Строительные конструкции

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-12>

УДК 624.016

Н.А. Виноградова, Г.А. Шве́ц

ВИНОГРАДОВА НАТАЛЬЯ АНАТОЛЬЕВНА – аспирант, AuthorID: 796595, SPIN: 2995-4569, e-mail: natasha-vinograd@mail.ru

ШВЕЦ ГЕОРГИЙ АНДРЕЕВИЧ – аспирант, AuthorID: 889264, SPIN: 4521-1888, e-mail: renegat51rus@mail.ru

Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства,
Инженерно-строительный институт
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251

Исследования сталежелезобетонных изгибаемых конструкций (обзор)

Аннотация: Статья посвящена сталежелезобетонным изгибаемым конструкциям. Их основная особенность – эффективное сочетание свойств стали и бетона, однако в России такие конструкции получили крайне ограниченное распространение. Представлен авторский обзор развития экспериментальных и теоретических исследований данного вида конструктивных элементов. Сделаны выводы об эффективности работы подверженных изгибу конструкций из сталежелезобетона, а также о необходимости развития методов их расчета. Для этого необходимы натурные и численные эксперименты, которые планируют провести авторы данной статьи.

Ключевые слова: сталежелезобетонные конструкции, изгибаемые конструкции, обзор исследований.

Введение

Сталежелезобетонные конструкции – широкое понятие, включающее различные элементы зданий и сооружений, в которых совместная работа стали и железобетона используется в неодинаковой степени [3, 4, 7, 10, 11]. Сталежелезобетон – эффективный материал за счет использования важного принципа проектирования – совмещения функций различных конструктивных материалов (железобетона и стали) [20]. В последние годы наметилась тенденция к расширению его применения в отечественной строительной практике, что актуализирует исследования в части развития конструкций и методик расчета.

В предлагаемой статье мы сделали попытку обобщить существующие экспериментальные и теоретические исследования изгибаемых сталежелезобетонных конструкций, проанализировать теорию и практику их применения.

Совершенствование отдельных элементов зданий и сооружений – общемировая тенденция, продиктованная необходимостью снижения трудозатрат и сроков строительства [20]. В качестве подтверждающего примера можно привести железобетонные перекрытия по стальному профилированному настилу, которые получили широкое применение за рубежом в последние годы. Данное решение позволяет использовать стальной настил в качестве несъемной опалубки, а также площадки для передвижения рабочих.

© Виноградова Н.А., Шве́ц Г.А., 2020

О статье: поступила: 20.12.2019; финансирование: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

Обзор различных типов сталежелезобетонных изгибаемых конструкций

В настоящее время совершенствование конструктивных элементов из стали или железобетона невыгодно с точки зрения экономии материала [1].

В изгибаемых конструкциях из мономатериалов существуют явные противоречия [1]:

- железобетон неэффективен при работе на растяжение и имеет большой вес;
- более половины стали в конструкциях используется неэффективно.

Данных противоречий можно избежать в сталежелезобетоне за счет использования сильных и компенсации слабых сторон каждого материала. В перекрытиях такой способ позволяет достигнуть следующих результатов:

- экономия бетона до 30%, стали – примерно 30–50%;
- увеличение жесткости в горизонтальной и вертикальной плоскостях, позволяющее снизить высоту и вес перекрытия;
- экономия средств за счет отсутствия необходимости в строительных лесах и опалубке (их функции выполняет стальной настил);
- упрощение укладки бетона посредством исключения многорядности арматуры (вместо нижнего ряда – профнастил);
- возможность использования в каркасах с нестандартным шагом колонн;
- при замене деревянных конструкций не требуется демонтаж кровли здания.

Замена в высотных зданиях стального каркаса на сталежелезобетонный позволяет при сохранении темпов строительства получить существенную экономию металла [10].

Подобный подход был использован в 110-этажном здании Willis Tower в Чикаго. В нем были запроектированы сталежелезобетонные перекрытия толщиной 127 мм (толщина стального профиля 1 мм), опирающиеся на фермы с шагом 4,5 м и рассчитанные на нагрузку более 390 кгс/м² [13].

В России сталежелезобетон применяется в первую очередь в составе многопролетных и мостовых сооружений, водоводов и трубопроводов гидроэлектростанций, теплотрасс и виадуков. Реже – при строительстве высотных зданий, таких как «Лахта-центр» в Санкт-Петербурге (использованы сталежелезобетонные колонны и перекрытия) [9].

Единой классификации конструкций из сталежелезобетона в настоящее время не существует. Как правило, их разделяют на [4, 8, 15, 16]:

- монолитные сталежелезобетонные перекрытия с использованием стального профилированного настила (СПН) в качестве несъемной опалубки;
- железобетонные конструкции с жесткой арматурой;
- железобетонные конструкции с жесткой внешней арматурой;
- сталежелезобетонные решетчатые конструкции;
- сталежелезобетонные перекрытия по балкам.

