

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 626

DOI: 10.22227/2305-5502.2022.1.5

Численный расчет сталежелезобетонных конструкций

Александр Романович Туснин*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Сталежелезобетонные конструкции представляют собой композитную систему, образованную стальными балками и железобетонной плитой. Для эффективной работы конструкции необходима надежная передача сдвигающих усилий между балкой и плитой. С этой целью применяются анкерные устройства, обеспечивающие связь балки и плиты. Рассматривается конструкция сталежелезобетонного перекрытия, образованного железобетонной плитой и стальными балками из гнутых профилей. Сталежелезобетонное перекрытие — это система из параллельно расположенных гнутых стальных оцинкованных балок, частично замоноличенных в бетонную плиту толщиной 90 мм, из бетона В25. Передача сдвигающих усилий передается за счет сцепления оцинкованной стали и бетона без анкерных устройств и дополнительной обработки поверхности балки.

Материалы и методы. Для выявления фактических сил сцепления выполнены испытания образцов, у которых плоская оцинкованная пластина была заделана в бетон. Проведена оценка конечно-элементных моделей (КЭМ), созданных с помощью различных вычислительных комплексов. Установлены параметры КЭМ, при которых обеспечивается приемлемая для практического использования точность.

Результаты. Экспериментально установлена прочность сцепления стальной пластины с бетоном при различных вариантах ее крепления к бетону. Определена требуемая сетка разбиения плиты при использовании 3D конечных элементов.

Выводы. Разработана конструкция сталежелезобетонного перекрытия пролетом 6–8 м с применением гнутых оцинкованных профилей, частично заделанных в железобетонную плиту толщиной 90 мм. Экспериментально определена прочность на сдвиг соединения оцинкованной стальной пластины, заделанной в бетон, составившая в зависимости от способа подготовки заделанной в бетон поверхности стального листа от 0,248 до 0,415 МПа. Отработаны численные модели с применением различных вычислительных комплексов, предназначенных для расчета сталежелезобетонного перекрытия. Намечены пути совершенствования КЭМ на основе развития численной методики расчета с учетом экспериментальных данных, полученных при испытаниях натурной конструкции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сталежелезобетонная композитная балка, композитная конструкция, прочность на изгиб, экспериментальные исследования, легкая стальная конструкция, тонкостенная конструкция

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Туснин А.Р. Численный расчет сталежелезобетонных конструкций // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. Вып. 1. Ст. 5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.1.5

Автор, ответственный за переписку: Александр Романович Туснин, TusninAR@mgsu.ru.

Numerical calculation of steel-concrete structures

Alexander R. Tusnin*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Steel-concrete structures are composite systems composed of steel beams and a reinforced concrete slab. The reliable transfer of shear forces between the beam and the slab is required for the structure to behave efficiently. Towards this end, anchoring devices are used to ensure a connection between the beam and the slab. The design of a steel-concrete beam, composed of a reinforced concrete slab and steel beams, having bent sections, is considered. The steel-concrete beam is a system of galvanized bent steel beams placed in parallel and partially embedded in the 90 mm thick concrete slab made of B25 concrete. Shear forces are transmitted due to adhesion between galvanized steel and concrete without anchoring devices or the additional treatment of the beam surface.

Materials and methods. The samples, whose flat galvanized plate had been embedded in concrete, were tested to identify actual adhesion forces. Finite element models (FEM), developed using various software packages, were assessed. FEM parameters that ensured the accuracy, acceptable for practical use, were identified.

Results. The strength of adhesion between the steel plate and concrete was experimentally identified for different options of its attachment to concrete. The mesh pattern was identified for the plate for the case when 3D finite elements were used.

Conclusions. A steel-concrete beam with a span of 6–8 m, bent galvanized sections partially embedded in the reinforced concrete slab with a thickness of 90 mm was developed. The author experimentally identified the shear resistance of a galvanized steel plate embedded in concrete, which reached 0.248 to 0.415 MPa depending on how the surface of the steel plate embedded in concrete was prepared. Numerical models were tested using different computational packages designa-

ted for the calculation of steel-reinforced concrete beams. The author suggests FEM improvements on the basis of numerical calculation methods applied with due regard for the experimental data obtained during the testing of the full-scale structure.

KEYWORDS: steel-concrete composite beam, composite structure, flexural strength, experimental studies, light steel structure, thin-walled structure

FOR CITATION: Tusnin A.R. Numerical calculation of steel-concrete structures. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2022; 12(1):5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.1.5

Corresponding author: Alexander R. Tusnin, TusninAR@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Сталежелезобетонные конструкции, образованные бетоном и стальными профилями, используют полезные свойства стали и бетона за счет их размещения соответственно в растянутой и сжатой зоне [1, 2].

Для восприятия сдвигающих усилий между бетоном и стальной балкой могут применяться жесткие или гибкие упоры, стад-болты, высокопрочные болты и шпильки¹ [3–6]. Реализуются конструктивные решения со съемными анкерами, передающими сдвигающие усилия между бетонными плитами и стальной балкой, но позволяющими при необходимости отсоединять поврежденные плиты и заменять их при проведении ремонта [7]. Одним из вариантов композитной сталежелезобетонной конструкции может служить несущая балка, состоящая из пластины внизу балки, к которой наклонными хомутами приварены располагаемые в верхней зоне продольные стержни арматуры [8]. Передачу сдвигающих усилий также осуществляют посредством сил сцепления между бетоном и стальной поверхностью частично замоноличенной в плиту стальной балки [9]. Стальные балки могут быть прокатными, сварными, гнутыми. При пролетах 6–8 м и нагрузках до 3 кПа на перекрытие рационально выполнять балку из гнутого оцинкованного профиля (рис. 1).

Композитные перекрытия со стальными балками из гнутого оцинкованного профиля без анкерных устройств между плитой и балкой имеют простую конструкцию. Для обеспечения сцепления бетона с балкой ее заводят при монтаже выше уровня опалубки. После набора бетоном прочности образуется композитная сталежелезобетонная конструкция. Такое конструктивное решение позволяет снизить расход материалов на перекрытия и уменьшить сроки монтажа зданий. К преимуществам сталежелезобетонного перекрытия с гнутыми стальными балками следует отнести простоту и пониженную высоту конструкции. Для упрощения конструкции в качестве опалубки для укладки бетона можно использовать стандартные листы влагостойкой фанеры, ширина которых составляет 1220, 1250, 1525 мм. С учетом этого возможно назначить шаг балок. Опалубка крепится непосредственно к балкам с помощью монтажных анкеров, заводимых в отверстия

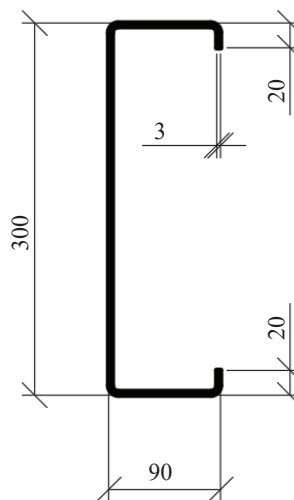


Рис. 1. Балка из гнутого тонкостенного профиля

в стенке балки. После набора прочности бетоном монтажные анкера удаляются, и производится распалубливание плиты. Для обеспечения прочности плиты на срез плита армируется сеткой. На рис. 2 показано поперечное сечение перекрытия, состоящего из железобетонной плиты толщиной 90 мм и гнутого профиля, заведенного в плиту на 33 мм.

