

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2026, Том 13, № 2 / 2026, Vol. 13, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2026.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/01SATS226.pdf>

DOI: 10.15862/01SATS226 (<https://doi.org/10.15862/01SATS226>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Рыбаков, С. В. Экспериментальное исследование объединения в совместную работу композиционной главной балки и монолитной плиты ездового полотна автодорожных мостов / С. В. Рыбаков, А. А. Пискунов, М. Н. Ерофеев // Транспортные сооружения. — 2026. — Т. 13. — № 2. — URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/01SATS226.

For citation:

Rybakov S.V., Piskunov A.A., Erofeev M.N. An experimental study of the joint operation of a composite main beam and a monolithic plate of the roadway of road bridges. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2026;13(2): 01SATS226. Available at: <https://t-s.today/PDF/01SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/01SATS226. (In Russ., abstract in Eng.).

Авторы выражают благодарность директору научно-исследовательского центра «Тепло- и массообмен в строительстве» Кендюку Андрею Викторовичу и коллективу лаборатории кафедры «Строительная механика» — за содействие в организации и проведении эксперимента; ассистенту кафедры «Мосты» Галабурде Игорю Андреевичу и коллективу лаборатории кафедры «Мосты» — за помощь в подборе составов бетона и изготовлении опытного образца; ООО «УпорСпецМонтаж», генеральному директору Балинову Сергею Николаевичу и главному сварщику Шевцову Юрию Дмитриевичу — за предоставление упоров Нельсона и выполнение сварочных работ.

Работа выполнена в рамках выполнения гранта Министерства науки и высшего образования № 075-15-2024-559, АРКТИКА

УДК 624.21; 624.21.09; 624.21.016

Рыбаков Сергей Викторович

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия

Аспирант

E-mail: Rybakov.sv@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0810-7994>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1178306

Пискунов Александр Алексеевич

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия

Заведующий кафедрой «Мосты и тоннели»

Доктор технических наук, профессор

E-mail: a.piskunov52@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2606-9068>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=807388

Ерофеев Михаил Николаевич

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (МИИТ), Россия, Москва

Профессор кафедры «Мосты и тоннели»

Доктор технических наук, профессор

E-mail: kventr@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1048-3574>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=836604

Экспериментальное исследование объединения в совместную работу композиционной главной балки и монолитной плиты ездового полотна автодорожных мостов

Аннотация. В статье авторами представлены результаты экспериментального исследования узла объединения в совместную работу композиционной главной балки и монолитной плиты ездового полотна автодорожных мостов. Актуальность работы обусловлена необходимостью экспериментального обоснования предложенной аналитической методики расчета элементов узла объединения гибридного пролетного строения моста. Целью исследования являлись верификация расчетной методики и установление фактической несущей способности, деформативности и характера разрушения узла при статическом нагружении. В работе приведены сведения о конструкции опытного образца, материалах, процессе и порядке сборки, измерительной системе и программе испытаний. Рассмотрены технологические вопросы выбора сталей, свариваемости элементов, контакта поверхностей композита и элементов конструкции объединения, особенности размещения измерительного оборудования.

Программа эксперимента включала три фазы с непрерывной регистрацией вертикальных смещений и дискретной регистрацией поперечных смещений в шве объединения. Установлено, что основная часть начальных неупругих деформаций накапливалась в первых циклах первой и второй фаз, после чего работа узла стабилизировалась. Выделены три характеристических уровня нагрузки — расчетная нагрузка, нагрузка первого проскальзывания и разрушающая нагрузка. Показано, что предельное состояние определялось композитным материалом вне зоны упоров и развивалось постепенно, без катастрофического разрушения, при этом сами элементы объединения получили пластические деформации. Выполнено сопоставление результатов эксперимента с известными исследованиями, сделан вывод о работоспособности предложенной конструкции узла объединения и применимости расчетной методики. Сформулированы перспективы дальнейших исследований и совершенствования конструкции.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы; гибридные пролетные строения; соединительное устройство; упор пролетного строения; мосты из полимерно-композитных материалов; проблемы применения композитов; пролетное строение из полимерных композиционных материалов; экспериментальное обоснование; методика

Введение

В предшествующих работах выполнены обзор решений объединения в совместную работу композиционной главной балки и монолитной плиты [1], численное обоснование конструкции узла объединения, учитывающее местное смятие композита под шайбой и перераспределение контактных напряжений, разработка аналитической методики расчёта элементов узла при заданных усилиях сдвига, отрыва и свойствах полимерного композиционного материала (ПКМ) верхнего листа главной балки пролетного строения. Экспериментальное исследование необходимо для верификации принятых расчётных предпосылок и получения измеряемых характеристик соединения, определяющих степень совместной работы элементов и эффективность предложенного решения.

Целью исследования является экспериментальная верификация методики расчета объединения гибридного пролетного строения моста, а также установление фактической несущей способности и деформативности узла объединения при статическом нагружении.

Частные задачи исследования:

- Разработать конструкцию образца для проведения испытаний.
- Разработать программу испытаний, в том числе протокол нагружения.
- Обеспечить контролируемые свойства материалов на момент испытаний.
- Обеспечить измерение всех необходимых параметров работы соединения: продольное относительное смещение между плитой и композитом, поперечное раскрытие шва вблизи упоров.
- Получить экспериментальные диаграммы «нагрузка–вертикальное смещение», «нагрузка–раскрытие шва» как результат испытаний и определить по ним показатели работы соединения: нагрузку начала проскальзывания, разрушающую нагрузку и соответствующие им перемещения.
- Зафиксировать механизм разрушения и локализацию повреждений.
- Выполнить обработку полученных результатов и сделать выводы о применимости разработанной методики.

Основная часть

Краткий обзор существующих решений и подходов к испытаниям

Отечественные нормативные документы СП 35.13330.2011¹ и СП 266.1325800.2016² регламентируют расчёт и проектирование объединения в совместную работу для сталежелезобетона, однако не устанавливают стандартизированной методики экспериментальных испытаний сдвиговых соединений.

Известно, что испытания стандартных образцов на сдвиг (push-out) рассматриваются как один из экспериментальных методов определения несущей способности и деформативности узлов объединения. Нормируемые требования к схеме образца, протоколу нагружения и измерениям приведены в EN 1994-1-1³, Annex B.2, а в отечественной нормативной документации для угловых упоров — в ГОСТ Р 58336-2018.⁴

Для соединений типа «сталь-бетон» испытания push-out получили развитие как применительно к наиболее распространенным гибким штыревым упорам [2–4], так и для других типов объединения, включая угловые анкерные упоры [5], швеллерные упоры [6], упоры типа «perFOBOND rib» (перфорированные стальные пластины, работающие совместно с арматурным каркасом плиты проезда) [7] и упоры болтового типа [8].

Публикации, в которых экспериментально исследуется объединение полимерных композиционных материалов с бетоном, встречаются реже. Одной из них является работа M. Rajchel, M. Kulpa, T. Siwowski [9], в которой выполнены испытания узла объединения бетонной плиты с композитом и фиксацией зависимости «нагрузка–смещение» с помощью LVDT датчиков. Близкие по постановке исследования опубликованы в [10–13].

¹ СП 35.13330.2011 «СНиП 2.05.03-84* Мосты и трубы».

² СП 266.1325800.2016. Свод правил. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования.

³ EN 1994-1-1: «Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings».

⁴ ГОСТ Р 58336-2018 Упоры угловые анкерные. Методы испытаний.

Испытания типа «single shear pull-off» применяются для экспериментального определения параметров адгезионного (клеевого) соединения «ПКМ-бетон» [14].

Для более полного понимания работы гибридных пролетных строений проводятся испытания балок различных размеров на изгиб [13; 15; 16], что позволяет оценить реальную работу конструкции в совокупности всех её элементов, но не дает возможности отдельно анализировать свойства узла объединения, как в случае с push-out испытаниями.

Таким образом, наиболее обоснованным видом экспериментальных испытаний узла объединения для верификации предложенной методики является испытание стандартных образцов на сдвиг. Однако для соединений типа «ПКМ-бетон» в действующей нормативной документации отсутствуют как описание геометрии стандартного образца и армирования бетонной части, так и требования к протоколу нагружения, что не позволяет напрямую применять существующие решения, разработанные для сталежелезобетона и вынуждает авторов аналогичных исследований прибегать к различным вариациям конструкций. В связи с этим требуется разработка/адаптация конструкции экспериментального образца, который был бы технологичен, то есть изготавливался из доступных материалов, обеспечивал стабильную геометрию образца, разборность/переиспользуемость отдельных частей, а также простую и надежную установку средств измерения при серийных испытаниях.

Проектирование геометрии образца и выбор измерительной схемы выполнены с опорой на EN 1994-1-1, Annex B.2 и на упомянутые постановки испытаний соединений «ПКМ-бетон».

Конструкция образца

Индустриальной и технологичной в изготовлении формой полимерных композиционных материалов является плоский лист.

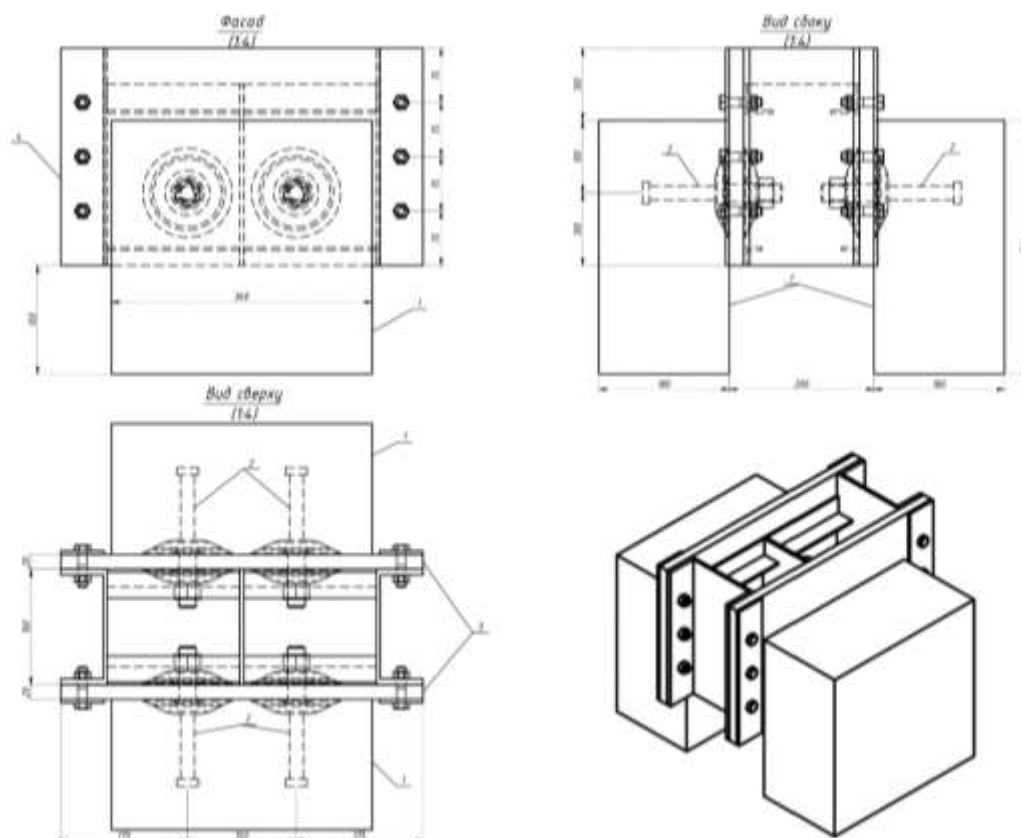


Рисунок 1. Конструкция экспериментального образца для испытаний на сдвиг (разработано авторами)

Предложенная конструкция образца предполагает возможность проведения испытаний на сдвиг с композитными листами различных толщин габаритами 500×300 мм, которые также могут быть скорректированы с незначительными изменениями конструкции. Плоские листы легко транспортируются, раскраиваются, допускают сверление или формование отверстий, а также не требуют сложных оснасток при изготовлении, что в совокупности позволяет упростить и унифицировать изготовление образцов, и как следствие, снизить стоимость и трудозатраты при проведении исследований.