Монолитные сталежелезобетонные перекрытия с использованием стального профилированного настила (СПН) в качестве несъемной опалубки

Применение данного типа конструкций в строительстве началось в 1940–1950 годах, когда лист несъемной опалубки начали объединять с железобетонной плитой специальными связями с целью обеспечения их совместной работы [4].

Связи необходимы, поскольку естественной силы сцепления между сталью и железобетоном недостаточно для их работы под нагрузкой как единого нераздельного элемента. Существует несколько видов связей, и в перекрытии могут использоваться как один, так и несколько их видов одновременно:

- 1) механическая связь сдвига, обеспечиваемая наличием выштамповок в профиле (вмятины или выпуклости);

2) фрикционная связь сдвига при использовании профилей с гофрами закрытого типа;
3) концевая анкеровка, обеспечиваемая приваркой стержневых анкеров или другими типами локальных соединений стального листа с бетоном, только в сочетании с пунктами 1 или 2;

4) концевая анкеровка, обеспечиваемая деформацией гофров на концах профилированного листа, только в сочетании с пунктом 2.

Железобетонные конструкции с жесткой арматурой

В нашей стране данный вид сталежелезобетонных элементов получил большое распространение в 1970–1980 годах, и в 1978 г. НИИЖБ Госстроя СССР разработал руководство по проектированию железобетонных конструкций с жесткой арматурой. Зачастую такие конструкции используются в качестве колонн, работающих на центральное и внецентренное сжатие, растяжение, реже – как ригели – изгибаемые элементы [15].

Железобетонные конструкции с жесткой внешней арматурой

Снижение высоты балок и ригелей каркасов зданий имеет положительный функциональный, экономический и эстетический эффекты [15]. Предпочтительным способом снижения высоты балок является применение внешнего жесткого армирования. Такая арматура может быть как листовой, так и профильной и прилегать к разным частям сечения [15].

Сдвигающие усилия, возникающие на границе сталь–бетон при изгибе, компенсируются специальными связями.

Сталежелезобетонные решетчатые конструкции

Представляют собой пространственные фермы, в которых растянутые элементы выполняются из стали, а сжатые – из железобетона [8]. Это приводит к повышению жесткости, что позволяет снизить высоту ферм и уменьшить тем самым объем здания [1, 14].

Сталежелезобетонные перекрытия по балкам

Образуются при совместной работе стальных балок различного сечения и сборного, сборно-монолитного или монолитного железобетонного настила.

Совместная работа балки и плиты достигается за счет размещения верхней части первой в пределах второй или посредством устройства специальных связей [8].

Отдельно можно выделить сборно-монолитные перекрытия, состоящие из сталежелезобетонных балок, легкобетонных блоков и монолитного бетона [6, 8].

Развитие сталежелезобетонных конструкций

В конце XIX в. совмещение в одном элементе двух основных конструктивных материалов – стали и железобетона производилось с целью компенсации отрицательных и усиления положительных свойств обоих материалов [4]. Отмечено, что облицованные бетоном стальные балки (для увеличения огнестойкости) обладают большей несущей способностью и жесткостью. Данный факт был подтвержден экспериментальными исследованиями, проводившимися в Англии в 1923 г. [8].

Старейшим видом железобетонных перекрытий являются выполненные по решению, разработанному Монье: плиты, проложенные по металлическим балкам. Но в 1892 г. они были вытеснены ребристыми перекрытиями Геннебика.

Обеспечение совместной работы железобетонной и металлической частей конструкции является важным вопросом. Специальные связи, устраиваемые для решения этой задачи, должны воспринимать сдвигающие и отрывающие усилия от силовых и температурных воздействий, от деформаций ползучести и усадки бетона [11].

Впервые подобные связи широко начали применяться в балках системы «Альфа», разработанных в Швейцарии в 1939–1940 гг. Они представляли собой спираль, расположенную в бетонной плите и приваренную одной стороной к стальной балке [8].

Однако подобное решение оказалось трудоемким с точки зрения монтажа и было вытеснено другими видами связей: наклонными и вертикальными анкерами, арматурными отгибами, хомутами и зигзагами [8].

За рубежом с конца 1950-х годов основным средством сцепления железобетона и стальной части являлись стабболты (калиброванный стержень, приваренный одним концом к верхнему поясу балки) [4, 9]. В то же время в России в основном применяли жесткие упоры, сочетаемые, как правило, с вертикальными и наклонными анкерами [8]. В 1960-х годах для соединения стали и железобетона начали применять петлевые анкера.

Таким образом, можно говорить о распространении мировой тенденции разработок новых конструктивных вариантов, объединяющих бетон и сталь с целью повышения эффективности их совместной работы, начиная с конца XIX в. и на протяжении всего XX в.

Экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций

Напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкций, в том числе из сталежелезобетона, оценивается с помощью численных (аналитических) и натурных экспериментов. При этом первые являются малозатратными, а вторые позволяют получать наиболее достоверные сведения об объекте исследования в реальных условиях эксплуатации [9].

