения напряженно-деформируемого состояния всей балки.

Следующий этап моделирования — выбор материалов для созданных тел и указание их свойств.

Для этих целей в Workbench существует отдельный модуль управления материалами, связанный с блоком анализа и представленный элементом Engineering Data. В данном проекте использовались три материала из General Materials Library (библиотека материалов общего использования) для задания свойств трех материалов: бетона B25, стали C245 стальных профилей, стали C245 стальных саморезов:

- Concrete (бетон) (B25);
- Structural steel (конструкционная сталь) (C245 профили).

Между поверхностью бетона и поверхностью стальной части балки был задан контакт Frictional (трение) с $K = 0,45$.

Контакт между саморезами и бетоном балки был задан через Rough — контакт подразумевает отсутствие трения между поверхностями при возможном отрыве по поверхности. Этот случай соответствует бесконечному коэффициенту трения между связывающимися телами.

На следующем этапе разбиваем модель сталебетонной балки на конечные элементы модулем Mesh, используя метод Hex Dominant Method.

Нагрузка по заданию P [N] задается сосредоточенной через штамп пошагово в 10 шагов, начиная от 0 до 100 000 Н. Поскольку, как было сказано выше, мы рассматриваем четверть сталебетонной балки, диапазон шагов меняется от 0 до 25 000 Н, это отражено в окне ПК ANSYS Tabular Data.

Далее выполняем расчет с заданными выше свойствами и условиями, получаем мозаику прогибов и изополя напряжений сталебетонной балки (рис. 2, а, б).

Алгоритм компьютерного эксперимента заключается в исследовании НДС сталебетонной балки по

патенту № 183856 на полезную модель из двух гнутых С-образных стальных профилей, соединенных саморезами для совместной работы стали и бетона. Для сравнения за основу приняты две конструктивные схемы рассматриваемых сталебетонных балок:

1) сталебетонная балка с саморезами, расположенными в два ряда с увеличением шага к пролету. Саморезы располагаются под наклоном 45° относительно оси Y;

2) сталебетонная балка с саморезами, расположенными в два ряда с увеличением шага к пролету. Саморезы располагаются вертикально.

Для анализа НДС (деформаций и напряжений) и детального анализа работы двух предложенных конструктивных схем (табл. 1) были исследованы: влияние изменения геометрических показателей (изменение толщины профилей, изменение количества рядов саморезов, изменение размера шагов расположения саморезов, изменение длины винта-самореза) на работу двух конструктивных моделей — с саморезами расположенными под углом 45° и саморезами расположенными вертикально.

Проведены численные исследования сталебетонных балок двух конструктивных схем с вариацией геометрических параметров гнутого профиля (толщиной 2, 3, 4 мм), длин саморезов, скрепляющих гнутые швеллера (30, 40, 50 мм) и их разность (1, 2 ряда), шаг (100, 125, 150, 175, 200 мм; 150, 200, 300 мм; 200, 300, (400) мм). Варьирование включает восемь наиболее значимых факторов влияния. Всего рассмотрено 16 сталебетонных балок, для которых в ANSYS получены результаты по оценке прочности, жесткости.

1. Расположение саморезов под углом 45° уменьшает деформативность (прогибы на $1,43/1,38 = 3,6\%$) по сравнению с вертикальным расположением.

2. Меньший шаг саморезов и увеличенное количество рядов приводит к увеличению несущей способности.

3. Увеличение длины саморезов (от 30 до 50 мм) к увеличению прочности и деформативности не приводит.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы изготавливались из стали марки C245, класс бетона закладывался по расчету B25.

Геометрические размеры моделей сталебетонных балок диктовались также возможностями испытательной базы и лаборатории.