Разработанная конструкция образца представлена на рисунке (рис. 1) и состоит из 4 основных элементов: железобетонных блоков (1), упоров (2), композитных листов (3) и стальной обоймы (4).

Стальная обойма (4), показанная на рисунке (рис. 2), служит для объединения композитных листов (3) и равномерного распределения прикладываемой испытательной машиной нагрузки сдвига на образец. Конструкция состоит из стальных швеллеров, уголков и листов, скомпонованных таким образом, чтобы обеспечить надежное закрепление и местную устойчивость композитных листов. Немаловажным фактором является отсутствие клеевых соединений: композитные листы присоединяются к обойме с помощью накладок и 12 высокопрочных болтов, обеспечивающих фрикционное соединение, что делает конструкцию пригодной к многократному использованию, не повреждает композит и позволяет легко её разбирать для анализа механизма разрушения испытываемого соединения.

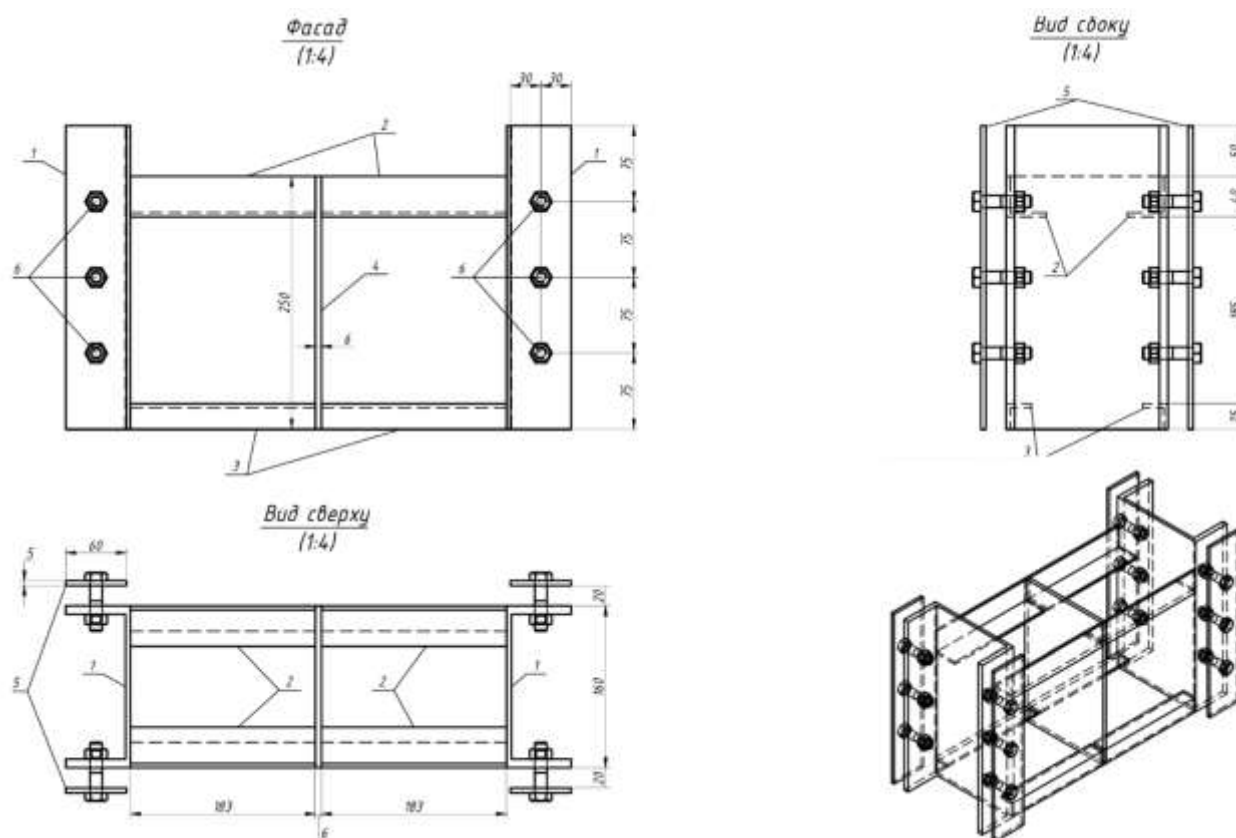


Рисунок 2. Конструкция стальной обоймы (4) (разработано авторами)

Исследуемая конструкция упора (2) (рис. 1) является частной реализацией полезной модели [17] и разработана согласно предложенной методике расчета для шпильки диаметром 19 мм, длиной 125 мм при расчетном сопротивлении композита на сжатие поперек волокон 34,9 МПа. Образец предполагает симметричное размещение 4 упоров.

Материалы и их характеристики

Бетон. Принятый класс бетона должен обеспечивать реализацию расчётного механизма работы соединения на сдвиг и исключать преждевременное разрушение бетонной части (выкол, смятие). В противном случае фиксируемая несущая способность и деформативность будут характеризовать прочность бетона, а не собственно работоспособность узла объединения. Поэтому класс бетона и схема армирования должны назначаться достаточными с учётом того, что разрушение инициируется и развивается в конструкции узла объединения или в композите, но при условии достижения расчетного сдвигающего усилия на образец. В настоящей работе принят класс бетона В35, как минимально рекомендуемый в нормативной документации для сталежелезобетонных пролётных строений.⁵



Рисунок 3. Контрольные образцы бетона (разработано авторами)

Для подбора состава бетона изготовлены и испытаны 6 серий контрольных образцов 100×100×100 мм (рис. 3). Число образцов в серии принято 2 шт. согласно таблице 3 ГОСТ 10180-2012⁶. Испытания на сжатие выполнялись в лаборатории кафедры «Мосты и тоннели» Российского университета транспорта на прессе ИП-1А-1000. Скорость нагружения основного диапазона — 0,51,0 кН/с. Испытания проводились при нормальной температуре в помещении. Все образцы разрушались по форме «песочных часов» (рис. 4). Достигнутая средняя кубиковая прочность в возрасте 28 суток составила 44,51 МПа.



Рисунок 4. Форма разрушения образцов (разработано авторами)

⁵ ОДМ 218.5.2.001-2022. "Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по частичной замене железобетонных балок эксплуатируемого пролётного строения на сталежелезобетонные и железобетонные при проведении капитальных ремонтов, ремонтов и аварийных работ".

⁶ ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.

Итоговую прочность бетона образца определяли согласно ГОСТ 18105-2018⁷ через 28 суток ультразвуковым методом по ГОСТ 17624-2021⁸ и методом упругого отскока по ГОСТ 22690-2015⁹, она составила 39,78 МПа.

Сталь обоймы. Обойма (рис. 5) изготовлена из конструкционной стали Ст3. Соединение элементов обоймы выполнено ручной дуговой сваркой.



Рисунок 5. Стальная обойма (разработано авторами)

Сталь высокопрочного болта упора. Основным критерием выбора высокопрочной стали для упора стала свариваемость, поскольку конструктивное исполнение упора предусматривает выполнение сварного соединения. Например, распространенную в мостостроении высокопрочную сталь для метизов 40Х с пределом текучести по ГОСТ 4543-2016¹⁰ $\sigma_T = 785$ МПа относят к III группе свариваемости (ограниченная)¹¹, а для получения качественных сварных соединений с этой сталью требуются дополнительные операции. В то же время высокопрочную сталь 30ХГСА с пределом текучести $\sigma_T = 835$ МПа относят ко II группе свариваемости (удовлетворительная), то есть она имеет менее жесткие технологические ограничения по сравнению с 40Х. Таким образом, при сопоставимых значениях прочности с учетом более благоприятной свариваемости окончательно принята сталь 30ХГСА.

Сталь шпильки. Шпильки были изготовлены по ГОСТ Р 55738-2013¹² из стали 09Г2С по ГОСТ 19281-2014¹³ с пределом текучести $\sigma_T = 265$ МПа. Используется тип SD диаметром

⁷ ГОСТ 18105-2018 Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.

⁸ ГОСТ 17624-2021 Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности.

⁹ ГОСТ 22690-2015 Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля.

¹⁰ ГОСТ 4543-2016Metalloprodukcija iz konstrukcionnoj legirovannoj stali. Tekhnicheskie uslovija.

¹¹ Быковский, О.Г. Справочник сварщика: для сварщиков всех отраслей промышленности. Справочник сварщика / О.Г. Быковский, В.Р. Петренко, В.В. Пешков. — 2011. — URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_004972926/ — Текст: электронный.

¹² ГОСТ Р 55738-2013 (ИСО 13918:2008). Национальный стандарт Российской Федерации. Шпильки и керамические кольца для сварки.

¹³ ГОСТ 19281-2014 Прокат повышенной прочности. Общие технические условия.

19 мм и длиной 125 мм, что соответствует размерному ряду шпилек-упоров по таблице 6 ГОСТ Р 55738-2013.

Композит. В исследовании использовались листы стеклопластика на основе стеклоткани Т-10 и связующего ВК-51 с квазиизотропным направлением укладки слоёв [18]. Предел прочности материала при сжатии вдоль волокон принят равным 260,099 МПа. Средняя толщина листов составила 12,6 мм, размеры в плане — 300×500 мм, проектная плотность 1850 кг/м³. Следует отметить, что фактическая плотность изготовленных листов, полученная по расчету исходя из массы и объема, оказалась ниже проектной и составила 1665 кг/м³.

Внешний вид композитных листов и дефект изготовления в виде складок стеклоткани приведены на рисунке (рис. 6). Наличие данного дефекта следует учитывать как фактор, способный снижать прочность материала.



Рисунок 6. Композитные листы и дефект на них (разработано авторами)

Поскольку конструкция предполагает совместную работу композита и металлических элементов упора, отдельно стоит упомянуть вопрос допустимости контакта ПКМ и сталей. В отечественной нормативной документации ограничения на непосредственный контакт композитов и стали сформулированы применительно к материалам, армированным углеродным волокном. В п. 8.2 СП 164.1325800.2014¹⁴ указано, что не допускается прямой контакт углеволокна элементов усиления и стальных элементов железобетонных конструкций, либо необходимо выполнять защиту стальных элементов от гальванической коррозии. Аналогично в п. 4.10 СТО 38276489.003-2017¹⁵ указано, что не допускается непосредственный контакт углеродного волокна с металлом строительной конструкции из-за опасности возникновения электрохимической коррозии. Для исследуемого соединения приведённые нормативные ограничения не применимы, а их физическое обоснование не актуально для стекловолокна.