Одним из первых примеров экспериментального исследования сталежелезобетонных конструкций являются исследования Маккея в 1923 г., посвященные металлическим балкам с заделанной в бетон верхней частью. В результате была отмечена эффективность данного конструктивного решения. В этот период расчет балок из сталежелезобетона осуществлялся по рекомендации Кауфи (1929 г.), предполагавшей трансформацию бетона в сечении в эквивалентную площадь стали [8].

В 1943 г. швейцарские исследователи испытали 2 сталежелезобетонные балки с пролетом 4 м. По итогу эксперимента сделан вывод о больших запасах несущей способности и получен разрушающий изгибающий момент для проведения расчетов в соответствии с теорией предельного равновесия [4].

Первое руководство по проектированию конструкций из сталежелезобетона разработано в США в 1963 г. на основе ранее проведенных экспериментальных исследований. Оно посвящено стальным балкам, облицованным бетоном, а также перекрытиям, состоящим из стальных ригелей с железобетонной плитой поверху [4].

Несъемная опалубка в виде профилированного стального листа в перекрытиях начала применяться в 1979 г. [4].

В СССР массовый выпуск подобной опалубки начат в 1982 г. в Челябинске. К 1991 г. более 100 тыс. м² перекрытий было выполнено с ее применением [4].

Вопрос возникающих под воздействием нагрузки сдвиговых усилий на границе бетон–сталь и их влияние на несущую способность сталежелезобетонных конструкций стал одним из важнейших в экспериментальных исследованиях [4]. Так, Б.П. Марков показал, что сила сцепления железобетонной плиты и металлических балок в 3 раза выше при использовании анкеров и упоров, нежели чем без них [8].

В 1950–1960-х годах в Московском автомобильно-дорожном государственном техническом университете и Научно-исследовательском институте транспортного строительства проводились исследования по выявлению оптимальной длины и угла наклона анкеров. Они составили 10d и 35–45° соответственно. Значительно позже, в 2010 г., в Харьковском национальном автомобильно-дорожном университете экспериментально установлено, что для сталежелезобетонных балок с различными типами анкеров (петлевые, стержневые и уголкового) наиболее надежными связями на сдвиг обладают петлевые наклонные анкера.

В 2011 г. Р. Соти и Х. Шима из Технологического университета Кочи (Япония) провели интересный эксперимент: в составе изгибаемой балки испытывались L-образные стальные анкера, находящиеся под воздействием усилия распора. В результате предложено уравне-

ние, прогнозирующее усилие сдвига, при котором происходит разрушение балки по наклонной трещине (рис. 1) [30].

Рис. 1. Испытания L-образных анкеров [30].

В Словакии на протяжении последних 120 лет в конструкциях автомобильных и железнодорожных мостов применялись железобетонные балки, усиленные элементами двутаврового сечения, что предусмотрено Еврокодом 4. Однако сталь в данных конструкциях используется неэффективно ввиду близкого расположения верхней полки двутавра к нейтральной оси. В Техническом университете г. Кошица в 2012 г. эксперимент с балками с новыми стальными конструкциями усиления позволил установить, что прочность испытанных балок оказалась в среднем на 15% больше полученной по расчету, при этом сталь использовалась на 40% более эффективно по сравнению с конструкциями старого типа (рис. 2) [27].

**Рис. 2. Арматура сталежелезобетонной балки
Технического университета в Кошице [27]**

В последние годы в зарубежной строительной практике большое распространение получили перекрытия *SlimFloor* (плоское перекрытие), представляющие сборно-монолитную конструкцию, усиленную сталежелезобетонными балками (рис. 3). Испытания перекрытий данного типа показали, что, как правило, их разрушение происходит в связи с потерей связи между балкой и остальным перекрытием. Е. Дериша, М. Левински и П.П. Вех (Польша) разработали горизонтальный анкер, соединяющий балку и бетонные плиты перекрытия, они провели экспериментальное исследование конструкции с его применением: предельный прогиб составил 22,5 мм, а прогиб, полученный по расчету, – 35,7 мм. Этот результат свидетельствует о недооценке методами расчета дополнительной жесткости, получаемой посредством анкерования (рис. 4) [23].

В ходе натурных испытаний балочных изгибаемых элементов с внешним листовым армированием в Белорусско-Российском университете (2016 г.) изготовлено и испытано три серии образцов, включающих 18 балок. Тестовая серия состояла из 8 балок с использованием

Рис. 5. Сталежелезобетонная конструкция с упрочняющими элементами:
1 – стальной лист; 2 – упрочняющий элемент; 3 – продольная арматура;
4 – поперечная арматура; 5 – бетон [12].

119

В процессе испытания элемента, состоящего из стального профилированного листа с уложенным поверх него легким бетоном с древесной стружкой (Люксембург), замена обычного бетона на легкий позволила снизить собственный вес конструкции на 50% при снижении несущей способности на 20%. При этом включение металлического профиля увеличило вес на 7%, а несущую способность – в 4 раза. Образец показал хорошую совместную работу двух его составных частей, о чем свидетельствуют деформации стали и бетона в области связей в процессе нагружения (рис. 6) [31].