Анкерная связь бетонной и стальной частей образцов сталебетонных балок принималась по расчету. Опытные сталебетонные балки имели прямоугольное сечение: стальная часть изготавливалась из тонкостенных холодногнутой оцинкованных профилей ПГС–200Ш (швеллера) длиной 2000 мм,

Рис. 2. Изополя напряжений на половине сталебетонной балки: а — первая; б — вторая конструктивные схемы
Fig. 2. Isopole stresses at the half of the steel concrete beam: a — the first; b — the second structural schemes

Табл. 1. Варьируемые геометрические показатели сталебетонных балок конструктивных моделей

Table 1. Variable geometrical parameters of steel concrete beams of structural models

Варьируемые параметры для обеих конструктивных моделей / Variable parameters for both constructive models	№ 1 / No. 1	№ 2 / No. 2	№ 3 / No. 3
Толщина стенки профиля / Profile wall thickness	2 мм / 2 mm	3 мм / 3 mm	4 мм / 4 mm
Количество рядов саморезов / The number of rows of self-tapping screws	1-й ряд / 1st row	2 ряда / 2 rows	
Шаг расположения саморезов / Pitch of location of self-tapping screws	100 125 150 175 200	150 200 300	200 300 (400)
Длина винта-самореза / Length of screw self-tapping screws	30 мм / 30 mm	40 мм / 40 mm	50 мм / 50 mm

спаренных между собой саморезами 4,2×41 мм с пресс-шайбой; размеры бетонной части: длина — 2000 мм, ширина — 100 мм, высота — 200 мм. Класс бетона для боковых граней — В25.

Было изготовлено два образца сталежелезобетонных балок, отличающихся расположением саморезов. Для анализа работы балок использованы два способа их расположения в стенке балки.

В первой балке саморезы располагались под углом 45° (первая конструктивная схема, рис. 3).

Во второй балке саморезы располагались вертикально (вторая конструктивная схема, рис. 4).

В обоих случаях шаг саморезов принимался одинаковым: 100, 125, 150, 175 и 200 мм, с увеличением шага к пролету балки. Саморезы располагались в два ряда в шахматном порядке. Винты-саморезы, вкрученные в стенки швеллеров, одновременно обеспечивая совместную работу двух швеллеров, создавали двутавровое составное сече-

ние, а их выступы обеспечивали совместную работу с бетоном.

Изготовление опытных сталебетонных конструкций осуществлялось в следующей последовательности. Балки бетонировались в два этапа. Бетонная смесь изготавливалась на заводе «Объединенная Бетонная Компания» из следующих материалов: цемент марки М400, песок речной, вода, щебень фракции 5...10 мм. Опалубкой служили стянутые проволокой заготовки из фанеры с обоих торцов балок. На первом этапе бетонирования боковых граней двутавровой балки производилось бетонирование одной полости, а через сутки после переворачивания балки — второй полости.

В соответствии с требованиями СП 70.13330.2012 в процессе твердения производился уход за свежеложенным бетоном. Испытание сталебетонных конструкций начиналось только после приобретения ими прочности по ГОСТу для исклю-

Рис. 3. Конструктивная схема сталебетонной балки с саморезами, расположенными под углом 45°

Fig. 3. Structural scheme of steel concrete beams with self-tapping screws located at an angle of 45°

Рис. 4. Конструктивная схема сталебетонной балки с саморезами, расположенными вертикально

Fig. 4. Structural scheme of steel concrete beams with self-tapping screws located vertically

чения влияния на результаты испытаний начального напряженно-деформированного состояния опытных образцов вследствие усадки, а также влияния нарастания прочности бетона. За время набора прочности балками в сушильной камере на заводе ЖБИ деформативные свойства бетона практически стабилизировались.

Кубы, изготовленные параллельно с каждой партией изготовленных основных образцов и хранившихся в аналогичных температурно-влажностных условиях в сушильной камере завода ЖБИ, испытывались на прочностные и деформативные характеристики.

Для определения прочностных характеристик бетона, использованного в опытных балках, испытаны кубики размерами 100×100×100 мм.

