



Research Article

Received: December 27, 2025

Accepted: January 14, 2025

Published: February 25, 2026

ISSN 2304-6295

## Reinforced concrete precast beam with a stepped joint

Tyukalov, Yury Yakovlevich<sup>1\*</sup> Ashikhmin, Stanislav Eduardovich<sup>1</sup> <sup>1</sup> Vyatka State University, Kirov, Russian Federation; yutvgu@mail.ru (T.Y.Y.);[ashihminstanislav@gmail.com](mailto:ashihminstanislav@gmail.com) (A.S.E.)

Correspondence: \* email yutvgu@mail.ru; contact phone +79128218977

### Keywords:

Precast concrete beam; Quickly erected connection; Reinforced beam; Composite rods

### Abstract:

**The object of research is a** precast reinforced concrete beam with a stepped joint strengthened by composite reinforcement bars. **Method.** The study employed an experimental–numerical approach. Four beam specimens were prepared, including one monolithic control specimen and three composite specimens consisting of two reinforced concrete parts connected by a stepped joint. The joint zone was reinforced with composite rods installed in preformed holes and grooves. Static loading tests were carried out using a P-50 hydraulic press to determine the load-bearing capacity, deformation response, and failure pattern of the beams. In parallel, a finite element model was developed in the LIRA-SAPR software package with consideration of the physical nonlinearity of concrete. The numerical model was calibrated and compared with the experimental results. **Results.** The experimental study showed that the reinforced concrete precast beam retained its load-bearing capacity up to an ultimate load of approximately 25 kN. Failure occurred predominantly in the stepped joint zone and was accompanied by crack development, local concrete damage, and loss of stiffness. Numerical analysis reproduced the general deformation pattern and stress concentration in the joint region; however, the calculated ultimate load exceeded the experimental one by approximately 1.8 times. The discrepancy is attributed to material heterogeneity, technological imperfections in specimen fabrication, and the simplified representation of the joint behavior in the numerical model. The results confirm the feasibility of using stepped composite joints in precast reinforced concrete beams, while indicating the need for further optimization of anchorage depth and reinforcement layout to improve structural performance.

## 1 Introduction

В условиях развития строительной отрасли, ориентированного на индустриализацию, сокращение сроков монтажа, снижение трудоёмкости работ и повышение долговечности сооружений, особое значение приобретает совершенствование конструктивных решений сборных железобетонных элементов и их соединений. Надёжность стыковых зон в подобных системах во многом определяет несущую способность, деформативность, трещиностойкость и эксплуатационную долговечность всей конструкции. Для балочных элементов эта задача имеет принципиальное значение, поскольку именно в области стыка возникают локальные концентрации напряжений, способные инициировать преждевременное разрушение и существенно снизить эффективность работы элемента в целом.

Одним из перспективных направлений развития сборного железобетона является применение быстровозводимых соединений, позволяющих отказаться от трудоёмких традиционных решений, основанных на использовании массивных стальных закладных деталей, сварных операций и сложных монтажных процедур. При этом особый интерес представляют ступенчатые стыки, обеспечивающие геометрическое взаимное зацепление соединяемых элементов и потенциально способствующие более эффективной передаче поперечных и изгибающих усилий. Однако практическая реализация таких узлов требует детального изучения

Tyukalov Y.; Ashikhmin S.

Reinforced concrete precast beam with a stepped joint;

2026; Construction of Unique Buildings and Structures; 122 Article No 12201. doi: 10.4123/CUBS.122.1



механизма их работы, прежде всего в случае применения композитной арматуры в качестве соединительных элементов.

Интерес к композитным стержням в строительстве обусловлен рядом их известных преимуществ по сравнению со стальной арматурой: высокой коррозионной стойкостью, малой массой, значительной удельной прочностью, технологичностью транспортирования и монтажа. Необходимость расширения применения композитной арматуры подтверждается исследованиями, в которых подчёркиваются ограничения традиционных стальных решений, связанные с коррозионной чувствительностью, повышенной трудоёмкостью монтажа и эксплуатационными затратами [1]. В этой связи использование композитных стержней в стыковых соединениях сборных конструкций рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений развития железобетонных систем.

Существенный вклад в формирование научной базы по данной тематике внесли исследования, посвящённые сцеплению и выдергиванию композитной арматуры из несущих строительных элементов. Работы [2] и [3] показали принципиальную возможность эффективного использования композитных стержней внутри конструкций и подтвердили работоспособность подобных решений по результатам экспериментальных испытаний на выдергивание. Аналогичные выводы получены и для полимерных композитных элементов, закреплённых в кладке: в исследовании [4] представлено экспериментальное изучение поведения углепластиковых полос, глубоко заложенных в глиняную кирпичную кладку и работающих при интенсивном выдергивающем воздействии. Отдельно следует отметить результаты работы [5], согласно которым качество сцепления композитных элементов с матрицей существенно зависит от подготовки поверхности, геометрии анкеровки и конфигурации усиливающих полос. Тем самым подтверждается, что несущая способность подобных узлов определяется не только прочностью материалов, но и параметрами контактной зоны.