Изготовление и сборка образцов

Высокопрочные болты упора и специальные шайбы изготавливались в специализированной мастерской механической обработкой заготовок на токарном станке по предоставленным чертежам (рис. 7). Изготовление болтов сопровождалось образованием значительного объема

¹⁴ СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования.

¹⁵ СТО 38276489.003-2017. Усиление стальных конструкций композитными материалами. Проектирование и технология производства работ.

металлической стружки и, повышенным, нерациональным расходом материала. В дальнейшем целесообразно выбирать более технологичный подход к изготовлению, обеспечивающий снижение количества отходов и трудоёмкости производства.



Рисунок 7. Образцы высокопрочных болтов и шайб (разработано авторами)



Рисунок 8. Контактная сварка оплавлением шпилек со сталью 30ХГСА (разработано авторами)

Для оценки свариваемости высокопрочной стали 30ХГСА со сталью шпилек 09Г2С выполнялась пробная сварка методом контактной сварки оплавлением (КСО). Изготовлены два контрольных образца из стали 30ХГСА: для одного образца перед сваркой применялся подогрев до 250°C, второй сваривался без подогрева (рис. 8). К каждому образцу из стали

30ХГСА приваривались шпильки из стали 09Г2С, после чего качество соединения оценивалось испытанием упоров на загиб с визуальным контролем сварного шва и пришовной зоны.¹⁶

По результатам испытаний оба варианта выдержали загиб, при этом видимые надрывы и трещины в сварном шве и пришовной зоне не выявлены (рис. 9).



Рисунок 9. Образцы после испытания на загиб (разработано авторами)

В рамках данной работы свариваемость рассматривается как технологический, а не научно значимый фактор, не влияющий на применяемые расчётные модели и критерии оценки несущей способности узла. Вместе с тем, фактическое изготовление упора и его работоспособность в составе конструкции зависят от выбора материала и режима сварки. В дальнейшем выбор стали и технологии выполнения сварных соединений может служить отдельным направлением для исследований.



Рисунок 10. Высокопрочные болты: до и после КСО (разработано авторами)

¹⁶ СТП 016-2002 Технология устройства упоров в виде круглых стержней с головкой из отечественных материалов в конструкциях мостов.

ISO 14555:2025 Welding — Arc stud welding of metallic materials.

После экспериментального подтверждения свариваемости сталей 30ХГСА и 09Г2С была выполнена сварка высокопрочных болтов и шпилек методом КСО (рис. 10). Все сварочные операции выполнялись с помощью сварочной машины SMD-2500HD на производственной площадке предприятия ООО «УпорСпецМонтаж», оснащённой оборудованием для контактной сварки оплавлением с соблюдением технологических режимов. Предприятием также были предоставлены шпильки и керамические кольца по ГОСТ Р 55738-2013.¹²

Композитные листы подготавливались до сборки узла и бетонирования. Отверстия под крепёжные элементы выполнялись сверлением коронками по металлу необходимого диаметра с центровочными сверлами. Перед монтажом контактные поверхности в зоне установки шайб подвергались подготовке: композиту под шайбами придавалась шероховатость наждачной бумагой Р120. После абразивной обработки поверхности обезжиривались (рис. 11).



Рисунок 11. Подготовка поверхностей композита и упоров (разработано авторами)

В образце использовались 4 высокопрочных болта упоров и 12 высокопрочных болтов крепления композитных листов к стальной обойме. На упорах использовались гайки М24 заводского изготовления с оксидированным покрытием по ГОСТ ISO 4032-2014¹⁷ 10.9 метрической резьбой и шагом 3. Согласно п. 7.5.6 СТО НОСТРОЙ 2.10.76-2012¹⁸ расчётная величина момента закручивания M_z для обеспечения заданного осевого усилия натяжения высокопрочного болта определяется выражением:

$$M_z = P * d_b * K_z * K_n \quad (1)$$

где:

P — заданная величина осевого усилия натяжения болта, Н;

d_b — номинальный диаметр болта, м;

K_z — коэффициент закручивания болта и гайки;

$K_n = 1,05$ — коэффициент надёжности.

¹⁷ ГОСТ ISO 4032-2014 «Гайки шестигранные нормальные (тип 1). Классы точности А и В.

¹⁸ СТО НОСТРОЙ 2.10.76-2012. Строительные конструкции металлические. Болтовые соединения. Правила и контроль монтажа, требования к результатам работ.

Коэффициент закручивания K_z в общем случае должен определяться экспериментально согласно Приложению В СТО НОСТРОЙ 2.10.76-2012. В связи с конструктивными сложностями установки и затяжки болта с нестандартной головкой и малой длиной тела болта в контрольный динамометрический прибор УБТ-40 в расчётах принято $K_z = 0,2$ как верхнее допускаемое значение.

Затяжка высокопрочных болтов выполнялась поверенным динамометрическим ключом King Tony 34662-3DG (серийный номер 2503620159) с контролем крутящего момента, принимаемым по расчёту 780 Нм (рис. 12).



Рисунок 12. Процесс затяжки высокопрочных болтов (разработано авторами)

После затяжки высокопрочных болтов листы устанавливались в стальную обойму и закреплялись болтами. Затем размещались арматурные каркасы, устраивалась опалубка и выполнялось бетонирование (рис. 13). При этом поверхности контакта бетона и ПКМ, для которых требовалось исключить адгезионное сцепление, предварительно обрабатывались синтетической смазкой для опалубки. Смесь укладывалась в опалубку послойно с обеспечением уплотнения методом штыкования. После бетонирования образец выдерживался 28 суток при положительной температуре $+5^{\circ}\text{C}$. Уход за бетоном осуществлялся в течение периода твердения путём укрытия влажной тканью.



Рисунок 13. Бетонирование образца (разработано авторами)

Испытательная схема и оборудование

Испытания выполнялись на испытательной машине EU-100 (рис. 14) с приложением вертикальной нагрузки к образцу в соответствии с принятым протоколом нагружения. Измерительная система включала четыре датчика линейных перемещений LVDT (рис. 15) и четыре индикатора часового типа ИЧ-10, размещённые максимально близко к каждому упору для контроля раскрытия шва.



Рисунок 14. Испытательная машина EU-100 (разработано авторами)

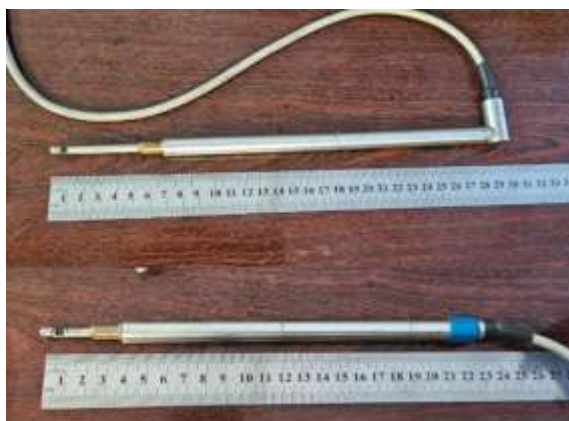


Рисунок 15. Используемые LVDT датчики (разработано авторами)

Показания LVDT регистрировались непрерывно синхронно с нагрузкой. Показания индикаторов часового типа, фиксирующих величину раскрытия шва объединения, снимались дискретно в конце каждой 10-минутной выдержки на ступенях нагружения.

Стоит отдельно упомянуть вопрос размещения датчиков. При креплении датчика на внешнюю по отношению к образцу точку (например, на основание стенда) происходит завышение регистрируемых перемещений, особенно на начальных стадиях нагружения. Об

этом указано в [3]: при первоначальном нагружении смещения оказываются существенно выше расчётных, поэтому авторы фактически оценивают смещения, возникающие только после доведения нагрузки до уровня 40 %. Таким образом, само решение выноса части измерительной системы за рамки системы координат образца подразумевает необходимость учитывать или исключать, как минимум, влияние податливости основания и стального пакета, распределяющего нагрузку на образец.

В настоящем исследовании все датчики размещались непосредственно на образце. В результате регистрировалось именно относительное перемещение «ПКМ-бетон» в системе координат образца, что позволяет вести оценку смещений во всем диапазоне нагружений без отсечения начальной стадии.



Рисунок 16. Магнитные стойки (разработано авторами)

Датчики устанавливались на магнитные стойки (рис. 16). На бетонных блоках к их боковым поверхностям были приклеены 8 металлических уголков, по одному для каждого датчика. Уголки для размещения индикаторов часового типа, измеряющих поперечное смещение в шве, располагались таким образом, чтобы измерительная база находилась на одном горизонтальном уровне с упорами. Часть стоек закреплялась на металлических накладках, входящих в состав обоймы. Такое размещение допустимо, поскольку обойма и накладки соединены с композитными листами 12 высокопрочными болтами и в процессе испытания перемещаются совместно.



Рисунок 17. Виды опытного образца спереди и сзади (разработано авторами)

На рисунке (рис. 17) приведены виды опытного образца спереди и сзади. Показаны бетонные блоки, композитные листы, металлическая обойма, металлический пакет для равномерного распределения нагрузки от испытательной машины, а также расположение измерительной аппаратуры с нумерацией датчиков. Далее будут использоваться обозначения правой и левой частей образца. К правой части относится сторона, на которой установлены датчики 1, 4, 5, 8, к левой — сторона, на которой установлены датчики 2, 3, 6, 7.

Протокол нагружения

В методике испытаний по EN 1994-1-1, Annex B.2.4 можно условно выделить 2 фазы. В 1 фазе нагрузка доводится ступенями до 40 % от ожидаемой разрушающей нагрузки, после чего выполняется 25 циклов нагружения-разгружения в диапазоне 5–40 % от ожидаемой разрушающей нагрузки. Во 2 фазе образец нагружается ступенями до разрушения. Последующие приращения нагрузки назначаются таким образом, чтобы разрушение не наступило ранее, чем через 15 минут. Продольное проскальзывание между каждым бетонным блоком и несущим элементом измеряется непрерывно в процессе нагружения (или на каждой ступени). Измерения продолжаются как минимум до снижения нагрузки на 20 % ниже максимальной. Дополнительно вблизи каждой группы упоров фиксируется величина раскрытия шва.

В отчёте DISSCO [19], где программа испытаний также выстроена на основе EN 1994-1-1, указано, что 25 циклов выполняются для оценки начального неупругого смещения.

Экспериментальные данные показывают, что в ходе этих циклов наблюдается накопление остаточного смещения, причём его приращение существенно больше в первых циклах и уменьшается с каждым циклом, после чего считают, что образец возвращается к упругой работе [3; 20].

В работе [9] испытания выполнялись иначе. Задавались пять циклов нагружения до характеристического уровня и затем пять циклов до расчётного уровня, после чего образец догружался до разрушения. Указанные уровни выбирались не как доли ожидаемой разрушающей нагрузки, а по результатам расчёта вариантов пролетного строения. Это говорит о том, что протокол ориентирован на проверку работоспособности соединения в конкретном пролетном строении.