В рассматриваемом перекрытии для восприятия расчетной нагрузки необходимо обеспечить прочность сцепления поверхности стальной балки и бетона. Вопрос прочности сцепления стальной оцинкованной поверхности и бетона исследован недостаточно. Отсутствуют нормативные рекомендации по расчету таких конструкций. С целью определения особенностей передачи сдвигающих усилий в зоне контакта профиля и бетона проведены экспериментальные и численные исследования.

При расчете сталежелезобетонных конструкций учитываются действующие строительные нормы и правила^{2,3} с использованием инженерных методик [10–13]. Практика научных исследований подтвердила надежность применения численных

² СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования : утв. приказом Министра России от 30.12.2016 № 1030/пр. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044285>

³ СП 260.1325800.2016. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования : утв. приказом Министра России от 03.12.2016 № 881/пр.

¹ СТО 0047-2005. Перекрытия сталежелезобетонные с монолитной плитой по стальному профилированному настилу.

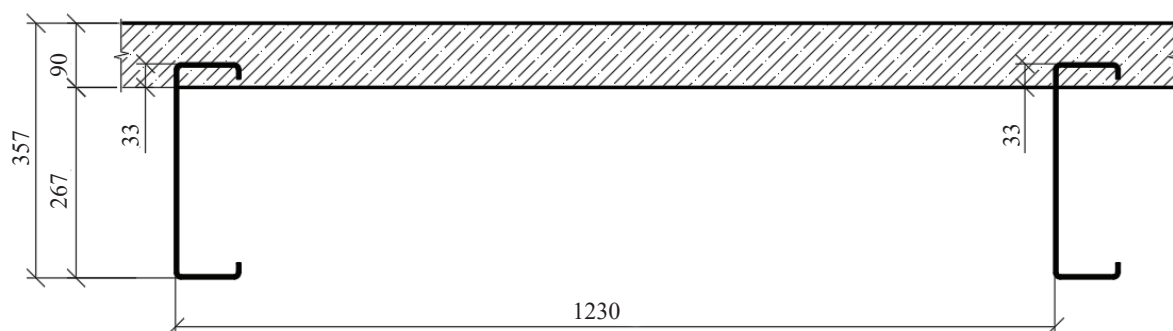


Рис. 2. Фрагмент поперечного сечения перекрытия

методов для расчета сталежелезобетонных несущих систем² [14–16].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперимент

Продуктивно при исследовании поведения сталежелезобетонных конструкций используются испытания образцов и натурных конструкций. Экспериментальные исследования взаимодействия стальной балки и бетона позволили выявить особенности работы сталежелезобетонных конструкций при различных способах соединения балки и бетона [17].

В НИУ МГСУ экспериментально изучено взаимодействие бетона и замоноличенных в него тонких оцинкованных стальных пластин. Исследования усилий, воспринимаемых за счет сил сцепления между стальной оцинкованной пластиной и бетоном, выполнены на экспериментальной установке, состоящей из силовой рамы и гидравлического цилиндра. При проведении испытаний стальная пластина, замоноличенная в бетонный параллелепипед, упертый в раму установки, выдергивалась из него (рис. 3).

Для испытаний подготовлены 4 варианта экспериментальных образцов. У всех образцов бетонный параллелепипед имел размеры $700 \times 400 \times 150$ мм. Стальные оцинкованные пластины толщиной 3 мм, длиной 720 мм и шириной 300 мм заво-

дились в бетон на глубину 300 мм. Выбор толщины плиты и стальной пластины позволил наблюдать взаимодействие бетона и стальной пластины в условиях, близких к тем, при которых они будут взаимодействовать в перекрытии. Пластина крепилась к гидроцилиндру испытательной машины шестью болтами М20.

Рассмотрено четыре типа образцов, отличающихся друг от друга особенностями замоноличенных в бетон участков стальной пластины:

- образец № 1, замоноличенный участок оцинкованной стальной пластины гладкий, сцепление с бетоном достигается за счет адгезионных свойств материалов;
- образец № 2, замоноличенный участок оцинкованной стальной пластины имеет 8 отверстий диаметром 22 мм, сцепление с бетоном достигается благодаря адгезионным свойствам материалов и формированию небольших бетонных шпонок;
- образец № 3, на замоноличенном участке пластины выполняется 8 отверстий диаметром 10 мм, в которые устанавливаются болты диаметром 8 мм, длиной 40 мм, увеличивающие сцепление пластины с бетоном;
- образец № 4, на замоноличенном участке пластины выштамповываются 8 отогнутых на 90 градусов от плоскости пластины треугольных равносторонних шипов размерами 20 мм, которые увеличивают сцепление пластины с бетоном.

Пластины изготовлены из оцинкованной стали марки 350 по ГОСТ Р 52246-2016 «Прокат листовой горячеоцинкованный». В соответствии с СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов» расчетное сопротивление этой стали по пределу текучести $R_y = 330$ МПа.

Образцы выполнены из бетона класса прочности В25. Расчетное сопротивление бетона, МПа:

- осевому сжатию $R_b = 14,5$;
- осевому растяжению $R_{bt} = 1,05$;
- на срез $R_{sh} = 2R_{bt} = 2,1$.

Для крепления пластины к гидравлическому цилиндру использовались болты класса прочности 8.8.

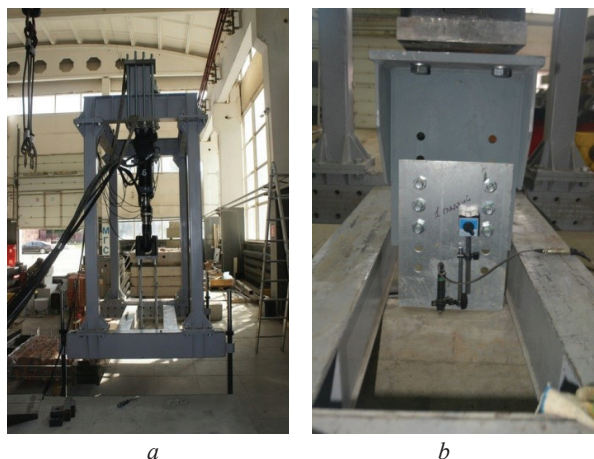


Рис. 3. Экспериментальная установка (a) и экспериментальный образец (b)

Испытания образцов проводились на базе Головного регионального центра коллективного пользования Национального исследовательского Московского государственного строительного университета. Экспериментальные исследования осуществлены в рамках диссертационной работы Т.И. Ахрамочкиной [18].

Численные исследования

Расчет сталежелезобетонного перекрытия рационально выполнять с помощью метода конечных элементов. Для выбора вычислительного комплекса, параметров конечно-элементных моделей (КЭМ) и вычислительных процедур проведен ряд верификационных и тестовых расчетов. Рассмотрено применение вычислительных комплексов LIRA-SAPR и Nastran.

С использованием вычислительных комплексов LIRA-SAPR и Nastran разработаны КЭМ, которые применяются для численного расчета перекрытия. Конечно-элементная модель составлена для фрагмента перекрытия пролетом 6 м с балками из гнутых стальных профилей, данный фрагмент состоит из трех балок, ширина фрагмента 3690 мм. В расчетную схему с учетом симметрии включена половина перекрытия. На рис. 4 показаны расчетные модели для LIRA-SAPR, Nastran.