Испытания вспомогательных бетонных кубиков осуществлялись в соответствии с методикой ГОСТ 24452-80 и ГОСТ 10180-78.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве испытательной схемы образцов принята изостатическая балка с приложением двух сосредоточенных сил в средней части пролета, которые приложены на расстоянии 400 мм друг от друга посредством траверсы. Пролет испытываемых балок — 1900 мм. Внешнюю нагрузку составили посредством гидравлического пресса УММ-200, от которого через металлическую траверсу в двух точках передавалась нагрузка через подвижной (с одного конца) и неподвижной (с другого) стальной каток диаметром 40 мм.

Для равномерного распределения усилия по ширине сечения под опорами траверсы в местах их опирания на балки устанавливали на цементно-песчаном растворе жесткие стальные прокладки.

Для равномерного по ширине сечения распределения усилия, что исключительно важно в составных конструкциях, устанавливались жесткие металлические прокладки на цементно-песчаном растворе под опорами траверсы в местах их опирания на балки.

Цель испытаний — изучение НДС сталежелезобетонных балок. При испытании любых изгибаемых элементов сталежелезобетонного сечения замеряются деформации (как прогибы, так и деформации материалов, служащие основой определения напряжений) трещин в бетоне и сдвиг между разнородными материалами. Поэтому при данных экспериментах измерялись деформации материалов с помощью электротензодатчиков с базами 20 мм (сталь) и 50 мм (бетон), к которым через провода и коммутатор (магазин переключателей) подключился электронный измеритель деформаций АИД-4М. Деформации сдвига на контакте сталь-бетон и деформации осадки опор измерялись с помощью индикаторов часового типа В4 с ценой деления 0,01 мм (рис. 5).

Для измерения прогибов в середине пролета балки использовали штангенциркуль, снабженный опорной пятой и тем самым приспособленный для вертикальных замеров.

Проверялась работоспособность измерительных систем и пресса, для чего проводилось пробное нагружение балки нагрузкой на уровне 20–25 % от предельной разрушающей силы.

После пробной нагрузки балки следовало нагружение до 0. Ступенями по 0,1 от величины расчетной разрушающей нагрузки в дальнейшем производилось нагружение с фиксированием значений деформаций на поверхности стали и бетона, ориентируясь на показания электротензодатчиков. Осадки опор определялись по индикаторам В4. Характер развития трещин на поверхности бетона и прогибы наблюдались по сдвиговым деформациям.

Рис. 5. Испытательный стенд с испытуемой сталебетонной балкой

Fig. 5. Test stand with a test steel beam

Момент образования определялся визуально, а развитие трещин фиксировалось с помощью 20-кратной лупы. Разрушающая нагрузка фиксировалась по показаниям шкалы испытательного пресса УММ-200 и сопоставлялась по графикам задаваемых шагов нагрузок на экране ноутбука подключенного к прессу через преобразователь.

За предельное состояние принималось полное физическое разрушение образцов сталежелезобетонных балок, сопровождавшееся значительными пластическими деформациями изгибаемого элемента.

Опытные образцы разрушались по нормальному сечению в зоне чистого изгиба в результате развития в средней части балки пластической деформации в бетоне и стали.

Первые трещины бокового бетона, которым были заполнены полости стальных составных дву-

тавровых балок, появились при нагрузке $0,85 Q_{раз}$ в сечениях под точками приложения нагрузки и имели незначительные раскрытия.

Главным образом перед разрушением образца наблюдалось развитие нормальных трещин (около 1 мм) в теле бокового бетона.

В этих двух способах расположения саморезов балки, выпучивания и отслоения бетона из полостей двутавровой балки не наблюдалось даже при предельных прогибах.

На рис. 6 показан общий вид, характер разрушения и трещинообразования сталебетонных балок.

Разрушение в балках произошло от образования в середине пролета сначала нормальных трещин в бетоне в растянутой зоне сечения и от разрушения бетонной сжатой части в зоне максимальных моментов.

Рис. 6. Разрушение сталебетонной балки первой конструктивной схемы

Fig. 6. Destruction of a steel concrete beam of the 1st constructive scheme

График развития прогибов в экспериментальных балках с наклонным и вертикальным расположением саморезов приведен на рис. 7. Распределение напряжений в середине балки в сжатом бетоне и в растянутой полке стального профиля (тоже при

наклонном и вертикальном расположении винтов-саморезов) показаны на графиках *b–c*.