Таким образом, предварительное циклическое нагружение по EN 1994-1-1 предназначено для выявления и стабилизации начальной податливости, обусловленной выборкой зазоров, деформациями контактных поверхностей и локальным смятием бетона в зоне упора. В 1 фазе фиксируется накопление остаточного относительного смещения в первых циклах и последующее уменьшение его приращения. Это позволяет исключить влияние «приработки» соединения на итоговую диаграмму «нагрузка-смещение» и интерпретировать результаты 2 фазы как характеристику собственной деформативности и несущей способности узла объединения.

В настоящем исследовании за основу взят стандартный протокол нагружения EN 1994-1-1 Annex B, который был модифицирован с учетом особенностей и поставленных целей исследования.

Максимальное сдвигающее усилие для гибкого упора в виде круглого стержня при отношении длины к диаметру $l/d \geq 4,2$ согласно СП 35.13330.2011 определяется формулой:

$$S_h = d^2 \sqrt{10R_b} \quad (2)$$

где:

d — диаметр стержня упора (анкера), см;

R_b — расчетное сопротивление бетона осевому сжатию, принимаемое по п. 7.24 и табл. 7.6 СП 35.13330.2011.

Поскольку информация об ожидаемой разрушающей нагрузке отсутствует, а верифицируемая расчетная методика опирается на сведения о расчетной нагрузке на упор, принято решение считать за 100 % суммарную расчетную нагрузку на 4 упора:

$$P_p = 4 * 57,65 \text{ кН} = 230,6 \text{ кН} \quad (3)$$

Нагружение выполнялось в 3 фазы ступенчато с фиксацией показаний измерительной системы на каждой ступени. Программа нагружения задавалась в долях от P_p с шагом 5 %.

Фаза 1. Нагрузка изменялась в диапазоне 5–40 % P_p с выполнением 5 циклов нагружения-разгружения. Фаза предназначена для фиксации и стабилизации неупругих деформаций в узлах объединения. В первом цикле повышение нагрузки от 5 % до 40 % выполнялось ступенчато с шагом 5 % P_p с выдержкой 10 минут на каждой ступени, что обусловлено отсутствием экспериментальных данных о характере работы соединения. Изменение нагрузки в рамках ступени и последующие циклы выполнялись с постоянной скоростью нагружения 1 кН/с.

Фаза 2. Выполнялись 5 циклов нагружения-разгружения в диапазоне 40–100 % P_p . В первом цикле повышение нагрузки от 40 % до 100 % выполнялось ступенчато с шагом 5 % P_p с выдержкой 10 минут на каждой ступени.

Фаза 3. Нагружение от 0 % P_p до наступления предельного состояния. Предельным состоянием считалось такое состояние, при котором произошло падение нагрузки минимум на 20 % от максимума. Нагружение выполнялось с шагом 5 % P_p с выдержкой 10 минут на каждой ступени. По результатам этой фазы фиксировались нагрузка первого проскальзывания P_{slip} , разрушающая нагрузка P_{crit} , механизм и форма разрушения.

Результаты

Результаты разделены по двум группам параметров. Первая группа включает вертикальные смещения по LVDT датчикам № 1–4, фиксируемые непрерывно. Вторая группа включает поперечные смещения в шве по индикаторам часового типа (ИЧ) № 5–8, фиксируемые дискретно. Здесь применяется термин «поперечное смещение», поскольку часть индикаторов фиксировала раскрытие шва, а часть — обжатие.

Фаза 1. На рисунке (рис. 18) представлена зависимость среднего арифметического вертикальных смещений по датчикам № 1–4 от нагрузки в 1 фазе.

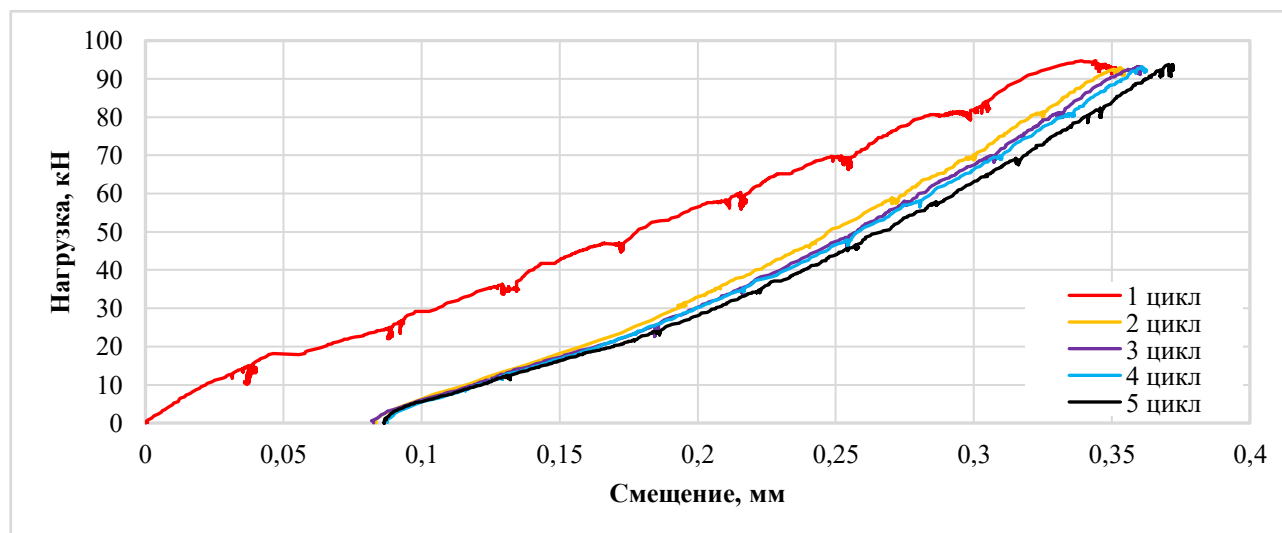


Рисунок 18. График зависимости вертикальных смещений от нагрузки в 1 фазе (разработано авторами)

По результатам пяти циклов установлено, что в рассматриваемом диапазоне нагрузки происходило накопление остаточных неупругих деформаций, причём их основная часть сформировалась в первом цикле и составила в среднем 0,07 мм, после чего характер деформирования стабилизировался и в следующих циклах практически не отличался.

График на рисунке (рис. 19) позволяет оценить различия между отдельными зонами образца после завершения начального накопления неупругих деформаций. В 5 цикле деформирование узла носило нелинейный характер. При уровне нагрузки 40 % P_p максимальное расхождение между отдельными датчиками с учетом начальных неупругих деформаций достигло 0,40 мм.

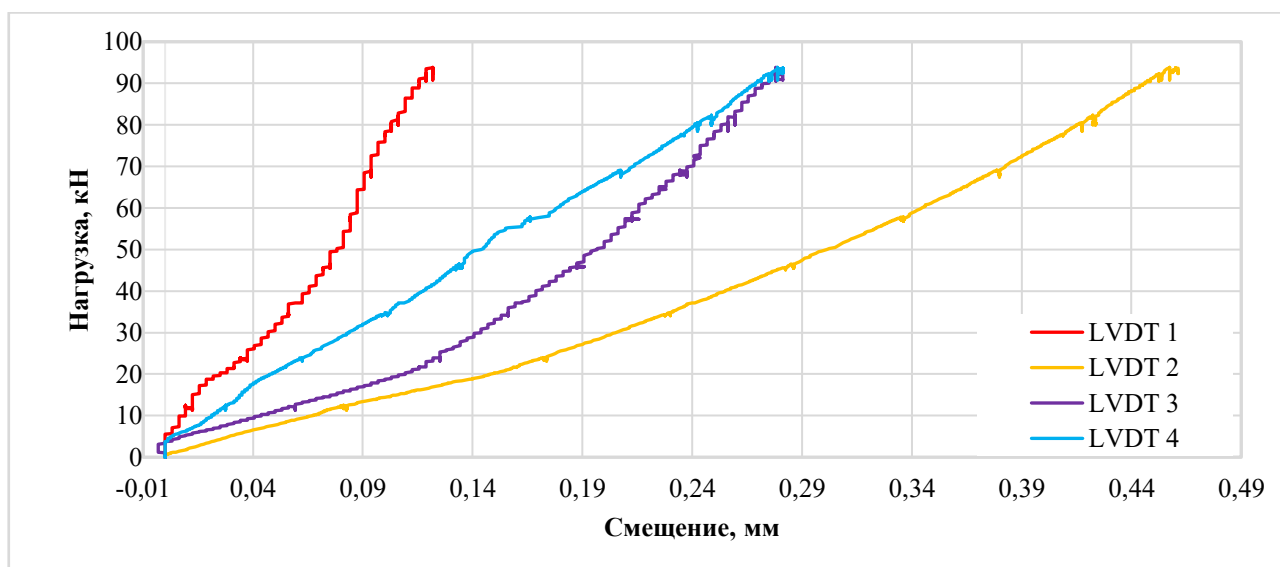


Рисунок 19. График зависимости вертикальных смещений от нагрузки в 5 цикле 1 фазы по датчикам (разработано авторами)

На рисунке (рис. 20) показаны зависимости вертикальных смещений от нагрузки в 5 цикле 1 фазы, усреднённые по двум половинам (ИЧ 5,8 и ИЧ 6,7) образца. Индикаторы часового типа показывают относительное смещение, начальные показания: 5 — 8,55 мм; 6 — 8,49 мм; 7 — 9,46 мм; 8 — 8,89 мм.

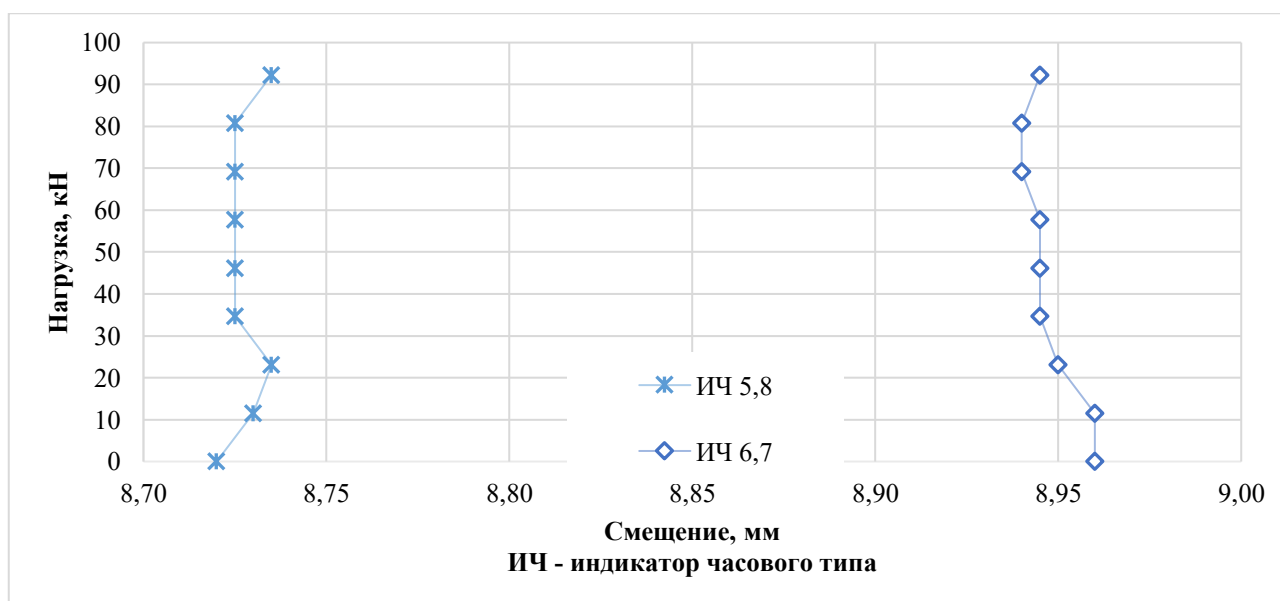


Рисунок 20. График зависимости поперечных смещений в шве от нагрузки в 5 цикле 1 фазы (разработано авторами)

Фаза 2. На рисунке (рис. 21) представлена зависимость среднего арифметического вертикальных смещений по LVDT датчикам 1–4 от нагрузки во 2 фазе. Основная часть начальных неупругих деформаций сформировалась в первом цикле и составила в среднем 0,34 мм, после чего характер деформирования стабилизировался и в следующих циклах практически не отличался.