Рис. 6. Деформации бетона и стального листа [31].

В 2018 г. в университете Нового Южного Уэльса 348 дней длились испытания образцов железобетонных перекрытий по стальному профилированному настилу пролетом 3,35 и шириной 1,2 м. Исследовались явления усадки и ползучести, так как стальной настил препятствует испарению влаги на поверхности бетона, к которой он прилегает, что приводит к неравномерности деформаций. Две серии образцов были подвержены действию нагрузок, равных 3 и 6 кПа, в то время как третья оставалась незагруженной (рис. 7). Полученные деформации показали хорошую сходимость со значениями теоретического расчета по методике, предложенной авторами эксперимента [25].

Рис. 7. Три серии образцов сталежелезобетонных перекрытий [25]

Испытания мелкомасштабных образцов – менее дорогостоящая и трудоемкая альтернатива стандартным экспериментам, поэтому чешские исследователи занимаются совершенствованием методики и разработкой установки для их проведения. С этой целью они провели ряд мелкомасштабных (рис. 8) и соответствующих Еврокоду 4 испытаний частей сталежеле-

зобетонных перекрытий на сдвиг. Результаты экспериментов были использованы при создании и уточнении численной модели в программном комплексе *GiD*. Авторы рассматриваемой работы планируют дальнейшие исследования в данной области [26].

Рис. 8. Мелкомасштабное испытание на сдвиг [26].

В 2016 г. в этой стране исследовали анкерные связи двух видов: L-образные и группу небольших стабболтов. По результатам испытаний образцов на сдвиг было обнаружено, что при использовании L-образных связей слабой частью является бетон, разрушающийся при достижении предельных напряжений, а в стабболтах – сварные швы (рис. 9). Таким образом, второй вид анкеров был отмечен как более подходящий для использования, так как он не приводит к значительным повреждениям ни стального, ни бетонного элементов [22].

Рис. 9. Результаты испытаний L-образных связей и стабболтов [22]

О локальности деформаций вокруг стабболтов сделали вывод и новозеландские исследователи. В процессе проведенных ими сдвиговых испытаний все пять балок разрушились, расколовшись вдоль линии анкеровки (рис. 10) [28].

Таким образом, результатами экспериментальных исследований была подтверждена эффективность устройств, обеспечивающих совместную работу железобетонной и стальной частей сталежелезобетонных изгибаемых конструкций, что обуславливает их надежность и долговечность.

Рис. 10. Схема испытаний на сдвиг [28].

Методы расчета сталежелезобетонных конструкций

При расчете сталежелезобетонных элементов предполагают полное отсутствие деформаций сдвига на их стыке, что фактически невозможно, так как любая связь допускает скольжение двух материалов друг относительно друга в той или иной степени. Тем не менее подобное пренебрежение необходимо для того, чтобы продольные деформации распределялись линейно по всей высоте сечения с целью возможности использования гипотезы плоских сечений [8].

Ранние сталежелезобетонные конструкции рассчитывались, исходя из предположения об упругой работе бетона и стали, при этом модуль упругости первого под постоянными нагрузками снижался с целью учета ползучести. Метод расчета по предельному равновесию в отношении сталежелезобетона не получил широкого распространения. С 1960-х годов начали применять метод, принципы которого до сих пор сохраняются в проектировании мостов. Он предполагает возможность развития быстротечных пластических деформаций бетона в предельном состоянии, а также ограниченно – в стальной части сечения [4].

Стоит упомянуть, что на фоне широкого применения сталежелезобетонных перекрытий при строительстве высотных зданий в мировой практике в России сталежелезобетонные конструкции используются весьма узконаправленно, в основном в мостовом строительстве. Это связано с тем, что на протяжении значительного времени сталежелезобетонные конструкции были недостаточно изучены и, как следствие, отсутствовали соответствующие нормативные документы по их расчету и проектированию, подобные европейскому стандарту Еврокод 4 «Проектирование сталежелезобетонных конструкций» [10, 24]. В России долгое время основными действующими документами оставались: «Руководство по проектированию железобетонных конструкций с жесткой арматурой» (1978 г.) и «Рекомендации по проектированию монолитных железобетонных перекрытий со стальным профилированным настилом» (1987 г.) [10]. При этом в расчете по Руководству 1978 г. была принята фиксированная длина проекции наклонной трещины, что приводило к недооценке фактической несущей способности наклонных сечений по поперечной силе [21].

Тенденция расширения применения сталежелезобетонных конструкций в отечественной строительной практике, наметившаяся в последние годы, актуализировала их экспериментальные и теоретические исследования [2]. Так, разработаны рекомендации по проектированию перекрытий по стальному профилированному настилу (СТО-047-20053) на основе исследований профилей с выштамповками, выпуск которых начала российская металлургическая промышленность [3].