Железобетонная плита моделируется 3D конечными элементами (КЭ), стальная балка — КЭ оболочки. Связь между плитой и балкой принята жесткой. Исходя из проведенного анализа влияния сетки разбиения на точность численного решения принята следующая сетка разбиения (по толщине плиты, ширине фрагмента, пролету плиты):

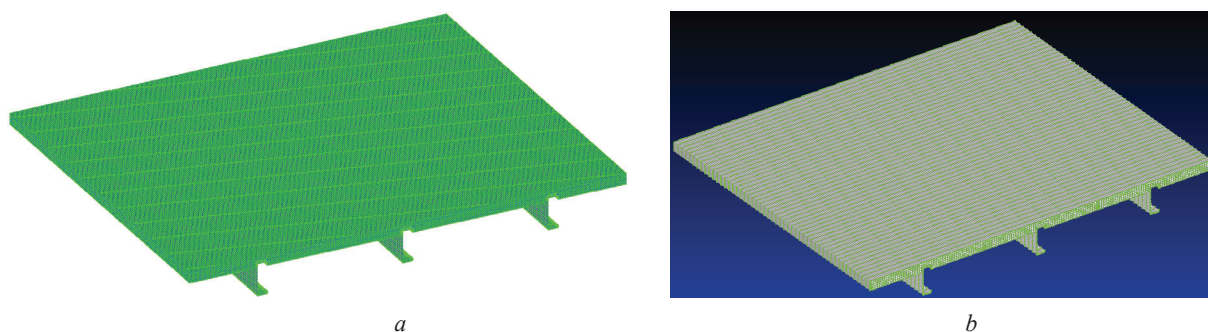


Рис. 4. Конечно-элементная модель фрагмента перекрытия: *a* — LIRA-SAPR; *b* — Nastran

для LIRA-SAPR — $5 \times 250 \times 200$; Nastran — $5 \times 187 \times 100$. Для учета фактической прочности зоны контакта при расчете предусматривается анализ сил сдвига и сравнение их с предельными значениями прочности, полученной по результатам испытаний.

С целью оценки параметров КЭМ выполнены расчеты шарнирно опертой по контуру бетонной плиты толщиной 90 мм, размерами в плане 6×6 м, бетон В25, нагрузка 1 кПа. Принимая во внимание симметрию системы, расчет проведен для четверти плиты, с наложением по осям симметрии соответствующих связей. Конечно-элементные модели построены с применением 3D КЭ. Рассмотрено несколько сеток разбиения на КЭ. Результаты численных расчетов сравнивались с известным аналитическим решением [19].

С учетом полученных данных о зависимости точности решений от сетки разбиения построены КЭМ образца № 1, которые включали бетонный параллелепипед и стальную пластину. Исходя из симметрии они построены для половины образца. К концу стальной пластины приложена распределенная нагрузка суммарной величиной 48 кН (24 кН на половину образца), т.е. интенсивностью $53\,333\text{ кН/м}^2$. Расчеты произведены с применением вычислительных комплексов LIRA-SAPR и Nastran. На рис. 5 приведена КЭМ для образца № 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Испытания образцов позволили установить прочность сцепления стальной пластины с бетоном при различных вариантах ее крепления к бетону. Зависимости «перемещение-нагрузка», построенные по результатам испытаний образцов, представлены на рис. 6.

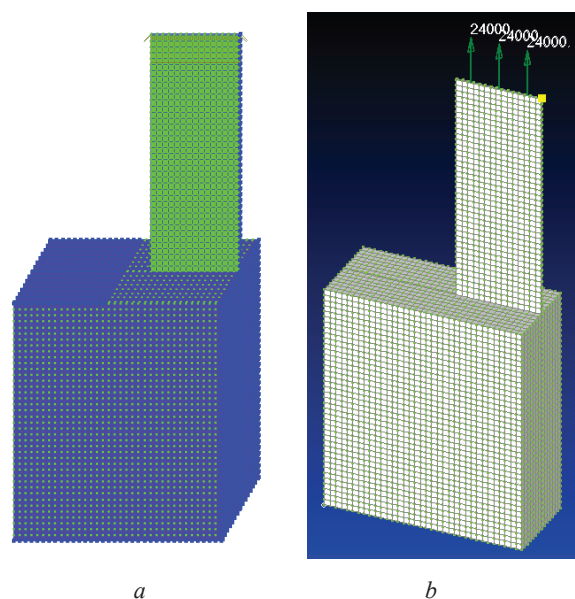


Рис. 5. Конечно-элементная модель экспериментального образца № 1: *a* — LIRA-SAPR; *b* — Nastran

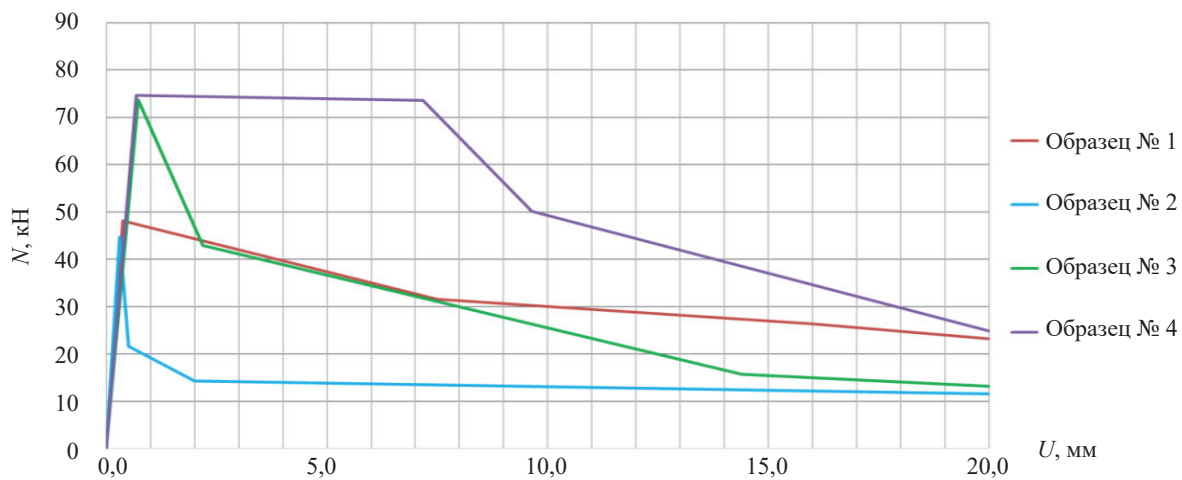


Рис. 6. Зависимости «перемещение-нагрузка»

Качественная картина деформирования всех образцов одинаковая: до максимальной нагрузки зависимость «перемещение-нагрузка» линейная, после достижения максимальной нагрузки происходило разрушение образца, и нагрузка быстро снижалась. Исключение составляет образец № 4, у которого после достижения предельной нагрузки наблюдался достаточно протяженный участок с практически неизменной нагрузкой, что обусловлено деформированием отогнутых зубцов, сформированных на замоналичной в бетон полке профиля.