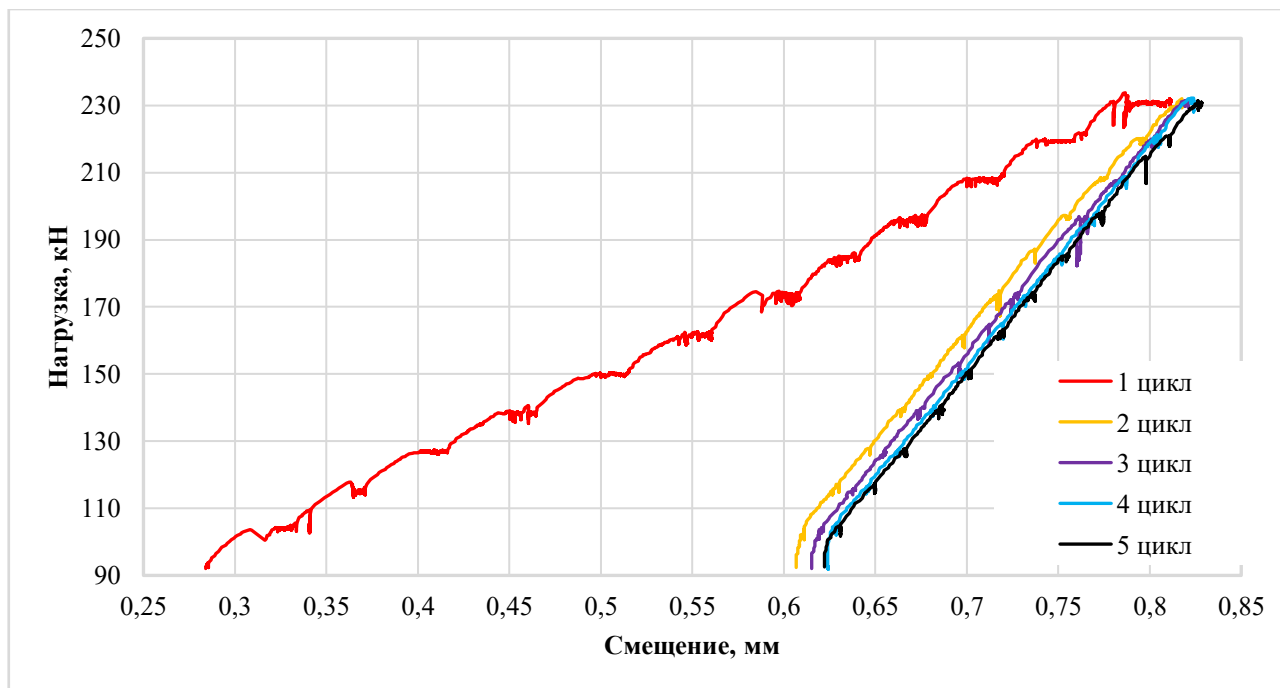


Рисунок 21. График зависимости вертикальных смещений от нагрузки во 2 фазе (разработано авторами)

В 5 цикле вертикальные смещения в узлах имели характер, близкий к линейному (рис. 22), по правой части образца (ИЧ 5,8) наблюдалось обжатие шва до 0,05 мм, в то время, как по левой части (ИЧ 6,7) деформации стабилизировались, их изменение не наблюдалось (рис. 23).

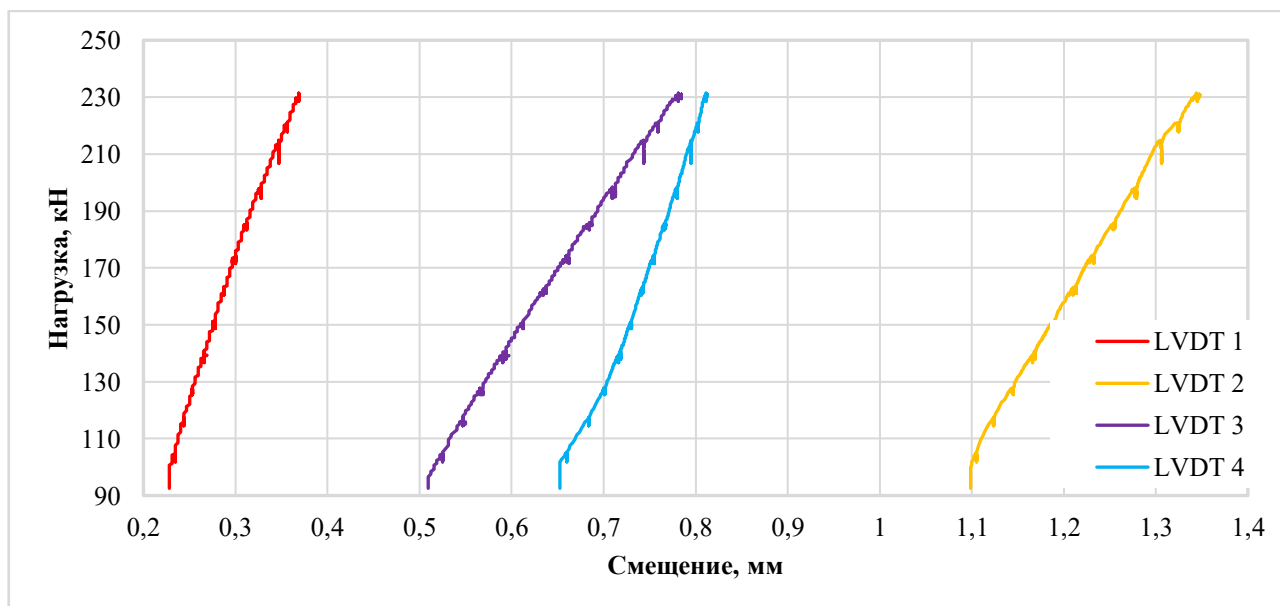


Рисунок 22. График зависимости вертикальных смещений от нагрузки в 5 цикле 2 фазы по датчикам (разработано авторами)

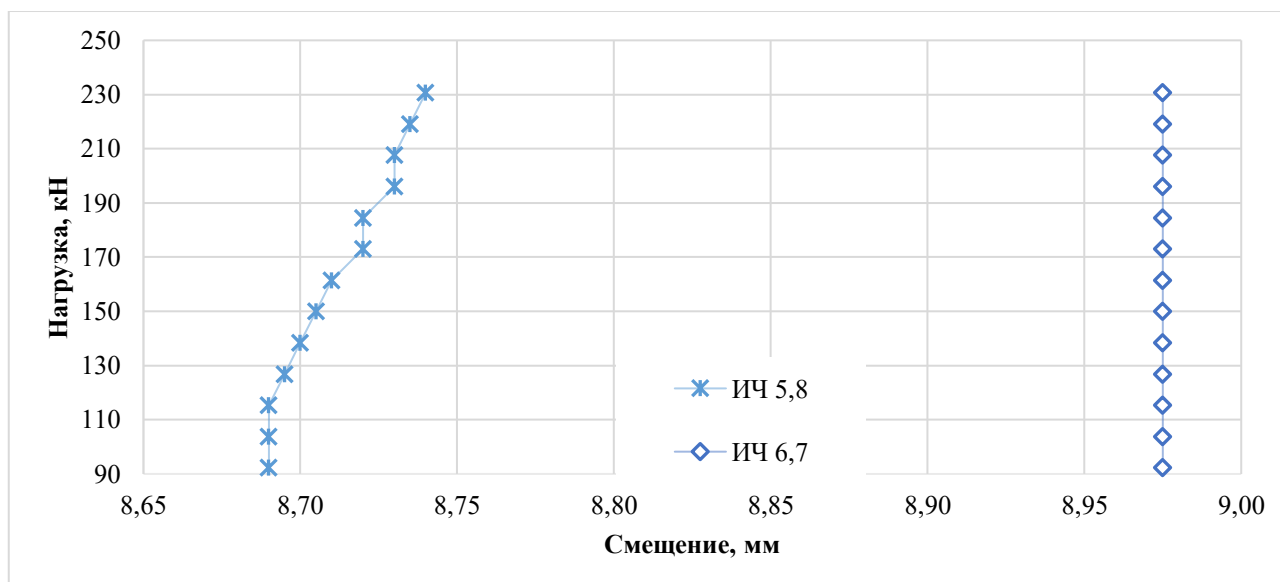


Рисунок 23. График зависимости поперечных смещений в шве от нагрузки в 5 цикле 2 фазы (разработано авторами)

Фаза 3. На рисунке (рис. 24) представлены зависимости вертикальных смещений по LVDT датчикам 1–4 от нагрузки в 3 фазе.