В 2015 г. под руководством академика РААСН В.И. Травуша сотрудниками ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко и НИИЖБ им. А.А. Гвоздева разработан СТО АРСС «Сталежелезобетонные конструкции. Правила проектирования» [19].

До 2017 г. расчет сталежелезобетонных конструкций производился в соответствии с СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» [5, 17]. Наконец, с 1 июля 2017 г. вступил в силу СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования» [18], раз-

работанный Ассоциацией развития стального строительства. Это первый в России нормативный документ, область применения которого – проектирование сталежелезобетонных конструкций в промышленном и гражданском строительстве [2]. Этот нормативный документ создан на основе СТО АРСС «Сталежелезобетонные конструкции. Правила проектирования» и в некоторой степени дублирует положения расчета, предлагаемые в СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» [5, 17]. Он имеет четко ограниченную область применения, не включающую в себя все виды изгибаемых конструкций из сталежелезобетона.

Согласно российским и европейским рекомендациям, расчет сталежелезобетонных элементов выполняется для двух стадий работы: возведение и эксплуатация (здесь и далее см. [3]). Для перекрытий с несъемной стальной опалубкой на стадии возведения несущей конструкцией является профилированный настил, который работает как тонкостенный изгибаемый элемент под воздействием нагрузки от собственного веса и веса свежееуложенного бетона, а также временной нагрузки строительного периода (от монтажного оборудования и людей).

Во время эксплуатации нагрузку несет уже железобетонная плита, при этом стальной лист играет в ней роль рабочей арматуры. Нагрузка – полная расчетная.

Для решения вопроса о сопротивлении горизонтальному сдвигу по требованию российских рекомендаций необходимо обеспечить анкерровку профилированного настила в месте наибольшего изгибающего момента и в четверти пролета с помощью вертикальных анкеров, приваренных к опорам плиты, с выштампованными анкерующими рифами. Расчеты связей против сдвига профилированного настила в российских рекомендациях сильно не отличаются от европейских, но для выполнения расчетов необходимо применить коэффициент условий работы, который для настилов принят равным 0,8. Для обеспечения анкерровки в гофрах следует принять анкерные штыри по одному в каждом.

По рекомендации Еврокода расчеты продольного сдвига основаны на методе $m-k$ и методе частичного объединения, сформированных по результатам испытаний и обработки опытов, в которых варьируется расстояние от опоры до точки приложения сосредоточенной силы, создающей горизонтальный сдвиг.

Еврокод 4 контролирует вертикальный и продольный сдвиги, являющиеся ортогональными компонентами усилий в наклонных сечениях. Руководство НИИЖБ и СТО-047 контролируют прочность сжатого бетона и прочность наклонного сечения. Руководство НИИЖБ и СТО-047, кроме того, контролируют прочность анкерровки (сцепление профнастила с бетоном плиты) в середине и в четверти ее пролета.

Мы полагаем, что различие применяемых в Еврокоде 4 и отечественных нормах методов оценки несущей способности и пригодности к нормальной эксплуатации требует внимательного отношения к получаемым результатам.

Заключение

В результате проведенного обзора стало возможным выделить существующие проблемные вопросы в изучении сталежелезобетонных конструкций и, соответственно, направления перспективных исследований.

Один из наиболее важных и часто рассматриваемых вопросов – обеспечение надежной связи железобетонной и стальной частей сечения. Прослеживается необходимость поиска новых конструктивных элементов, усиливающих их совместную работу. В данном направлении авторами планируются экспериментальные и теоретические исследования сборно-монолитных перекрытий с балками, усиленными стальными листами. При этом балки будут испытываться с различной анкерровкой листа и без нее. По итогу этой работы станет возможным оценить эффективность как всей конструкции перекрытия в целом, так и отдельных видов связей между сталью и бетоном.

Как правило, сталежелезобетонные элементы имеют довольно высокую степень заводской готовности, что облегчает строительно-монтажные работы по их устройству. Готовые части конструкций служат в качестве опалубки и подмостей, воспринимая монтажные нагрузки. В соответствии с действующими нормами данный этап работы учитывается в расчетах. Таким образом, объектом исследования могут стать сборные части сталежелезобетонных конструкций с целью оптимизации работы под нагрузками строительного периода.

Исследования показывают, что внешнее жесткое армирование является эффективным. В то же время сталь, лишенная защитного слоя из бетона, в значительно большей степени подвержена воздействиям влаги и температуры. В связи с этим огнестойкость и коррозионная стойкость конструкций из сталежелезобетона с внешним армированием является актуальным направлением научной работы.

Бетон подвержен таким явлениям, как усадка и ползучесть. Листы жесткого внешнего армирования препятствуют испарению влаги с поверхности молодого бетона. Это приводит к неравномерности деформаций и образованию трещин. Данная проблема является малоизученной ввиду большой трудоемкости и длительности опытов по изучению усадки и ползучести строительных конструкций.