Экспериментальные исследования показывают, что до нагрузки $0,75 P_{раз}$ наблюдается прямолинейный характер развития прогибов. При нагрузках

Рис. 7. График развития прогибов в экспериментальных балках с наклонным и вертикальным расположением саморезов

Fig. 7. Schedule of development of deflections in experimental beams with inclined and vertical position of self-tapping screws

больших чем $0,75 P_{раз}$, эпюра прогибов принимает криволинейный вид, в дальнейшем наблюдается рост развития прогибов.

Графики прогиба в середине пролета сталебетонной балки показывают, что балки с саморезами под углом 45° менее деформативны, чем балки с вертикальным расположением саморезов.

Максимальные напряжения в бетоне выше в тех балках, в которых саморезы располагаются вертикально.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Изучены особенности напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок на основе двутавров образованных из двух гнутых швеллеров, соединенных между собой винтами-саморезами.

2. Численными исследованиями с помощью ПК ANSYS выявлены рациональные параметры саморезов (диаметр и длина), толщина гнутых профилей и ориентация расположения саморезов.

3. Сравнение результатов численного эксперимента с данными натурных испытаний показывает, что расхождения результатов численных экспериментов от натурных (при наклонном и вертикальном расположении анкерных связей):

- по напряжениям до 9 и 11 %;
- по прогибам до 5 и 8 %;
- по несущей способности до 7 и 10 %, соответственно.

4. Сравнение результатов испытаний и численных экспериментов балок показывает, что наклонное расположение анкерных связей может дать эффект до 9–18 % по сравнению с их вертикальным расположением.

5. Численные и натурные эксперименты показали, что анкерные связи из винтов-саморезов могут быть использованы в исследованиях для моделирования в сталежелезобетонных конструкциях и других анкерных устройствах, обеспечивая в конструкциях совместную работу бетона и стального профиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабалич В.С., Андросов Е.Н. Сталежелезобетонные конструкции и перспектива их применения в строительной практике России // Успехи современной науки. 2017. № 4. С. 205–208.

2. Егоров П.И., Королев С.А. Сталежелезобетонные перекрытия // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2015. № 1. С. 310–313.

3. Веселов А.А., Чепилко С.О. Напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонной балки // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 2 (23). С. 31–37.

4. Астахов И.В., Кузнецов А.Ю., Морозова Д.В. Исследование работы сталежелезобетонных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 3 (62). С. 15–20.

5. Тамразян А.Г., Арутюнян С.Н. К оценке надежности сталежелезобетонных плит перекрытий с профилированными настилами // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 6 (53). С. 52–57.

6. Замалиев Ф.С. Учет нелинейных свойств материалов и податливости слоев при расчете прочности сталежелезобетонных перекрытий // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 5. С. 38–41.

7. Kim S., Lee U. Effects of delamination on guided waves in a symmetric laminated composite beam // Mathematical Problems in Engineering. 2014. № 2014. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2014/956043

8. Vasdravellis G., Uy B., Tan E.L., Kirkland B. Behaviour and design of composite beams subjected to sagging bending and axial compression // Journal of

Constructional Steel Research. 2015. Vol. 110. Pp. 29–39. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.03.010

9. Ye J.-H., Chen W. Elastic restrained distortional buckling of steel-concrete composite beams based on elastically supported column method // International Journal of Structural Stability and Dynamics. 2013. Vol. 13. Issue 1. P. 1350001. DOI: 10.1142/s0219455413500016

10. Akbarzadeh H., Maghsoudi A.A. Experimental and analytical investigation of reinforced high strength concrete continuous beams strengthened with fiber reinforced polymer // Materials and Design. 2010. Vol. 31. Issue 3. Pp. 1130–1147. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.09.041

11. Kotynia R. Bond between FRP and concrete in reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted and externally bonded reinforcement // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 32. Pp. 41–54. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.104

12. Kumar S., Barai S.V. Concrete fracture models and applications. Springer Berlin Heidelberg, 2011. 406 p. DOI: 10.1007/978-3-642-16764-5

13. Gholamhoseini A., Khanlou A., MacRae G., Scott A., Hicks S., Leon R. An experimental study on strength and serviceability of reinforced and steel fibre reinforced concrete (SFRC) continuous composite slabs // Engineering Structures. 2016. No. 114 (1). Pp. 171–180. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.02.010

14. BSI BS 5950-3.1.A1. Structural use of steelwork in buildings. Design in composite construction. Code of practice for design of simple and continuous composite beams. BSI, London, 2010.