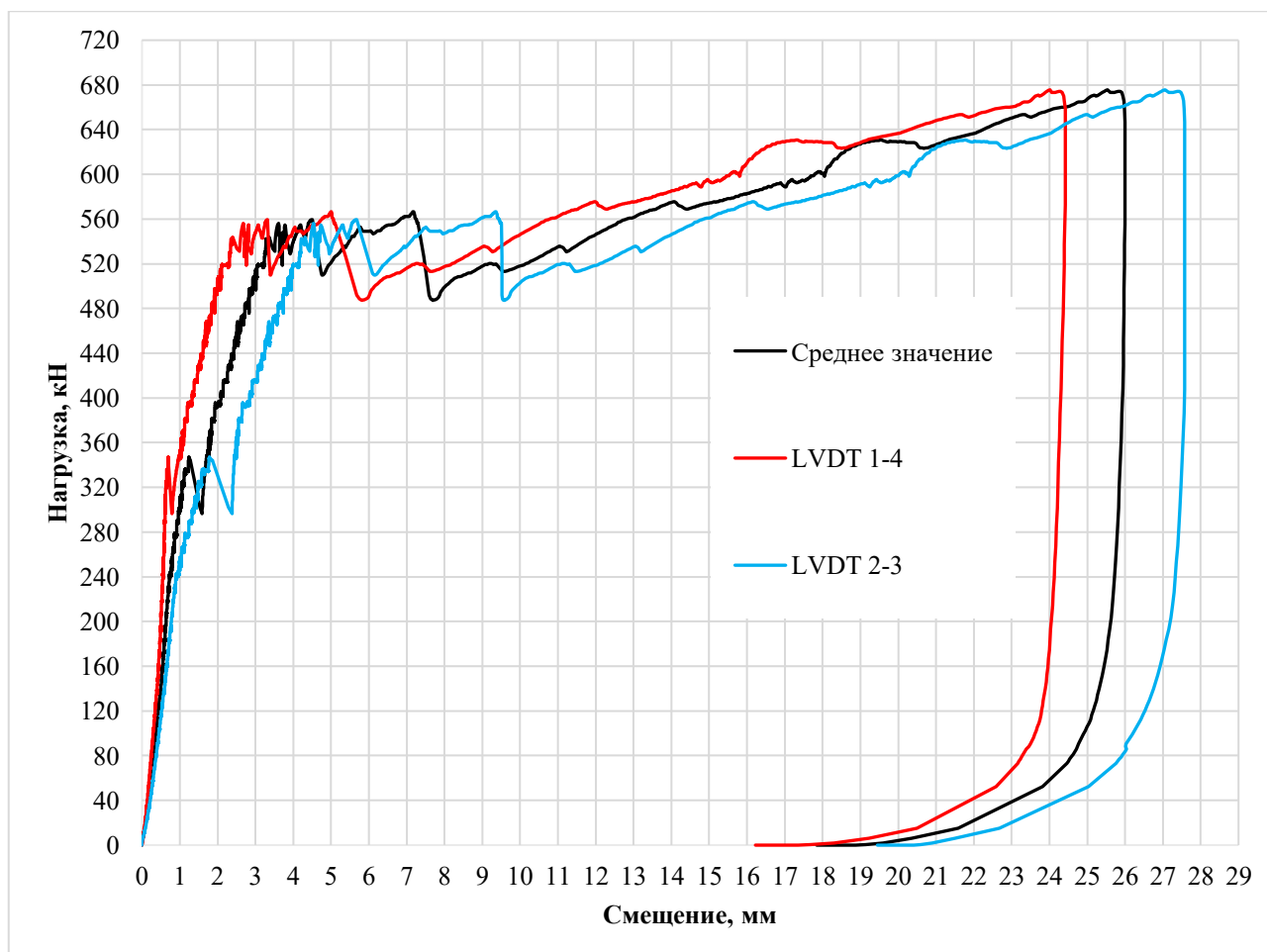


Рисунок 24. График зависимости вертикальных смещений от нагрузки в 3 фазе (разработано авторами)

Первое скачкообразное нарастание деформаций произошло при нагрузке $P_{slip} = 344,2$ кН, при этом мгновенное приращение смещений составило: для правой части образца (LVDT 1,4) — 0,10 мм, для левой части (LVDT 2,3) — 0,51 мм. Нагрузка упала до уровня 296,2 кН, т. е. на 13,94 % от максимальной, что согласно EN 1994-1-1, Annex B.2.4 и принятой программе эксперимента не является основанием для завершения испытаний, поскольку нагрузка должна упасть не менее, чем на 20 % от максимальной. Второй скачок деформаций произошёл при нагрузке $P_{crit} = 542,6$ кН, после чего началось нелинейное скачкообразное нарастание деформаций, которое не стабилизировалось при возвращении к максимальной нагрузке. Падение нагрузки на 20 % от максимальной не было достигнуто и было принято решение завершить эксперимент учитывая скорость нарастания деформаций и проявления визуальных признаков разрушения образца, при этом максимальная нагрузка составила $P_{fin} = 673,4$ кН при среднем вертикальном смещении по образцу 26,21 мм.

На рисунке (рис. 25) представлены поперечные смещения в швах в 3 фазе. Смещения фиксировались до нагрузки $P_{crit} = 542,6$ кН, в связи с тем, что затем образец начал существенно деформироваться и положение части индикаторов часового типа сбилось.

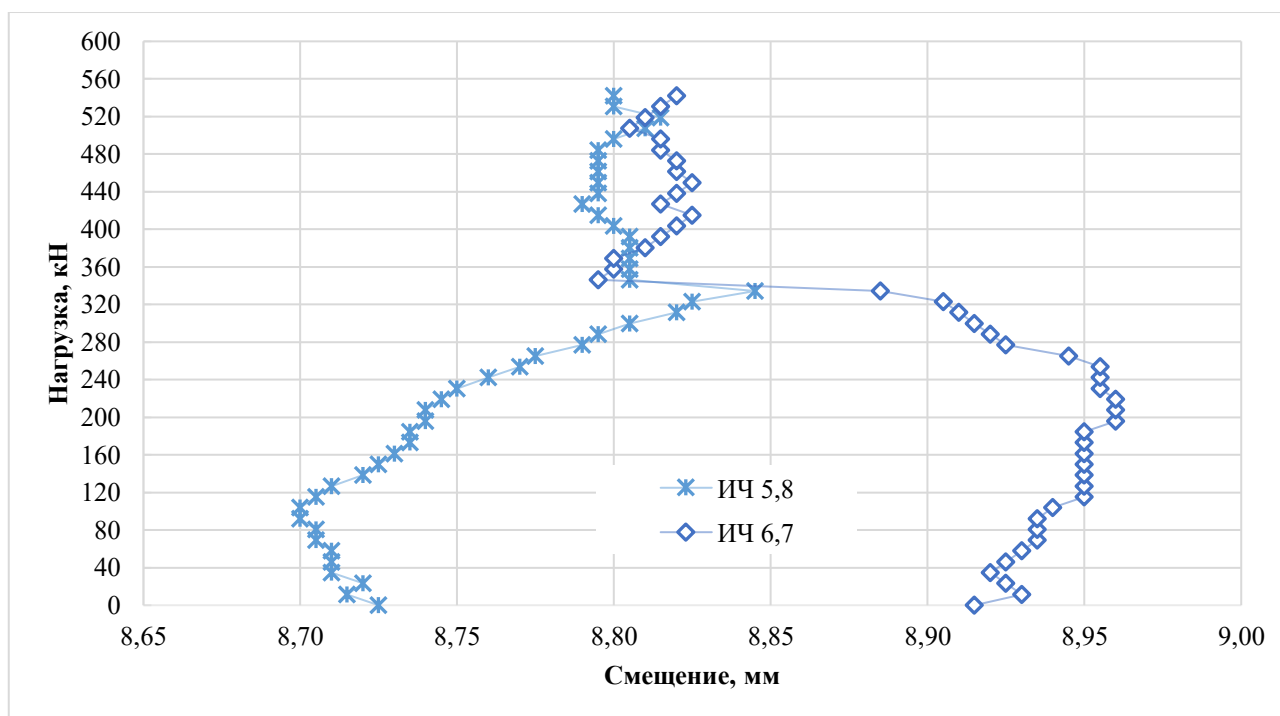


Рисунок 25. График зависимости поперечных смещений в шве от нагрузки в 3 фазе (разработано авторами)

Наблюдаемые формы разрушения

Разрушение образца не было внезапным, развивалось постепенно, сопровождалось щелчками и многократным скачкообразным нарастанием вертикальных смещений. При нагрузке первого проскальзывания $P_{slip} = 344,2$ кН видимых разрушений не наблюдалось.

Предельное состояние первоначально было достигнуто по композитному материалу (рис. 26), однако деформировались также элементы упора — внешние и внутренние шайбы получили изгиб (рис. 29), а в правом бетонном блоке при нагрузке $P_{crit} = 542,6$ кН возникла трещина, идущая от области упоров к основанию блока (рис. 30). Также при нагрузке P_{crit} начали возникать и развиваться загибы нижних углов композитных листов внутрь обоймы (рис. 33).



Рисунок 26. Левая и правая части образца после испытаний (разработано авторами)

Вид со стороны обоймы

Вид со стороны бетонных блоков



Рисунок 27. Композитные листы после испытаний (разработано авторами)



*Рисунок 28. Зоны расположения упоров
на левом композитном листе (разработано авторами)*

В обоих композитных листах предельное состояние реализовалось по механизму потери устойчивости в форме кинка, однако это произошло за пределами области размещения упоров (рис. 27). В литературе эта форма разрушения упоминается как распространённый вид разрушения композитов при сжатии, связанный с образованием полосы сдвига [21].



Рисунок 29. Деформации внутренней и внешней шайбы (разработано авторами)



Рисунок 30. Трещина в основании правого бетонного блока (разработано авторами)

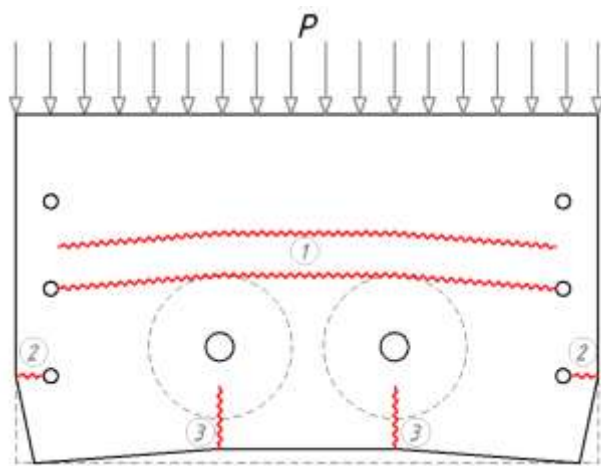


Рисунок 31. Схема разрушения композитных листов с условным разделением по зонам (разработано авторами)

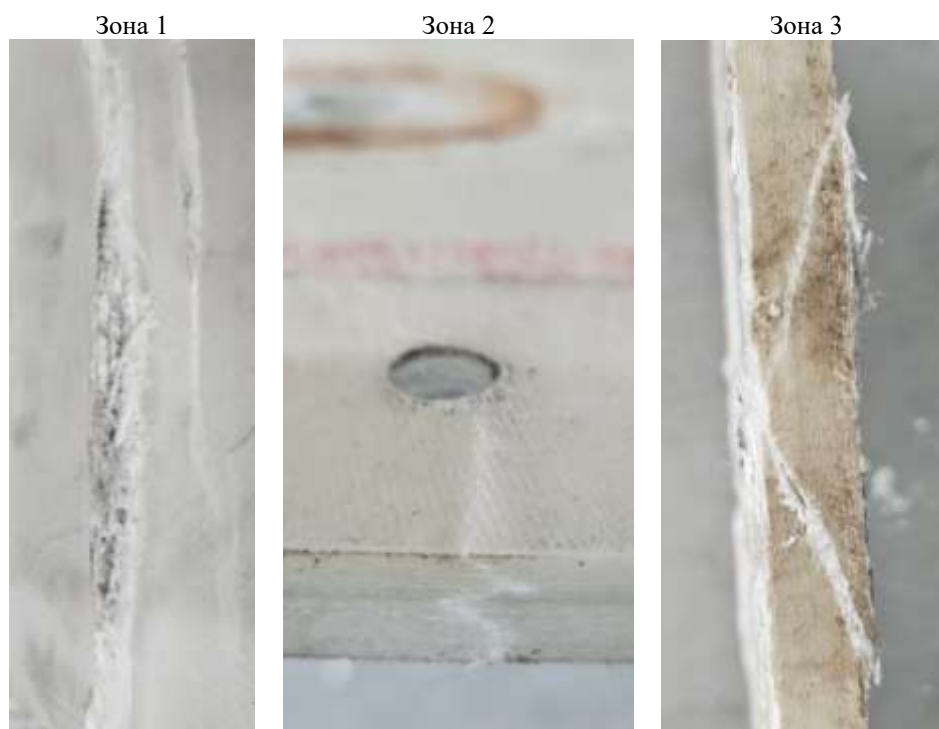


Рисунок 32. Зоны разрушения композитных листов (разработано авторами)