Широкое распространение в строительной практике получили системы автоматизированного проектирования. Однако моделирование сталежелезобетонных конструкций ограничивается недостатком теоретических данных об их реальной работе. Мы предполагаем, что одним из результатов исследования сборно-монолитных перекрытий с балками, усиленными стальным листом, которое мы планируем провести, станут корректирующие коэффициенты, учитывающие проскальзывание стали относительно бетона и необходимые для внедрения в специализированные программные комплексы и нормативные документы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абовская С.Н., Сергуничева Е.М., Куликов М.Е. Полносборные большепролетные здания и сооружения из унифицированных сталежелезобетонных элементов / Красноярск: Красноярская государственная архитектурно-строительная академия, 2002. 134 с.
2. Акбиров А.А. Применение сталежелезобетонных конструкций в отечественной и зарубежной строительной практике. Проблемы, которые могут возникнуть при производстве судебных строительно-технических экспертиз зданий, конструкции которых выполнены из сталежелезобетона // Аллея Науки. 2018. № 19. URL: https://alley-science.ru/domains_data/files/-15March18/PRIMENENIE%20STALEZHFELEZOBET-ONNYH%20KONSTRUKCIY.pdf (дата обращения: 21.01.2020).
3. Алмазов В.О., Арутюнян С.Н. Проектирование сталежелезобетонных плит перекрытий по Еврокоду 4 и российским рекомендациям // Вестник МГСУ. 2015. № 8. С. 51–65.
4. Балувев В.Ю., Алехин В.Н. Автоматизированное оптимальное проектирование сталежелезобетонных перекрытий зданий со стальным каркасом / УГТУ–УПИ. М.: ВИНТИ, 2004. 9 с.
5. Будюшкина К.А., Кузнецов В.С., Мурлышева Ю.А., Улямаев А.С., Шапошникова Ю.А. Анализ работы комбинированных балок в широком диапазоне нагрузок // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4925> (дата обращения 21.01.2020).
6. Ватин Н.И., Величкин В.З., Козинец Г.Л., Корсун В.И., Рыбаков В.А., Жувак О.В. Технология сборно-монолитных балочных железобетонных перекрытий с керамзитобетонными блоками // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 7(70). С. 43–59.
7. Глазунов Ю.В. Техничко-экономические исследования и область применения сталежелезобетонных конструкций // Коммунальное хозяйство городов. 2008. № 80. С. 89–94.
8. Замалиев Ф.С. Прочность и деформативность сталежелезобетонных изгибаемых конструкций гражданских зданий при различных видах нагружения: автор. дис. ... д-ра техн. наук. КГАСУ, 2013. 43 с.
9. Кибирева Ю.А., Астафьева Н.С. Применение конструкций из сталежелезобетона // Экология и строительство. 2018. № 2. С. 27–34.