Линейная зависимость «перемещение-нагрузка» у образца № 1 с гладкой пластиной имела место до нагрузки 48,2 кН. После этой нагрузки отмечено разрушение соединения стальной пластины и бетона, при достижении которой были преодолены силы сцепления пластины с бетоном. Затем без видимого разрушения бетона происходило скольжение оцинкованной пластины по бетону со скоростью движения гидроцилиндра.

Анализ поведения образца в процессе испытания показал, что на первой линейной стадии работы отношение максимальной нагрузки 48,2 кН к соответствующему перемещению 0,4 мм для первого образца составил: $48,2/0,4 = 120,50$ кН/мм. После преодоления сил сцепления в образце № 1 не зафиксировано сохранение максимального уровня на-

грузки, дальнейшие перемещения происходили при снижении нагрузки, прочность по силе сцепления гладкой оцинкованной стальной пластины с бетоном была исчерпана, и эту нагрузку следует считать предельной при расчете конструкции.

Прочность сцепления бетона и стальной гладкой оцинкованной пластины составляет: $48,2/1800 = 0,0268$ кН/см² = 0,268 МПа, где 1800 см² — площадь соприкосновения стальной пластины и бетона.

Для оценки достоверности результатов, получаемых разными вычислительными комплексами с использованием 3D КЭ, осуществлены тестовые расчеты железобетонной плиты при разных сетках разбиения. Это позволило установить необходимые параметры КЭМ для подобных систем. В табл. 1 приведено сравнение результатов, полученных разными способами.

Анализ верификационных расчетов показал, что при использовании комплекса LIRA-SAPR требуемая точность достигается на сетке $2 \times 120 \times 120$, при использовании комплекса Nastran на сетке $2 \times 80 \times 80$. Менее густая сетка при применении комплекса Nastran обусловлена особенностями матрицы жесткости КЭ, реализованной в этом комплексе. Использование менее густой сетки умень-

Табл. 1. Сопоставление теоретических и численных данных

Способ расчета	Прогиб, мм		Момент и нормальные напряжения		
	мм	%	кН м/м	кН/м ²	%
Теория	0,567	100	1,724	459,8	100
Lira-SAPR 3D $1 \times 120 \times 120$	0,465	82	—	—	—
Lira-SAPR 3D $2 \times 120 \times 120$	0,539	95	1,626	433,6	94
Lira-SAPR 3D $4 \times 120 \times 120$	0,561	99	1,695	452,0	98
Nastran 3D $1 \times 20 \times 20$	0,337	59	1,066	284,3	62
Nastran 3D $2 \times 80 \times 80$	0,564	99	1,728	460,7	100
Nastran 3D $4 \times 80 \times 80$	0,564	99	1,732	461,8	100

шает время расчета и требования к вычислительным ресурсам.

С учетом выполненных тестовых расчетов были назначены параметры КЭМ образца № 1. Результаты численных расчетов образца № 1 при действии суммарной нагрузки 48 кН приведены в табл. 2.

Экспериментально определенное перемещение нагрузочного устройства при испытаниях образца № 1 составило 0,4 мм, что заметно больше расчетного. Такое отличие вызвано деформациями

болтового соединения и нагрузочного устройства. При испытаниях деформации образца до его разрушения происходили на участке стального листа вне бетона. По численному расчету удлинение листа вдоль его осевой линии на участке листа вне бетона составило:

$$0,12 - 0,019 = 0,101 \text{ мм},$$

где 0,019 мм — перемещение образца по расчету в месте контакта листа с бетоном.

Табл. 2. Результаты численных расчетов

Конечно-элементная модель	Перемещение пластины, мм	Нормальные напряжения в стальной пластине, МПа	Касательные напряжения по оси стального листа в вертикальном направлении, МПа
LIRA-SAPR 3D 17 × 40 × 70	0,120	53,3	От 0,0058 до 1,799
LIRA-SAPR 3D 31 × 80 × 140	0,120	53,3	От 0,0038 до 2,596
Nastran 3D 15 × 40 × 70	0,120	53,4	От 0,0072 до 0,584

Аналитический расчет показал, что это удлинение равно:

$$53,3 \cdot 420 / 206\,000 = 0,109 \text{ мм},$$

где 420 мм — длина свободного участка листа; 206 000 МПа — модуль упругости стали.

Таким образом, аналитическое удлинение пластины хорошо соотносится с численным решением, превышая численное значение на 7 %.

Следует отметить, что нормальные напряжения в стальном листе вне заделки его в бетон полностью совпадают с приложенной распределенной нагрузкой 53,33 МПа. Касательные напряжения, действующие в вертикальном направлении, распределены по длине заделанного в бетон стального листа неравномерно. При этом, чем глубже в бетоне располагается участок листа, тем меньше на нем касательные напряжения. Максимальные касательные напряжения заметно отличаются от средних экспериментальных. Однако максимальные касательные напряжения по численному расчету наблюдаются на участке длиной не более 1/10 полной заделки листа в бетон. С целью уточнения распределения касательных напряжений по длине листа необходимо провести дополнительные численные исследования с учетом физической нелинейности материала и особенностей контактного взаимодействия стальной пластины и бетона.

Для верификации КЭМ сталежелезобетонного перекрытия со стальными гнутыми балками,

частично заделанными в железобетонную плиту, предполагается проведение испытаний натурной конструкции. Экспериментальные данные в сравнении с результатами численных расчетов позволят уточнить конечно-элементные модели и параметры численного расчета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании проведенной работы можно сделать следующие выводы:

- разработана конструкция сталежелезобетонного перекрытия пролетом 6–8 м с применением гнутых оцинкованных профилей, частично заделанных в железобетонную плиту толщиной 90 мм;
- экспериментально определена прочность на сдвиг соединения оцинкованной стальной пластины, заделанной в бетон, составившая в зависимости от способа подготовки заделанной в бетон поверхности стального листа от 0,248 до 0,415 МПа;
- отработаны численные модели с применением различных вычислительных комплексов, предназначенных для расчета сталежелезобетонного перекрытия;
- намечены пути совершенствования конечно-элементных моделей на основе развития численной методики расчета с учетом экспериментальных данных, полученных при испытаниях натурной конструкции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бабалич В.С., Андросов Е.Н. Сталежелезобетонные конструкции и перспектива их применения

в строительной практике России // Успехи современной науки. 2017. Т. 4. № 4. С. 205–208.