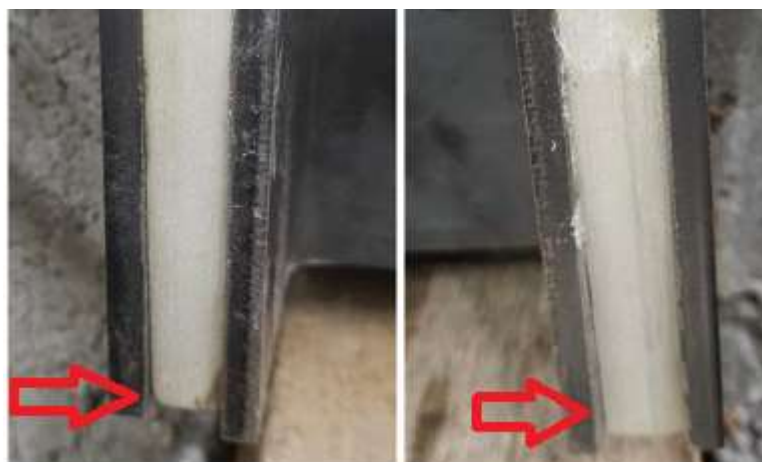


Рисунок 33. Загибы нижних углов композитных листов внутрь обоймы (разработано авторами)

Обсуждение результатов

Анализ зависимостей «нагрузка — вертикальное смещение» показал, что основная часть начальных неупругих деформаций накапливалась в первом цикле нагружения как в 1, так и во 2 фазе. В последнем цикле 1 фазы перемещения, регистрируемые отдельными LVDT датчиками, сохраняли нелинейный характер, тогда как во второй фазе стали близки к линейным. Это указывает на «приработку» соединений и стабилизацию работы. Итоговую оценку несущей способности и деформативности целесообразно выполнять по графику 3 фазы.

График «нагрузка — вертикальное смещение» в 3 фазе может быть условно разделен на три части. Первая часть соответствует интервалу от начала нагружения до первого скачкообразного нарастания деформаций при нагрузке P_{slip} . Для оценки работы сдвигового соединения на этом этапе имеет смысл определить модуль податливости:

$$k_{slip} = P_{slip} / (n * \delta_I) \quad (4)$$

где:

n — число упоров в образце, равное 4;

δ_I — вертикальное относительное смещение, соответствующее нагрузке P_{slip} .

Левая часть образца характеризовалась существенно большими деформациями по сравнению с правой. При нагрузке $P_{slip} = 344,2$ кН модуль податливости составил: для правой части — 247,05 Н/мм, для левой — 96,36 Н/мм, среднее значение — 171,71 Н/мм. Отметим, что в исследовании [9] среднее значение k_{slip} составило около 523 кН/мм, а приведенные авторами данные по другим аналогичным работам находились в диапазоне 0–200 кН/мм, однако такое сопоставление является ориентировочным, т. к. геометрия образцов, конструкция упоров и свойства используемых материалов в них были другие.

Второй участок соответствует интервалу от $P_{slip} = 344,2$ кН до второго скачка деформаций при нагрузке $P_{crit} = 542,6$ кН. На этом участке угол наклона графика становится более пологим, то есть деформативность образца возрастает, что можно связать с:

- а) вновь накапливающимися неупругими смещениями по аналогии с 1 и 2 фазами;
- б) проскальзыванием высокопрочных болтов в отверстиях композитных листов и изменением схемы передачи нагрузки от упора на композит, при котором тело болта начинает работать частично на сдвиг и сминать отверстия по контуру (рис. 28).

Несущую способность одного упора принято определять согласно выражению:

$$P_r = P_u / n \quad (5)$$

где:

P_u — экспериментально полученная максимальная нагрузка;

n — число упоров в образце, равное 4.

Разрушение по металлу упоров не было достигнуто, однако о его близости можно косвенно судить по деформациям его элементов (рис. 29). После достижения P_{crit} образец изменил расчетную схему, поэтому разумно принять $P_u = P_{crit}$.

Таким образом, $P_r \geq \frac{542,6}{4} = 135,65$ кН. В работе [22], исследующей статические характеристики гибких упоров в сталежелезобетонных балках с применением высокопрочного железобетона, для упоров диаметром 19 мм получены разрушающие нагрузки на один упор в диапазоне 143,23–169,01 кН в зависимости от высоты упора и свойств бетона, что говорит о реализации 80,0–94,7 % несущей способности упоров по металлу в настоящем исследовании. Несущая способность упора сопоставлена со значением, рассчитанным по СП 35.13330.2011 — $S_h = 57,65$ кН. Полученное в результате испытаний значение P_r оказалось на 235 % выше S_h , что указывает на высокую безопасность и надежность предлагаемой конструкции. Важным с технологической точки зрения является то, что такая высокая несущая способность достигнута без применения клея, с использованием в процессе монтажа только затяжки динамометрическим ключом и контактной сварки оплавлением (которая может быть выполнена отдельно на производстве).

Третий участок соответствует интервалу от $P_{crit} = 542,6$ кН до завершения эксперимента при нагрузке $P_{fin} = 673,4$ кН. Этот участок нецелесообразно использовать для оценки каких-либо количественных показателей, поскольку после достижения $P_{crit} = 542,6$ кН произошло разрушение композитных листов выше зоны расположения упоров и расчетная схема работы образца изменилась.

Катастрофическое разрушение не произошло и здесь: в зоне упоров композит не разрушился, а продолжил нести нагрузку, хотя и с большими смещениями, но вплоть до завершения испытания. Таким образом, предельное состояние образца определялось не разрушением бетона или упоров, а потерей несущей способности композитных листов на сжатие.

Механизм разрушения

Оба композитных листа имели идентичный вид разрушения, схематично показанный на рисунке (рис. 31). Для удобства зоны разрушения пронумерованы, а их внешний вид показан на рисунке (рис. 32). После возникновения кинка в зоне 1 изменился механизм распределения усилий по композитному листу. Поскольку центральная часть листов более не передавала вертикальную нагрузку на упоры, усилия стали передаваться через боковые крепления листов к обойме. Зоны размещения упоров (показаны пунктиром вокруг отверстий и соответствуют внешнему радиусу внутренних шайб) сохранили целостность и работоспособность композитного материала и продолжили нести нагрузку после возникновения кинка в зоне 1, однако последовавшее изменение расчетной схемы повлекло возникновение вторичных зон разрушения 2 и 3, что визуально проявилось как загибы нижних уголков композитных листов внутрь обоймы (рис. 33), при этом в зоне 2 возникло растрескивание, а в зоне 3 — полосы сдвига. Верхняя граница кинка в зоне 1 находилась сразу под верхним ребром жесткости стальной обоймы, что говорит о том, что ребра выполнили свою проектную функцию и повысили устойчивость композитных листов, что в том числе позволило передать столь высокие нагрузки на упоры при сравнительно небольшой толщине листов.

Первый скачок смещений на уровне $P_{slip} = 344,2$ кН, по мнению авторов (точно это установить в ходе эксперимента было невозможно), указывает на сдвиг композитных листов относительно болтов (иначе говоря проскальзывание листов между шайбами), поскольку при изготовлении отверстий использовались сверла диаметром 25 мм, а диаметр тела болта — 24 мм, а значит в отверстиях оставалось свободное место. При закручивании высокопрочных болтов композитные листы были в таком положении, что свободное пространство в отверстиях находилось в направлении действия сдвигающей силы (рис. 12). На это также косвенно указывают заметно более развитые дефекты в зоне отверстий на левом композитном листе (рис. 28), где произошло скачкообразное смещение $\delta_{slip} = 0,51$ мм. Вместе с тем, аналогичных повреждений отверстий крепления листов к стальной обойме не обнаружено, что свидетельствует о прочном и надежном креплении композитных листов к обойме. Если предположение о природе первого скачка смещений на уровне $P_{slip} = 344,2$ кН верно, то в дальнейшем необходимо выполнять в композите отверстия повышенной точности, как было упомянуто в [1].

Ограничения исследования

Исследование ставило целью верификацию/фальсификацию разработанной расчетной методики и предлагаемой конструкции объединения и ограничено испытаниями одного образца. В теории планирования эксперимента повторность понимается как независимое повторение опыта, позволяющее статистически оценить ошибку полученных результатов. Полученные результаты допустимо трактовать как экспериментальную верификацию расчетной методики и установление несущей способности и деформативности для исследованной конструкции узла объединения, поскольку ни один из 4 упоров не потерял несущую способность, как и области ПКМ вблизи них до достижения P_{crit} .

Ограничение также связано с механизмом наступления предельного состояния. В исследованном образце несущая способность была ограничена предельной прочностью на сжатие вдоль волокон ПКМ, хотя при этом шайбы получили выгиб из плоскости, а один из бетонных блоков треснул. Следовательно, полученное значение R_{crit} не может быть без дополнительной проверки распространено на варианты с более низкими свойствами ПКМ, более высоким уровнем технологических дефектов и т. д. Для перехода от верификации методики к статистически устойчивым выводам требуется серия независимых испытаний на идентичных образцах.

Для дальнейших исследований также целесообразна доработка стальной обоймы с устройством смотровых окон в боковых швеллерах, что обеспечит визуальный контроль развития повреждений в процессе испытаний.

Выводы

Проведенное испытание подтвердило работоспособность предлагаемой конструкции узла объединения композитной главной балки и монолитной бетонной плиты ездового полотна при статическом нагружении.

Методика расчета в пределах исследованной конфигурации образца показала применимость и хорошую сходимость расчетных и экспериментальных результатов. Расчетный уровень нагрузки на один упор, равный 57,65 кН, был устойчиво достигнут во всех пяти циклах второй фазы нагружения. В третьей фазе средняя максимальная нагрузка на один упор составила 135,65 кН, что соответствует коэффициенту запаса прочности 2,35 относительно расчетного значения и лежит в диапазоне 80,0–94,7 % от разрушающей нагрузки в сталежелезобетонных балках с плитой из высокопрочного железобетона.

Эксперимент показал, что разрушение узла объединения развивалось поэтапно и не было катастрофическим. Основная часть начальных неупругих смещений формировалась в первых циклах нагружения, после чего работа соединения стабилизировалась. Предельное состояние первоначально наступило вне зоны расположения упоров. Разрушение было достигнуто по композитным листам, тогда как в зоне упоров композитный материал сохранил целостность и продолжал воспринимать нагрузку вплоть до завершения эксперимента. Это свидетельствует о том, что исследованная конструкция упора и принятая технология его изготовления в целом себя оправдали. Примененная технология контактной сварки оплавлением показала работоспособность, наступление предельного состояния не было связано с разрушением сварных соединений.