10. Кудинов О.В. Новый подход к оценке прочности сталежелезобетонных перекрытий // Бетон и железобетон. 2010. № 2(563). С. 14–16.
11. Лыкова А.В., Абашева Л.П. Анализ способов объединения бетона и стали в сталежелезобетонных мостах // Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии. 2016. № 7. С. 86–91.
12. Медведев В.Н., Семенюк С.Д. Прочность и деформативность балочных изгибаемых элементов с внешним листовым армированием // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 3. С. 3–15.
13. Панарин Н.Я., Онуфриев Н.М., Воронков Р.В., Багатурия Ф.И. Монолитные перекрытия с профилированной листовой арматурой // Бетон и железобетон. 1975. № 1 (238). С. 26–27.
14. Рекомендации по проектированию, изготовлению и применению сталежелезобетонных ферм в сельскохозяйственном строительстве / под ред. С.Г. Шейна; Мосгипрониисельстрой. М.: Мосгипрониисельстрой, 1979. 103 с. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293792/42937-92408.pdf> (дата обращения: 21.01.2020).
15. Рекомендации по проектированию предварительно-напряженных ригелей с внешним армированием для гражданских каркасных зданий с укрупненной сеткой колонн / ЦНИИЭП учебных зданий. М.: Стройиздат, 1976. 71 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293793/42-93793794.pdf> (дата обращения: 21.01.2020).
16. Руководство по проектированию железобетонных конструкций с жесткой арматурой / под ред. Г.А. Жигачевой; НИИЖБ Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1978. 55 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293850/4293850413.pdf> (дата обращения: 21.01.2020).
17. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная версия СНиП 2.05.03-84* / М.: ОАО «ЦПП», 2011. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200084849> (дата обращения 21.01.2020).
18. СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. М.: Стандартинформ, 2017. 130 с.
19. Травуш В.И., Конин Д.В., Рожкова Л.С., Крылов А.С., Каприелов С.С., Чилин И.А., Мартиросян А.С., Фимкин А.И. Отечественный и зарубежный опыт исследований работы сталежелезобетонных конструкций на внецентренное сжатие // Строительство и реконструкция. 2016. № 5(67). С. 31–44.
20. Третьяков С.А., Шпагин В.Г. Сталежелезобетонные конструкции «на пролет» с безрулонной кровлей // Пространственные конструкции в Красноярском крае: межвузовский сборник. 1983. С. 58–61.
21. Филатов В.Б., Жильцов Ю.В. Особенности работы и эффективное использование жесткой поперечной арматуры железобетонных балок // Современные технологии в промышленности, строительстве и на транспорте. 2012. Т. 14, № 4(5). С. 1325–1328.
22. Bily P., Fladr J., Kohoutkova A. Behavior of anchorage areas in the steel-concrete composite structure loaded by longitudinal shear forces. *Procedia Engineering*. 2017;172:104–110.
23. Derysz J., Lewinski P.M., Wiech P.P. New concept of steel-reinforced concrete floor slab in the light of computation model and experimental research. *Procedia Engineering*. 2017;193:168–175.
24. EN 1994-1-1. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, CEN, 2004. (in Engl). URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1994.1.1.2004.pdf> – 21.01.2020.
25. Gholamhoseini A., Gilbert R.I., Bradford M. Long-Term Behavior of Continuous Composite Concrete Slabs with Steel Decking. *Aci Structural Journal*. 2018;115:439–449.
26. Holomek J., Bajer M. Experimental and Numerical Investigation of Composite Action of Steel Concrete Slab. *Steel Structures and Bridges*. 2012;40:143–147.
27. Kvocak V., Kozlejova V., Dubecky D. Analysis of encased steel beams with hollow cross-sections. *Procedia Engineering*. 2012;40:223–228.
28. Lowe D., Das R., Clifton C. Characterization of the splitting behavior of steel-concrete composite beams with shear stud connection. *Procedia Materials Science*. 2014;3:2174–2179.
29. Nadasky P. Steel-Concrete Composite Beams for Slim Floors – Specific Design Features in Scope of Steel Flames Design. *Procedia Engineering*. 2012;40:274–279.
30. Soty Ros, Shima Hiroshi Formulation for Maximum Shear Force on L-Shape Shear Connector Subjected to Strut Compressive Force at Splitting Crack Occurrence in Steel-Concrete Composite Structures. *Procedia Engineering*. 2011;14:2420–2428.
31. Waldmann D., May A., Thapa V.B. Influence of the sheet profile design on the composite action of slabs made of lightweight woodchip concrete. *Construction and Building Materials*. 2017;148: 887–899.

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-12>

Vinogradova N., Shvets G.

NATALYA VINOGRADOVA, Postgraduate, e-mail: natasha-vinograd@mail.ru

GEORGIY SHVETS, Postgraduate Student, e-mail: renegat51rus@mail.ru

Graduate School of Industrial Civil and Road Construction,

Institute of Civil Engineering

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, Russia, 195251

Studies of bending structures of composite steel and reinforced concrete (review)

Abstract: This article is dedicated to bending structures made of steel-reinforced concrete. Their main feature is the effective combination of steel and concrete properties; however, in Russia they have extremely limited usage. The authors reviewed the development of experimental and theoretical studies of this type of structural elements. Based on the materials studied, conclusions are drawn about the efficiency of bending steel-reinforced concrete structures, as well as the need to develop methods for calculating them through further field and numerical experiments.

Keywords: composite steel and concrete structures, bending structures, research overview.

REFERENCES

1. Abovskaya S.N. Steel-reinforced concrete structures (panels and buildings). KrasGASA, Krasnoyarsk, 2002, 134 p. URL: http://isi.sfu-kras.ru/sites/is.institute.sfu-kras.ru/files/S_ZH_B_konstrukcii_2001_0.0-2.4.pdf – 21.01.2020.
2. Akbirova A.A. The use of steel-reinforced concrete structures in domestic and foreign construction practice. Problems that may arise in the production of judicial construction and technical examinations of buildings whose structures are made of steel-reinforced concrete. Scientific and practical electronic journal Alley of Science. 2018(19). URL: https://alley-science.ru/domains_data/files/15March18/PRIMENENIE%20STALEZhELEZOBETONNYH%-20KONSTRUKCIY.pdf – 21.01.2020.
3. Almazov V.O., Harutyunyan S.N. Design of steel-reinforced concrete floor slabs according to Eurocode 4 and Russian recommendations. Vestnik MGSU. 2015;8:51–65.
4. Baluev V.Yu., Alekhin V.N. Automated optimal design of steel-reinforced concrete floors. Moscow, VINITI, 2004, 9 p.
5. Budoshkina K.A., Kuznetsov V.S., Murlisheva U.A., Uliamiev A.S., Shaposhnikova U.A. Analysis of the combined beams in a wide range of loads. Engineering Bulletin of the Don. 2018(2). URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4925> – 21.01.2020.
6. Vatin N.I., Velichkin V.Z., Kozinets G.L., Korsun V.I., Ribakov V.A., Juvak O.V. Technology of precast-monolithic beam reinforced concrete floors with expanded clay concrete blocks. Construction of unique Buildings and Structures. 2018(70):43–59.
7. Glazunov Yu.V. Technical and economic studies and the scope of steel-reinforced concrete structures. Communal Services of Cities. 2008(80):89–94.
8. Zamaliev F.S. Strength and deformability of steel-reinforced concrete flexible structures of civil buildings under various types of loading: dissertation abstract. KGASU, Kazan, 2013, 43 p.
9. Kibireva Yu.A., Astafyeva N.S. The use of steel-reinforced concrete structures. Ecology and Construction. 2018(2):27–34.