2. Кибирева Ю.А., Астафьева Н.С. Применение конструкций из сталежелезобетона // Экология и строительство. 2018. № 2. С. 27–34. DOI: 10.24411/2413-8452-2018-10004
3. Kanchanadevi A., Ramanjaneyulu K., Gandhi P. Shear resistance of embedded connection of composite girder with corrugated steel web // Journal of Constructional Steel Research. 2021. Vol. 187. P. 106994. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106994
4. Альхименко А.И., Ватин Н.И., Рыбаков В.А. Технология легких стальных тонкостенных конструкций. СПб. : Изд-во СПбОДЗПП, 2008. 26 с.
5. Теплова Ж.С., Виноградова Н.А. Прочность сталежелезобетонных образцов при центральном сжатии // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 5 (32). С. 29–38.
6. Ростовых Г.Н. Совершенствование методики расчета гибких упоров в конструкциях сталежелезобетонных мостов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2007. № 3 (12). С. 79–87.
7. Крылов С.Б., Семенов В.А., Конин Д.В., Крылов А.С., Рожкова Л.С. О новом Руководстве по проектированию сталежелезобетонных конструкций (в развитие СП 266.13330.2016 Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования) // Academia. Архитектура и строительство. 2019. № 1. С. 99–106. DOI 10.22337/2077-9038-2019-1-99-106
8. Suwaed A.S.H., Karavasilis T.L. Demountable steel-concrete composite beam with full-interaction and low degree of shear connection // Journal of Constructional Steel Research. 2020. Vol. 171. P. 106152. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106152
9. Colajanni P., Mendola L.L., Monaco A. Review of push-out and shear response of hybrid steel-trussed concrete beams // Buildings. 2018. Vol. 8. Issue 10. P. 134. DOI: 10.3390/buildings8100134
10. Рыбаков В.А. Современные методы расчета металлоконструкций из тонкостенных профилей // Стройматериалы. 2007. № 2 (2). С. 36–38.
11. Hsu C.T.T., Punurai S., Punurai W., Majidi Y. New composite beams having cold-formed steel joists and concrete slab // Engineering Structures. 2014. Vol. 71. Pp. 187–200. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.04.011
12. Ahmed I.M., Tsavdaridis K.D. The evolution of composite flooring systems: applications, testing, modelling and Eurocode design approaches // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 155. Pp. 286–300. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.01.007
13. Панова Е.С., Сергеев Е.И. Особенности расчета сталежелезобетонных конструкций // Научный взгляд в будущее. 2019. Т. 1. № 14. С. 72–75. DOI: 10.30888/2415-7538.2019-14-01-005
14. Reginato L.H., Tamayo J.L.P., Morsch I.B. Finite element study of effective width in steel-concrete composite beams under long-term service loads // Latin American Journal of Solids and Structures. 2018. Vol. 15. Issue 8. DOI: 10.1590/1679-78254599
15. Tamayo J.L.P., Franco M.I., Morsch I.B., Désir J.M., Wayar A.M.M. Some aspects of numerical modeling of steel-concrete composite beams with prestressed tendons // Latin American Journal of Solids and Structures. 2019. Vol. 16. Issue 7. DOI: 10.1590/1679-78255599
16. Alsharari F., El-Zohairy A., Salim H., El-Sisi A.E. Numerical investigation of the monotonic behavior of strengthened Steel-Concrete composite girders // Engineering Structures. 2021. Vol. 246. P. 113081. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113081
17. Jurkiewicz B., Braymand S. Experimental study of a pre-cracked steel-concrete composite beam // Journal of Constructional Steel Research. 2007. Vol. 63. Issue 1. Pp. 135–144. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.03.013
18. Ахрамочкина Т.И. Теоретические и экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций с применением гнутых стальных профилей // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11. № 4. С. 27–40. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.4.3
19. Биргер И.А., Пановко Я.Г. Прочность, устойчивость, колебания : справочник в 3-х томах. Т. 1. М. : Машиностроение, 1968. 831 с.

Поступила в редакцию 18 марта 2022 г.

Принята в доработанном виде 29 марта 2022 г.

Одобрена для публикации 29 марта 2022 г.

ОБ АВТОРЕ: Александр Романович Туснин — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры металлических и деревянных конструкций, проректор; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 455914, Scopus: 6507367654, ORCID: 0000-0002-9997-9436; TushinAR@mgsu.ru.

INTRODUCTION

Steel-concrete structures, made of concrete and steel sections, take advantage of useful properties

of steel and concrete by placing them in tensile and compressed zones, respectively [1, 2].

Rigid or flexible connectors, stud bolts, high-strength bolts and studs can be used to absorb shear

forces arising between concrete slabs and the steel beam¹ [3–6]. Structural solutions with removable anchors, transmitting shear forces between concrete slabs and the steel beam, are implemented. They allow for the damaged slabs to be disconnected and replaced during repairs, if necessary [7]. One option of a composite steel-concrete structure can represent a bearing beam consisting of a plate at the bottom of the beam to which longitudinal reinforcement bars, located in the upper zone, are welded with oblique collars [8]. Shear forces are also transmitted by adhesive forces between the concrete and the steel surface of the steel beam partially embedded in the plate [9]. Steel beams can be rolled, welded or bent. For cases of spans reaching 6–8 m and loads up to 3 kPa per beam, it is rational to make beams from bent galvanized sections (Fig. 1).

Composite slabs with steel beams made of bent galvanized sections without anchoring devices between the slab and the beam have a simple design. To ensure the adhesion between concrete and the beam, the latter is installed above the level of the formwork. Once concrete has reached full strength, a composite steel — concrete structure is formed. This structural solution reduces the consumption of materials for floor slabs and decreases the construction time. The strengths of a steel — concrete slab with bent steel beams include simplicity and the lower height of the structure. To simplify the structure, standard sheets of moisture-resistant plywood, the width of which is 1,220, 1,250, 1,525 mm, can be used as the concrete formwork. With this in mind, it is possible to assign the span of beams. The formwork is fixed directly to the beams with the help of mounting anchors, embedded into the holes in the beam wall. After the concrete has gained strength, mounting anchors are removed and the slab is stripped. To ensure the shear strength of the slab, it is reinforced with mesh. Fig. 2 shows the cross-section of the slab consisting of a reinforced concrete slab 90 mm thick and a bent section embedded into the slab to the depth of 33 mm.

It is necessary to ensure the strength of bond between the steel beam surface and concrete for the slab in question to be able to absorb the design load. The issue of the bond strength between the galvanized steel surface and concrete has not been sufficiently studied. There are no regulatory recommendations for the calculation of such structures. Experimental and numerical studies were conducted to identify the features of shear force transmission at the interface between the contact zone of the section and concrete.

The calculation of steel — concrete structures takes into account the existing construction standards and

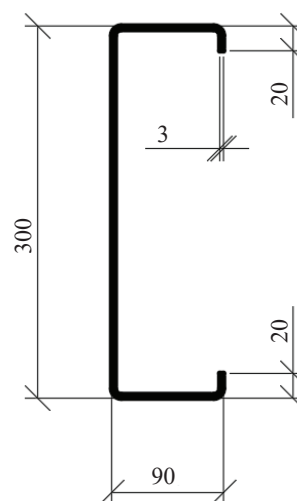


Fig. 1. A beam made of a bent thin-walled section

regulations^{2,3} that apply engineering methods [10–13]. The practice of scientific research has confirmed the reliability of application of numerical methods for the calculation of steel — concrete bearing systems² [14–16].

MATERIALS AND METHODS

Experiment

The testing of specimens and full-scale structures are efficient in the case of studying the behaviour of steel — concrete structures. Experimental studies on interaction between steel beams and concrete have identified the features of steel — concrete structures in cases of different types of connections between beams and concrete [17].

The interaction between concrete and thin galvanized steel plates embedded in it was experimentally studied at the Moscow State University of Civil Engineering. The forces perceived due to the presence of adhesive forces between a galvanized steel plate and concrete were studied using an experimental test bench consisting of a load frame and a hydraulic cylinder. In the course of testing, the steel plate embedded in the concrete parallelepiped resting on the test bench frame was pulled out of it (Fig. 3).