15. Roger P. Jonson. Designers' guide to Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures EN 1994-1-1. 2011. P. 412.
16. Hadzalic E., Barucija K. Concrete shrinkage effects in composite beam // *Construction of unique buildings and structures*. 2014. No. 11 (26). Pp. 85–93.
17. Kim H.-Y., Jeong Y.-J. Ultimate strength of a steel-concrete composite bridge deck slab with profiled sheeting // *Engineering Structures*. 2010. Vol. 32. Issue 2. Pp. 534–546. DOI: 10.1016/j.eng-struct.2009.10.014
18. Пат. РФ 155972. Сталебетонная балка / Ф.С. Замалиев, Э.Ф. Замалиев. Заяв. 2014152336/03, 23.12.2014 ; опубл. 27.10.2015. Бюл. № 30.
19. Пат. РФ 155973. Составная сталебетонная балка / Ф.С. Замалиев, Э.Ф. Замалиев. Заяв. 2014152339/03, 23.12.2014 ; опубл. 27.10.2015. Бюл. № 31.
20. Пат. РФ 166563. Сталебетонная балка / Ф.С. Замалиев, Э.Ф. Замалиев. Заяв. 2016114024/03, 11.04.2016 ; опубл. 10.12.2016. Бюл. № 34.
21. Пат. РФ 183856. Сталебетонная составная балка / Ф.С. Замалиев, В.Г. Рябов, Э.Ф. Замалиев, Э.Г. Биккинин, Б.Т. Исмагилов, А.И. Гайнутдинов. Заяв. 2018124017, 02.07.2018 ; опубл. 05.10.2018. Бюл. № 28.
22. Замалиев Ф.С. Эксперименты на сталежелезобетонных конструкциях по выявлению фактического напряженно-деформированного состояния вплоть до их разрушения // *Механика разрушения строительных материалов и конструкций : мат. VIII Академических чтений РААСН Междунар. науч.-техн. конф. Казань, 2014. С. 88–96.*

Поступила в редакцию 25 октября 2018 г.

Принята в доработанном виде 10 декабря 2018 г.

Одобрена для публикации 28 декабря 2018 г.

О Б АВТОРЕ: Замалиев Фарит Сахапович — кандидат технических наук, профессор, доцент кафедры металлических конструкций и испытания сооружений, Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ), 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, zamaliev49@mail.ru.