Наблюдавшийся выгиб шайб следует рассматривать как косвенное подтверждение корректности расчетной модели и, следовательно, корректности принятой расчетной схемы в части совместной работы упора и ПКМ. При этом форма разрушения композитного материала указывает на то, что достигнутый уровень несущей способности не следует считать предельным для соединений данного типа. При обеспечении более высокой прочности композитного материала на сжатие вдоль волокон и повышении общей устойчивости листов несущая способность узла может быть повышена.

В перспективе требуется проверить влияние прочности композитного материала при сжатии вдоль волокон и его толщины на несущую способность и деформативность узла объединения. Целесообразно исследовать влияние точности выполняемого под упор отверстия на нагрузку первого проскальзывания. Для повышения информативности эксперимента следует предусмотреть совершенствование конструкции образца, в том числе устройство смотровых окон в боковых элементах обоймы. Необходимо исследование усталостной прочности и долговечности узла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ устройств и способов объединения в совместную работу полимерно-композитных главных балок пролетного строения и плиты ездового полотна автодорожных мостов / С.В. Рыбаков, А.А. Пискунов, М.Н. Ерофеев [и др.] // Транспортные сооружения. — 2024. — Т. 11, № 4. — URL: <https://t-s.today/01SATS424.html>. — DOI: [10.15862/01SATS424](https://doi.org/10.15862/01SATS424). — EDN: [NUYAMK](https://www.edn.ru/NUYAMK). (дата обращения: 28.01.2025).
2. Ростовых Г.Н. Совершенствование методики расчёта гибких упоров в конструкциях сталежелезобетонных мостов / Г.Н. Ростовых // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2007. — № 3(12). — С. 79–87. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11913797>. — EDN: [KASLPP](https://www.edn.ru/KASLPP). (дата обращения: 06.10.2024).
3. Экспериментальные исследования сдвиговой жёсткости стыка сталежелезобетонной конструкции с гибкими штыревыми упорами / А.В. Козлов, В.А. Козлов, А.М. Хорохордин, П.П. Чураков // Строительная механика и конструкции. — 2020. — № 1(24). — С. 54–62. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42591124>. — EDN: [CUCPHA](https://www.edn.ru/CUCPHA). (дата обращения: 18.01.2026).
4. Ollgaard J.G. Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal-Weight Concrete / J.G. Ollgaard, R.G. Slutter, J.W. Fisher // Engineering Journal. — 1971. — Т. 8, № 2. — URL: <https://ej.aisc.org/index.php/engj/article/view/160>. — DOI: [10.62913/engj.v8i2.160](https://doi.org/10.62913/engj.v8i2.160). (дата обращения: 18.01.2026).
5. Тонких Г.П. Экспериментальное исследование сдвигового соединения монолитных сталежелезобетонных перекрытий на угловых анкерных упорах / Г.П. Тонких, Д.А. Чесноков // Вестник МГСУ. — 2021. — Т. 16, № 2. — С. 144–152. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46529364>. — DOI: [10.22227/1997-0935.2021.2.144-152](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.2.144-152). — EDN: [WPQUHH](https://www.edn.ru/WPQUHH). (дата обращения: 18.01.2026).
6. Maleki S. Behavior of channel shear connectors, Part I: Experimental study / S. Maleki, S. Bagheri // Journal of Constructional Steel Research. — 2008. — Т. 64, № 12. — С. 1333–1340. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X08000163>. — DOI: [10.1016/j.jcsr.2008.01.010](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.01.010) (дата обращения: 18.01.2026).
7. Veldanda M.R. Behaviour of perfobond rib shear connectors: push-out tests / M.R. Veldanda, M.U. Hosain // Canadian Journal of Civil Engineering. — 1992. — Т. 19, № 1. — URL: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/192-001>. — DOI: [10.1139/192-001](https://doi.org/10.1139/192-001) (дата обращения: 18.01.2026).
8. Push-out tests on bolted shear connectors in composite cold-formed steel beams / M. Hosseinpour, M. Zeynalian, A. Ataei, M. Daei // Thin-Walled Structures. — 2021. — № 164. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823121002482>. — DOI: [10.1016/j.tws.2021.107831](https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107831) (дата обращения: 18.01.2026).
9. Rajchel M. Experimental Study on a novel shear connection system for FRP-concrete hybrid bridge girder / M. Rajchel, M. Kulpa, T. Siwowski // Materials. — 2020. — Т. 13, № 9. — URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7254204/>. — DOI: [10.3390/ma13092045](https://doi.org/10.3390/ma13092045). — EDN: [DIRAFA](https://www.edn.ru/DIRAFA). (дата обращения: 19.10.2025).
10. FRP stay-in-place form and shear key connection for FRP-concrete hybrid beams/decks / X. Zou, P. Feng, J. Wang [et al.] // Composite Structures. — 2018. — № 192. — С. 489–499. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822317341235>. — DOI: [10.1016/j.compstruct.2018.03.011](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.03.011) (дата обращения: 20.01.2026).

11. Zou X. Perforated FRP ribs for shear connecting of FRP-concrete hybrid beams/decks / X. Zou, P. Feng, J. Wang // Composite Structures. — 2016. — № 152. — С. 267–276. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822316305578>. — DOI: [10.1016/j.compstruct.2016.05.039](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.039) (дата обращения: 20.01.2026).
12. Nguyen H. Push-out tests for shear connections between UHPFRC slabs and FRP girder / H. Nguyen, H. Mutsuyoshi, W. Zatar // Composite Structures. — 2014. — № 118. — С. 528–547. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822314003912>. — DOI: [10.1016/j.compstruct.2014.08.003](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.08.003) (дата обращения: 20.01.2026).
13. Correia J.R. Flexural behaviour of GFRP–concrete hybrid beams with interconnection slip / J.R. Correia, F.A. Branco, J.G. Ferreira // Composite Structures. — 2007. — № 77. — С. 66–78. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822305001546>. — DOI: [10.1016/j.compstruct.2005.06.003](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.06.003) (дата обращения: 26.01.2026).
14. Single shear pull-off test of FRP-to-concrete and mortar bond / Y.-Q. Li, E. Esmaceli, J.-F. Chen [et al.]. — 2019. — URL: <https://bura.brunel.ac.uk/bitstream/2438/19286/1/FullText.pdf>. (дата обращения: 26.01.2026).
15. Design, Fabrication, and Testing of a Light Weight Hybrid Concrete Fibre Reinforced Polymer Bridge Girder / D. Rathnayaka, D. Fernando, S. Lopez Dubon [et al.] // 11th International Conference on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2023). — Zenodo, 2023. — URL: <https://zenodo.org/records/8066469>. (дата обращения: 19.01.2026).
16. Composite Behaviour of a Hybrid FRP Bridge Girder and Concrete Deck / A.C. Manalo, T. Aravinthan, H. Mutsuyoshi, T. Matsui // Advances in Structural Engineering. — 2012. — Т. 15, № 4. — URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1260/1369-4332.15.4.589>. — DOI: [10.1260/1369-4332.15.4.589](https://doi.org/10.1260/1369-4332.15.4.589) (дата обращения: 26.01.2026).
17. Патент № RU 240 268 U1. Упор: № 2025118586: заявл. 04.07.2025: опубл. 29.12.2025 / С.В. Рыбаков, М.Н. Ерофеев; заявитель С.В. Рыбаков. (дата обращения: 03.07.2026).
18. Физико-механические характеристики композитных материалов на основе полимеров по экспериментальным данным / А.А. Пискунов, С.А. Луканкин, О.К. Петропавловских [и др.] // Nanotechnologies in Construction A Scientific Internet-Journal. — 2026. — Т. 18, № 1. — URL: https://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild-1-2026/54-67.pdf. — DOI: [10.15828/2075-8545-2026-18-1-54-67](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-54-67). — EDN: [TPGTYO](https://edn.ru/TPGTYO). (дата обращения: 19.03.2026).
19. Development of improved shear connection rules in composite beams (DISCCO): final report / ed. R.M. Lawson, E. Aggelopoulos, R. Obiala [et al.]. — Luxembourg: Publications Office, 2017. — URL: <https://constructalia.arcelormittal.com/files/R&D%20report%20DISSCO%20en--6c334a425cf171309240b225dc8c61ec.pdf>. (дата обращения: 20.01.2026).
20. Huo B.Y. Push-out tests and analytical study of shear transfer mechanisms in composite shallow cellular floor beams / B.Y. Huo, C.A. D'Mello // Journal of Constructional Steel Research. — 2013. — Т. 88. — URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X13001363>. — DOI: [10.1016/j.jcsr.2013.05.007](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.05.007). (дата обращения: 23.01.2026).

21. Полилов А.Н. Экспериментальное обоснование критериев прочности волокнистых композитов, проявляющих направленный характер разрушения / А.Н. Полилов, Н.А. Татусь // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2012. — № 2. — С. 140–166. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17801136>. — EDN: [OZOCKT](#). (дата обращения: 12.01.2026).
22. Experimental Investigation on the Static Performance of Stud Connectors in Steel-HSFRC Composite Beams / F. Wu, W. Tang, Ch. Xue [et al.] // Materials. — 2021. — Т. 14, № 11. — С. 2744. — URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/11/2744>. — DOI: [10.3390/ma14112744](https://doi.org/10.3390/ma14112744). — EDN: [NYLCII](#). (дата обращения: 19.10.2025).

Rybakov Sergey Viktorovich

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

E-mail: Rybakov.sv@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0810-7994>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1178306

Piskunov Alexander Alekseevich

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

E-mail: a.piskunov52@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2606-9068>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=807388

Erofeev Mikhail Nikolaevich

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

E-mail: kventr@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1048-3574>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=836604

An experimental study of the joint operation of a composite main beam and a monolithic plate of the roadway of road bridges

Abstract. In the article, the authors present the results of an experimental study of a joint assembly of a composite main beam and a monolithic plate of the roadway of road bridges. The relevance of the work is due to the need for experimental substantiation of the proposed analytical methodology for calculating the elements of the union node of the hybrid bridge superstructure. The purpose of the study was to verify the calculation methodology and establish the actual bearing capacity, deformability and nature of the node failure under static loading. The paper provides information about the prototype design, materials, process and assembly procedure, measuring system and test program. The technological issues of the choice of steels, weldability of the elements, contact of the surfaces of the composite and the structural elements of the joint, and the specifics of the placement of measuring equipment are considered.

The experimental program included three phases with continuous recording of vertical displacements and discrete recording of transverse displacements in the joint seam. It was found that the main part of the initial inelastic deformations accumulated in the first cycles of the first and second phases, after which the operation of the node stabilized. Three characteristic load levels are identified — design load, first slip load, and destructive load. It is shown that the limiting state was determined by the composite material outside the abutment zone and developed gradually, without catastrophic destruction, while the elements of the association themselves received plastic deformations. The results of the experiment were compared with known studies, and a conclusion was made about the operability of the proposed design of the integration node and the applicability of the calculation methodology. The prospects for further research and improvement of the design are formulated.

Keywords: polymer composite materials; hybrid spans; connecting device; superstructure stop; bridges made of polymer composite materials; problems of composite materials application; superstructure made of polymer composite materials; experimental substantiation; methodology