Four types of experimental specimens were prepared for testing. The concrete parallelepiped of all specimens had the dimensions of 700 × 400 × 150 mm. Steel galvanized plates were 3 mm thick, 720 mm long and 300 mm wide. They were embedded in concrete to a depth of 300 mm. The choice of thickness of a slab and a steel plate allowed observing the interaction be-

² SP 266.1325800.2016. Composite steel and concrete structures. Design rules : Retrieved November 25, 2019. URL: <http://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/809/266.pdf>

³ SP 260.1325800.2016. Thin-walled steel structures made of cold-formed galvanized sections and corrugated sheets. Design Rules: Approved by Order of the Ministry of Construction of Russia from 3.12.2016 № 881/pr.

¹ Corporate standard 0047-2005. Steel — concrete beams with a monolithic slab on the steel flooring.

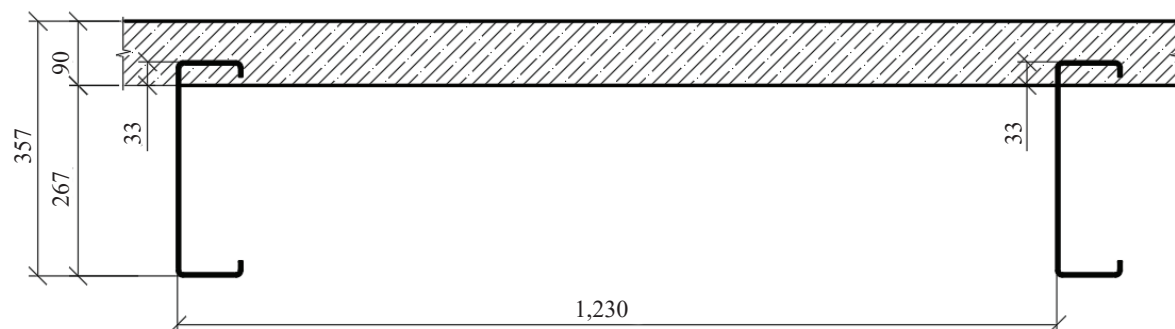


Fig. 2. Fragment of the slab cross-section

tween concrete and a steel plate under the conditions close to those in which they would interact in the slab. Six M20 bolts were used to attach the plate to the hydraulic cylinder of the test bench.

Four types of specimens were considered; they differed from each other by the features of the steel plate sections embedded in concrete:

- specimen 1: the embedded part of the galvanized steel plate is smooth; the adhesion with concrete is achieved due to the adhesive properties of the materials;
- specimen 2: the embedded part of the galvanized steel plate has 8 holes with a diameter of 22 mm; the adhesion to concrete is achieved due to the adhesive properties of the materials and small concrete connectors;
- specimen 3: the embedded part of the plate has 8 drilled holes 10 mm in diameter, into which bolts 8 mm in diameter and 40 mm in length are inserted to increase the adhesion of the plate to the concrete;
- specimen 4: 8 equilateral triangular studs with dimensions of 20 mm, bent 90 degrees from the plane of the plate, are stamped on the embedded part of the plate to increase the adhesion between the plate and concrete.

The plates are made of the 350 grade galvanized steel according to GOST R 52246-2016 “Hot-dip galvanized sheet metal”. In accordance with Construction Regulations 260.1325800.2016 “Thin-walled steel structures made of cold-bent galvanized sections and

corrugated sheets”, the design resistance of this steel grade at the yield point $R_y = 330$ MPa.

The specimens are made of class B25 concrete. The design resistance of concrete, MPa:

- axial compression $R_b = 14.5$;
- axial tension $R_{bt} = 1.05$;
- shear resistance $R_{sh} = 2R_{bt} = 2.1$.

Bolts, having 8.8 class strength, were used to attach the plate to the hydraulic cylinder.

The specimens were tested at the Head Regional Centre of Collective Use of the National Research Moscow State University of Civil Engineering. Experimental studies were conducted as part of the dissertation drafted by T.I. Akhramochkina [18].

Numerical studies

The calculation of a steel — concrete slab can be rationally performed using the finite element method. A number of verification and test calculations were conducted to select the computational package, the parameters of finite element models (FEM) and computational procedures. The application of LIRA-SAPR and Nastran computational packages is considered.

FEMs were developed using LIRA-SAPR and Nastran computational packages; they were further used to perform the numerical calculation of the slab. The finite element model is made for a slab fragment spanning 6 m with beams made of bent steel sections. This fragment consists of three beams, the width of the fragment is 3,690 mm. Half of the slab is included in the computational pattern with symmetry taken into account. Fig. 4 shows calculation models for LIRA-SAPR, Nastran.

The reinforced concrete slab is simulated by 3D finite elements (FE); the steel beam is simulated by shell FE. The connection between the slab and the beam is assumed rigid. Given the analysis of the influence of the grid on the accuracy of the numerical solution, the following grid (in terms of the plate thickness, the fragment width, and the plate span) is adopted: $5 \times 250 \times 200$ for LIRA-SAPR; $5 \times 187 \times 100$ for Nastran. The calculation involves the analysis of the shear forces and their comparison with the limit values

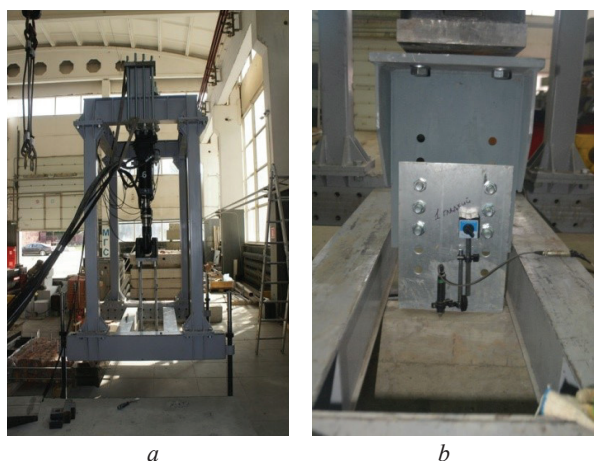


Fig. 3. An experimental test bench (a) and an experimental specimen (b)

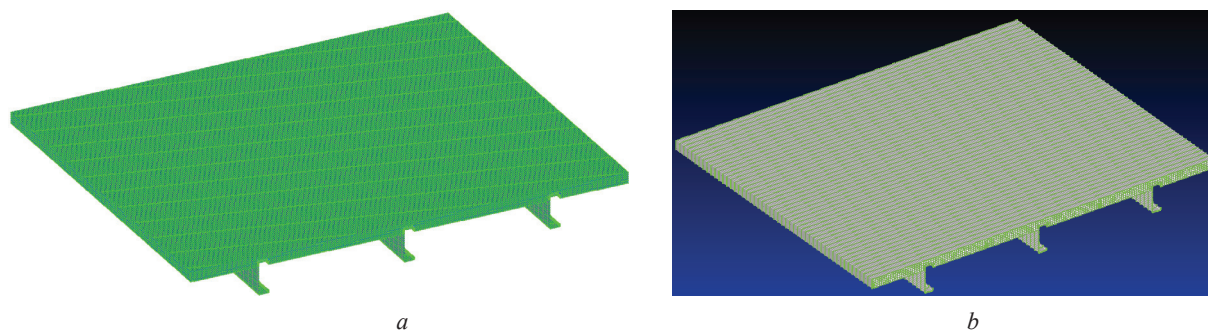


Fig. 4. The finite element model of the slab fragment: *a* — LIRA-SAPR; *b* — Nastran

of strength obtained from the testing results to take into account the actual strength of the contact zone.