10. Kudinov O.V. A new approach to assessing the strength of steel-reinforced concrete floors. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2010(563):14–16.
11. Lykova A.V., Abasheva L.P. Analysis of methods for combining concrete and steel in steel-reinforced concrete bridges. *Construction and Architecture. Experience and Modern Technology*. 2016(7):86–91.
12. Medvedev V.N., Semeniuk S.D. Durability and deformability of braced bending elements with external sheet reinforcement. *Magazine of Civil Engineering*. 2016(3):3–15.
13. Panarin N.Ya., Onufriev N.M., Voronkov R.V., Bagaturia Ph.I. Monolithic floors with profiled sheet reinforcement. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1975(238):26–27.
14. Recommendations for the design, manufacture and use of steel-reinforced concrete farms in agricultural construction. Moscow, Mosgiproniisestroy, 1979, 103 p. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293792/4293792408.pdf> – 21.01.2020.
15. Recommendations on the design of prestressed crossbars with external reinforcement for civil frame buildings with an enlarged grid of columns. Moscow, Stroyizdat, 1976, 71 p. URL: <https://files.stro-yinf.ru/Data2/1/4293793/4293793794.pdf> – 21.01.2020.
16. Guidance on the design of reinforced concrete structures with rigid reinforcement. Moscow, Stroyizdat, 1978, 55 p. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293850/4293850413.pdf> – 21.01.2020.
17. SP 35.13330.2011. Bridges and pipes. Updated version of SNiP 2.05.03-84*, Moscow, 2011. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200084849> – 21.01.2020.
18. SP 266.1325800.2016. Steel-reinforced concrete structures. Design rules. M., Standartinform, 2017, 130 p.
19. Travush V.I., Konin D.V., Rozhkova L.S., Krilov A.S., Kaprielov S.S., Chilin I.A., Martirosian A.S., Fimkin A.I. Domestic and foreign experience in the study of steel-reinforced concrete structures for eccentric compression. *Construction and Reconstruction*. 2016(67): 31–44.
20. Tretyakov S.A., Shpagin V.G. Steel-and-concrete constructions “on the span” with a roll-free roof. *Spatial Structures in the Krasnoyarsk Territory: Interuniversity Collection*. 1983:58–61.
21. Filatov V.B., Zhiltsov Yu.V. Features of work and effective use of rigid transverse reinforcement of reinforced concrete beams. *Modern Technologies in Industry, Construction and Transport*. 2012;14(5):1325–1328.
22. Bily P., Fladr J., Kohoutkova A. Behavior of anchorage areas in the steel-concrete composite structure loaded by longitudinal shear forces. *Procedia Engineering*. 2017;172:104–110.
23. Derysz J., Lewinski P.M., Wiech P.P. New concept of steel-reinforced concrete floor slab in the light of computation model and experimental research. *Procedia Engineering*. 2017;193:168–175.
24. EN 1994-1-1. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, CEN, 2004. (in Engl). URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1994.1.1.2004.pdf> – 21.01.2020.
25. Gholamhoseini A., Gilbert R.I., Bradford M. Long-Term Behavior of Continuous Composite Concrete Slabs with Steel Decking. *Aci Structural Journal*. 2018;115:439–449.
26. Holomek J., Bajer M. Experimental and Numerical Investigation of Composite Action of Steel Concrete Slab. *Steel Structures and Bridges*. 2012;40:143–147.
27. Kvocak V., Kozlejova V., Dubecky D. Analysis of encased steel beams with hollow cross-sections. *Procedia Engineering*. 2012;40:223–228.
28. Lowe D., Das R., Clifton C. Characterization of the splitting behavior of steel-concrete composite beams with shear stud connection. *Procedia Materials Science*. 2014;3:2174–2179.
29. Nadasky P. Steel-Concrete Composite Beams for Slim Floors – Specific Design Features in Scope of Steel Flames Design. *Procedia Engineering*. 2012;40:274–279.
30. Soty Ros, Shima Hiroshi Formulation for Maximum Shear Force on L-Shape Shear Connector Subjected to Strut Compressive Force at Splitting Crack Occurrence in Steel-Concrete Composite Structures. *Procedia Engineering*. 2011;14:2420–2428.
31. Waldmann D., May A., Thapa V.B. Influence of the sheet profile design on the composite action of slabs made of lightweight woodchip concrete. *Construction and Building Materials*. 2017;148: 887–899.