REFERENCES

1. Babalich V.S., Androsov E.N. Steel-concrete structures and the prospect of their use in the construction practice of Russia. *Successes of modern science*. 2017; 4:205-208. (rus.).
2. Egorov P.I., Korolev S.A. The composite slabs. *Far East: problems of the development of the architectural and construction complex*. 2015; 1:310-313. (rus.).
3. Veselov A.A., Chepilko S.O. Stress and strain state in a steel-reinforced concrete beam. *Bulletin of Civil Engineers*. 2010; 2(23):31-37. (rus.).
4. Astakhov I.V., Kuznetsov A.Y., Morozova D.V. Investigation of the work of steel-reinforced concrete constructions. *Bulletin of Civil Engineers*. 2017; 3(62):15-20. (rus.).
5. Tamrazyan A.G., Arutyunyan S.N. To the assessment of reliability of composite steel reinforced concrete floor slabs with a profiled decking. *Bulletin of Civil Engineers*. 2015; 6(53):52-57. (rus.).
6. Zamaliev F.S. Accounting for nonlinear properties of the materials and pliability of the layers in the calculation of the strength of composite steel-concrete slabs. *Industrial and Civil Engineering*. 2013; 5:38-41. (rus.).
7. Kim S., Lee U. Effects of delamination on guided waves in a symmetric laminated composite beam. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014; 2014:1-12. DOI: 10.1155/2014/956043
8. Vasdravellis G., Uy B., Tan E.L., Kirkland B. Behaviour and design of composite beams subjected to sagging bending and axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015; 110:29-39. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.03.010
9. Ye J.-H., Chen W. Elastic restrained distortional buckling of steel-concrete composite beams based on elastically supported column method. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2013; 13(1):1350001. DOI: 10.1142/s0219455413500016
10. Akbarzadeh H., Maghsoudi A.A. Experimental and analytical investigation of reinforced high strength concrete continuous beams strengthened with fiber reinforced polymer. *Materials and Design*. 2010; 31(3):1130-1147. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.09.041
11. Kotynia R. Bond between FRP and concrete in reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted and externally bonded reinforcement. *Construction and Building Materials*. 2012; 32:41-54. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.104
12. Kumar S., Barai S.V. *Concrete fracture models and applications*. Springer Berlin Heidelberg, 2011; 406. DOI: 10.1007/978-3-642-16764-5

13. Gholamhoseini A., Khanlou A., Mac-Rae G., Scott A., Hicks S., Leon R. An experimental study on strength and serviceability of reinforced and steel fibre reinforced concrete (SFRC) continuous composite slabs. *Engineering Structures*. 2016; 114(1):171-180. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.02.010

14. BSI BS 5950-3.1.A1. *Structural use of steel-work in buildings. Design in composite construction. Code of practice for design of simple and continuous composite beams*. BSI, London. 2010.

15. Roger P. Jonson. *Designers' Guide to Euro-code 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures EN 1994-1-1*. 2011; 412.

16. Hadzalic E., Barucija K. Concrete shrinkage effects in composite beam. *Construction of unique buildings and structures*. 2014; 11(26):85-93.

17. Kim H.-Y., Jeong Y.-J. Ultimate strength of a steel-concrete composite bridge deck slab with profiled sheeting. *Engineering Structures*. 2010; 32(2):534-546. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.10.014

18. Patent 155972 of the Russian Federation. *Reinforced concrete beam* / F.S. Zamaliev, E.F. Zamaliev.

Decl. 2014152336/03, 23.12.2014 ; publ. 27.10.2015. Bul. No. 30. (rus.).

19. Patent 155973 of the Russian Federation. *Compound reinforced concrete beam* / F.S. Zamaliev, E.F. Zamaliev. Decl. 2014152339/03, 23.12.2014 ; publ. 27.10.2015. Bul. No. 31. (rus.).

20. Patent 166563 of the Russian Federation. *Reinforced concrete beam* / F.S. Zamaliev, E.F. Zamaliev. Decl. 2016114024/03, 11.04.2016 ; publ. 10.12.2016. Bul. No. 34. (rus.).

21. Patent 183856 of the Russian Federation. *Steel-concrete composite beam* / F.S. Zamaliev, V.G. Ryabov, E.F. Zamaliev, E.G. Bikkinin, B.T. Ismagilov, A.I. Gaynutdinov. Decl. 2018124017, 02.07.2018 ; publ. 05.10.2018. Bul. No. 28. (rus.).

22. Zamaliev F.S. Experiments on steel-reinforced concrete structures to identify the actual stress-strain state up to their destruction. *Mechanics of destruction of building materials and structures: proceedings of the VIII Academic Readings of the RAACS International Scientific and Technical Conference*. Kazan, 2014; 88-96. (rus.).

Received October 25, 2018.

Adopted in a modified form on December 10, 2018.

Approved for publication December 28, 2018.

ABOUT THE AUTHOR: **Farit S. Zamaliev** — Candidate of Technical Sciences, Professor, Associate Professor of Department of Metal Structures and Testing of Structures, **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**, 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation, zamaliev49@mail.ru.