To assess the parameters of FEM, calculations of a 90-mm thick concrete slab hinged along the contour, having the dimensions of 6×6 m in plan, made of B25 concrete, and subjected to the load equaling 1 kPa. Taking into account the symmetry of the system, the calculation was conducted for a quarter of the slab, with the superposition of corresponding connections along the axes of symmetry. Finite element models were built using 3D FE. Several meshes were considered. The results of numerical calculations were compared with the available analytical solution [19].

Taking into account the dependence of the solution accuracy on the grid, FEMs of specimen 1, composed of a concrete parallelepiped and a steel plate, were constructed. Given the symmetry, they were built for half of the specimen. The total distributed load of 48 kN (24 kN per half of the specimen) was applied to the end of the steel plate; its intensity was 53,333 kN/m². Calculations were made using LIRA-SAPR and Nastran computational packages. Fig. 5 shows the FEM for specimen 1.

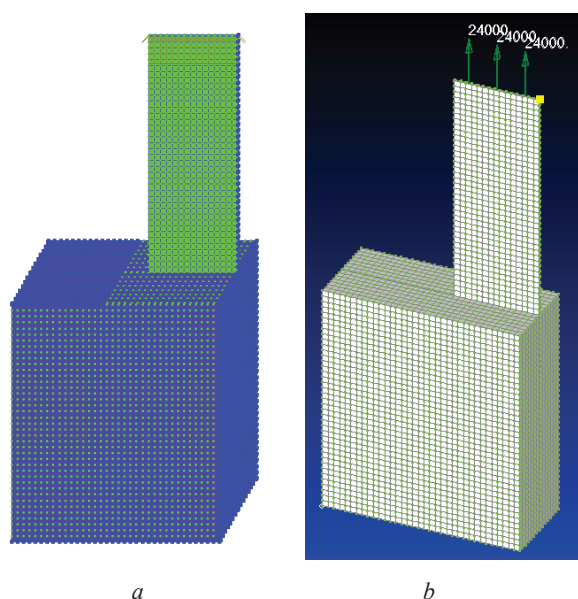


Fig. 5. The finite element model of experimental specimen 1: *a* — LIRA-SAPR; *b* — Nastran

RESEARCH RESULTS

The testing of specimens helped to determine the strength of adhesion between the steel plate and concrete for different options of its attachment to concrete. The “displacement-loading” relationships identified on the basis of testing results are shown in Fig. 6.

The qualitative pattern of deformation is the same for all specimens: the “displacement-loading” dependence is linear when the loading is below maximum; the specimen failed after reaching maximum loading, and the loading rapidly decreased. The exception was specimen 4, in which a rather extended section with practically constant loading was observed after reaching the maximum loading value, which was caused by the deformation of bent teeth formed on the section flange embedded in concrete.

The “displacement-loading” dependence in specimen 1, that had a smooth plate, was linear up to the loading of 48.2 kN. After that, the steel plate-concrete connection failed, and the forces of adhesion between the plate and concrete were overcome. Then the galvanized plate slid over the concrete at the speed of the hydraulic cylinder without any visible destruction of concrete.

The analysis of the behaviour of the specimen during testing showed that at the first linear stage of operation, the ratio of maximum loading of 48.2 kN to the corresponding displacement of 0.4 mm for the first specimen was $48.2/0.4 = 120.50$ kN/mm. After overcoming the forces of adhesion in specimen 1, no maximum loading was recorded, further displacements occurred with a decrease in loading, the strength of adhesion between a smooth galvanized steel plate and concrete was exhausted, and this loading value should be considered as the limit one for the calculation of the structure.

The strength of adhesion between concrete and a smooth galvanized steel plate is $48.2/1,800 = 0.0268$ kN/cm² = 0.268 MPa, where 1,800 cm² is the contact area of the steel plate and concrete.

To assess the reliability of the results obtained using 3D FEM in different computational packages, test calculations of the reinforced concrete slab and different meshes were conducted. They helped to identify the FEM parameters for such systems. Table 1 presents the results obtained using different methods.

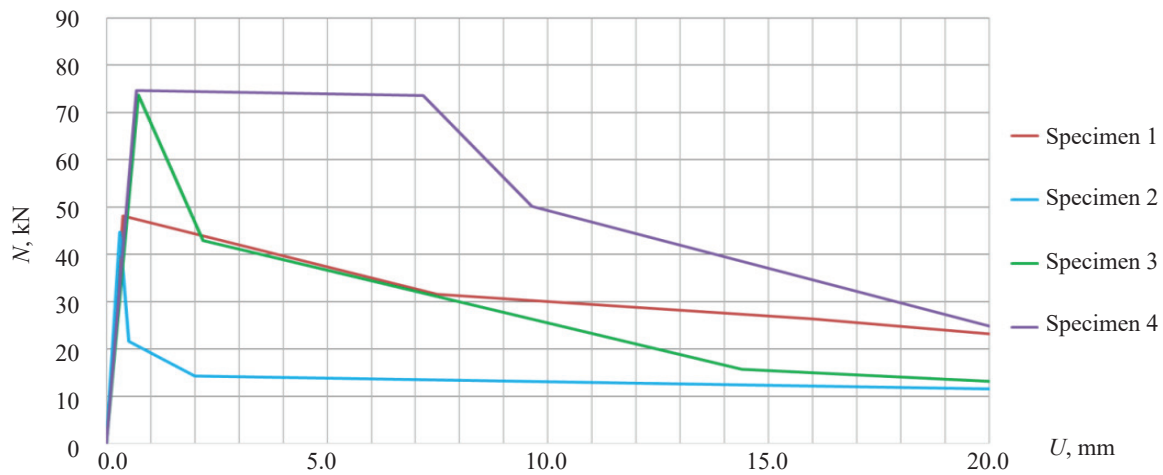


Fig. 6. Displacement-loading relationships

The analysis of verification calculations showed that the required accuracy was achieved for a $2 \times 120 \times 120$ mesh when LIRA-SAPR was used, while a $2 \times 80 \times 80$ mesh was needed for Nastran. Nastran needs a less dense mesh due to the features of the FE rigidity matrix implemented in this package. The use of a less dense mesh reduces the computational time and computational resource requirements.

The results of testing were used to assign FEM parameters to specimen 1. The results of numerical calculations of specimen 1 subjected to the total load of 48 kN are shown in Table 2.

The experimentally determined displacement of the loading device during the testing of specimen 1 was 0.4 mm, which is noticeably greater than the calculated one. This difference was caused by deformations of the bolted connection and the loading device. In the course of testing, deformations of the specimen occurred in the area of the steel sheet outside the concrete prior to its failure. According to the numerical calculation, the elongation of the sheet along its centerline outside the concrete reached:

$$0.12 - 0.019 = 0.101 \text{ mm},$$

where 0.019 mm is the calculated displacement of the specimen at the point of contact between the sheet and concrete.

The analytical calculation showed that this elongation is equal to:

$$53.3 \cdot 420 / 206,000 = 0.109 \text{ mm},$$

where 420 mm is the length of the free area of the sheet; 206,000 MPa is the modulus of elasticity of steel.

Thus, the analytical elongation of the plate correlates well with the numerical solution, exceeding the numerical value by 7 %.

It should be noted that normal stresses in the steel plate outside of its embedding in the concrete coincide completely with the applied distributed load of 53.33 MPa. Tangential stresses acting in the vertical direction are unevenly distributed along the length of the steel plate embedded in concrete. The deeper in concrete, the lower the tangential stresses. Maximum tangential stresses differ markedly from average experimental stresses. However, according to numerical calculations, maximum tangential stresses are observed at a length of no more than 1/10th of the total embedment of the sheet in concrete. To clarify the distribution of tangential stresses along the length of the sheet, additional numerical studies should be conducted, taking into account the physical nonlinearity of the material and the features of the contact interaction between the steel plate and concrete.

Table 1. Comparison of theoretical and numerical data

Calculation method	Deflection, mm		Momentum and normal stresses		
	mm	%	kN m/m	kN/m ²	%
Theory	0.567	100	1.724	459.8	100
Lira-SAPR 3D $1 \times 120 \times 120$	0.465	82	—	—	—
Lira-SAPR 3D $2 \times 120 \times 120$	0.539	95	1.626	433.6	94
Lira-SAPR 3D $4 \times 120 \times 120$	0.561	99	1.695	452.0	98
Nastran 3D $1 \times 20 \times 20$	0.337	59	1.066	284.3	62
Nastran 3D $2 \times 80 \times 80$	0.564	99	1.728	460.7	100
Nastran 3D $4 \times 80 \times 80$	0.564	99	1.732	461.8	100

Table 2. Numerical results

Finite element model	Displacement of the plate, mm	Normal stresses in the steel plate, MPa	Tangential stresses along the steel plate axis in the vertical direction, MPa
LIRA-SAPR 3D $17 \times 40 \times 70$	0.120	53.3	0.0058 to 1.799
LIRA-SAPR 3D $31 \times 80 \times 140$	0.120	53.3	0.0038 to 2.596
Nastran 3D $15 \times 40 \times 70$	0.120	53.4	0.0072 to 0.584

To verify the FEM of a steel-reinforced concrete slab with steel bent beams partially embedded in a reinforced concrete slab, tests of the full-scale structure are supposed to be conducted. The experimental data compared with the results of numerical calculations will help to design the finite-element models and parameters of the numerical calculation.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The following conclusions can be made on the basis of the research:

- the steel — concrete slab having the span of 6–8 m, bent galvanized sections, partially embedded

in the reinforced concrete slab that is 90 mm thick was designed;

- the shear strength of the connected galvanized steel plate, embedded in concrete, was experimentally determined. It ranged from 0.248 to 0.415 MPa, depending on the preparation of the surface of steel, embedded in concrete;

- numerical models were developed with the help of different computational packages; these models were designated for the calculation of a steel — concrete slab;

- actions were designed to improve the finite-element models using the numerical calculation methods that would take into account the experimental data obtained during the testing of the full-scale structure.

REFERENCES

1. Babalich V.S., Androsov E.N. Steel-reinforced concrete structures and the prospect of their application in the construction practice of Russia. *Successes of Modern Science*. 2017; 4(4):205-208. (rus.).
2. Kibireva I.A., Astafeva N.S. The use of steel-concrete structures. *Ecology and Construction*. 2018; 2:27-34. DOI: 10.24411/2413-8452-2018-10004 (rus.).
3. Kanchanadevi A., Ramanjaneyulu K., Gandhi P. Shear resistance of embedded connection of composite girder with corrugated steel web. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021; 187:106994. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106994
4. Alkhimenko A.I., Vatin N.I., Rybakov V.A. *Technology of light steel thin-walled structures*. St. Petersburg, SPbODZPP Publishing House, 2008; 26. (rus.).
5. Teplova Z.S., Vinogradova N.A. Strengthening studies of composite construction at the direct compression. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015; 5(32):29-38. (rus.).
6. Rostov G.N. Improvement of methods of calculation of flexible studs in steel iron concrete bridge structures. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2007; 3(12):79-87. (rus.).
7. Krylov S.B., Semenov V.A., Konin D.V., Krylov A.S., Rozhkov L.S. On the new “Manual on design of composite steel and concrete structures (in Elaboration of formulary SP 266.13330.2016 “Composite Steel and Concrete Structures. Design Rules”)”. *Academia. Architecture and Construction*. 2019; 1:99-106. DOI: 10.22337/2077-9038-2019-1-99-106 (rus.).
8. Suwaed A.S.H., Karavasilis T.L. Demountable steel-concrete composite beam with full-interaction and low degree of shear connection. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020; 171:106152. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106152
9. Colajanni P., Mendola L.L., Monaco A. Review of push-out and shear response of hybrid steel-trussed concrete beams. *Buildings*. 2018; 8(10):134. DOI: 10.3390/buildings8100134
10. Rybakov V.A. Modern methods for calculating metal structures from thin-walled profiles. *Stroy-metall*. 2007; 2(2):36-38. (rus.).
11. Hsu C.T.T., Punurai S., Punurai W., Majdi Y. New composite beams having cold-formed steel joists and concrete slab. *Engineering Structures*. 2014; 71:187-200. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.04.011
12. Ahmed I.M., Tsavdaridis K.D. The evolution of composite flooring systems: applications, testing, modelling and Eurocode design approaches. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 155:286-300. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.01.007
13. Panova A.S., Sergeev E.I. Features of calculation of steel-concrete constructions. *Scientific Look into the Future*. 2019; 1(14):72-75. DOI: 10.30888/24157538.2019-14-01-005 (rus.).
14. Reginato L.H., Tamayo J.L.P., Morsch I.B. Finite element study of effective width in steel-concrete

composite beams under long-term service loads. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2018; 15(8). DOI: 10.1590/1679-78254599

15. Tamayo J.L.P., Franco M.I., Morsch I.B., Désir J.M., Wayar A.M.M. Some aspects of numerical modeling of steel-concrete composite beams with pre-stressed tendons. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2019; 16(7). DOI: 10.1590/1679-78255599

16. Alsharari F., El-Zohairy A., Salim H., El-Sisi A.E. Numerical investigation of the monotonic behavior of strengthened Steel-Concrete composite girders. *Engineering Structures*. 2021; 246:113081. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113081

17. Jurkiewicz B., Braymand S. Experimental study of a pre-cracked steel-concrete composite beam. *Journal of Constructional Steel Research*. 2007; 63(1):135-144. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.03.013

18. Akhramochkina T.I. Theoretical and experimental studies of steel-reinforced concrete structures that have bent steel sections. *Construction: Science and Education*. 2021; 11(4):27-40. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.4.3 (rus.).

19. Birger I.A., Panovko Ya.G. *Strength, stability, fluctuations*. Handbook in 3 volumes. Vol. 1. Moscow, Mashinostroenie, 1968. 831. (rus.).

Received March 18, 2022.

Adopted in revised form on March 29, 2022.

Approved for publication on March 29, 2022.

B I O N O T E S: **Alexander R. Tusnin** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Metal and Wooden Structures, Vice-Rector; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 455914, Scopus: 6507367654, ORCID: 0000-0002-9997-9436; TusninAR@mgsu.ru.