Параллельно в литературе активно развиваются исследования клеевых и комбинированных соединений, применяемых в строительных конструкциях. В работах [6] и [7] рассмотрен опыт использования эпоксидных клеевых составов для соединения металлических элементов, а в исследовании [8] выполнен обобщающий анализ эксплуатационных свойств различных типов клеевых соединений с учётом влияния циклических нагрузок и внешних факторов. Решения для соединения бетонных элементов с применением эпоксидных составов представлены в [9] и [10], а в работе [11] показано, что сухие эпоксидные соединения сборных железобетонных блоков обладают несущей способностью, примерно на 27 % превышающей аналогичный показатель соединений без клеевого слоя. Особенно важными для рассматриваемой темы являются исследования [12] и [13], в которых продемонстрирована возможность соединения двух железобетонных элементов с использованием комбинации эпоксидного клея и композитной арматуры. Авторы отмечают, что такие решения обеспечивают требуемую прочность и жёсткость, а также существенно повышают скорость монтажа по сравнению с традиционными стальными аналогами. Теоретические и экспериментальные аспекты взаимодействия клеевых составов и армирующих материалов дополнительно рассмотрены в [14] и [15].

Широкий круг исследований посвящён также поиску эффективных конструктивных решений для сборных и комбинированных систем в условиях сложных эксплуатационных воздействий. Так, в работе [16] предложен сталежелезобетонный узел для сейсмостойких конструкций; в [17], [18] и [19] представлены подходы к узловым соединениям, обеспечивающие повышение сейсмостойкости, снижение остаточных деформаций и ускорение монтажа; в [20] подчёркивается сохраняющийся дефицит знаний о работе сухих болтовых соединений в сборном железобетоне. Исследования [21], [22]–[24] дополнительно подтверждают, что именно конструкция стыка во многих случаях определяет эффективность работы составного элемента и предел его практического применения. В совокупности эти данные свидетельствуют о высокой научной и инженерной значимости разработки соединительных узлов для сборных железобетонных систем.

В 2000-2020 годы заметно возросли возможности численного моделирования композитных и комбинированных конструкций. Для анализа работы строительных систем при сложных воздействиях успешно применяются методы конечных элементов, многоуровневое моделирование, гомогенизационные подходы и алгоритмы оптимизации [25]–[27]. В статьях [28] – [30] эти методы позволяют исследовать распределение напряжений, локализацию повреждений, влияние геометрии и параметров материалов, а также проводить параметрические исследования без чрезмерного увеличения объёма натурных испытаний. Вместе с тем применительно к соединениям сборных железобетонных элементов точность численных прогнозов по-прежнему

Tyukalov Y.; Ashikhmin S.

Reinforced concrete precast beam with a stepped joint;

2026; Construction of Unique Buildings and Structures; 122 Article No 12201. doi: 10.4123/CUBS.122.1

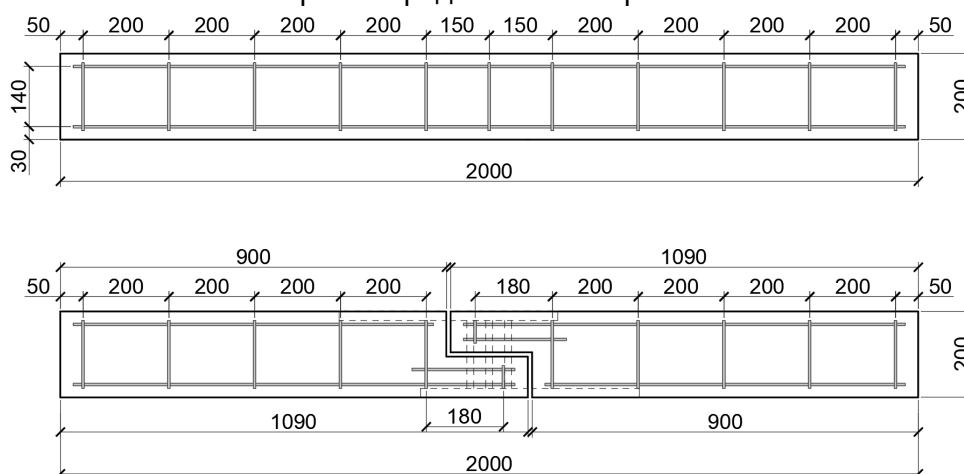
существенно зависит от качества экспериментальной верификации, поскольку реальные стыки чувствительны к технологическим дефектам, неоднородности бетона, фактической глубине анкеровки и особенностям контактного взаимодействия материалов.

Несмотря на значительный объём опубликованных работ, вопрос о работе составных железобетонных балок со ступенчатым соединением, усиленным композитной арматурой, остаётся изученным недостаточно полно. В частности, ограничены данные о несущей способности таких балок, характере их деформирования, механизме разрушения в зоне стыка и степени соответствия между результатами физического эксперимента и нелинейного численного моделирования. Недостаточная исследованность именно ступенчатых балочных соединений с композитными стержнями затрудняет разработку надёжных инженерных рекомендаций для их практического применения в быстровозводимых и сборных железобетонных системах.

В связи с этим целью настоящей работы является экспериментально-численная оценка несущей способности и деформативности составной железобетонной балки со ступенчатым стыком, армированной композитными стержнями. Для достижения поставленной цели были изготовлены и испытаны физические образцы составных и монолитных балок, выполнено численное моделирование методом конечных элементов и проведено сопоставление экспериментальных и расчётных данных. Научный интерес исследования заключается в выявлении особенностей напряжённо-деформированного состояния и механизма разрушения стыкового узла, а практическая значимость — в формировании предпосылок для разработки более эффективных и технологичных соединений элементов сборного железобетона.

## 2 Materials and Methods

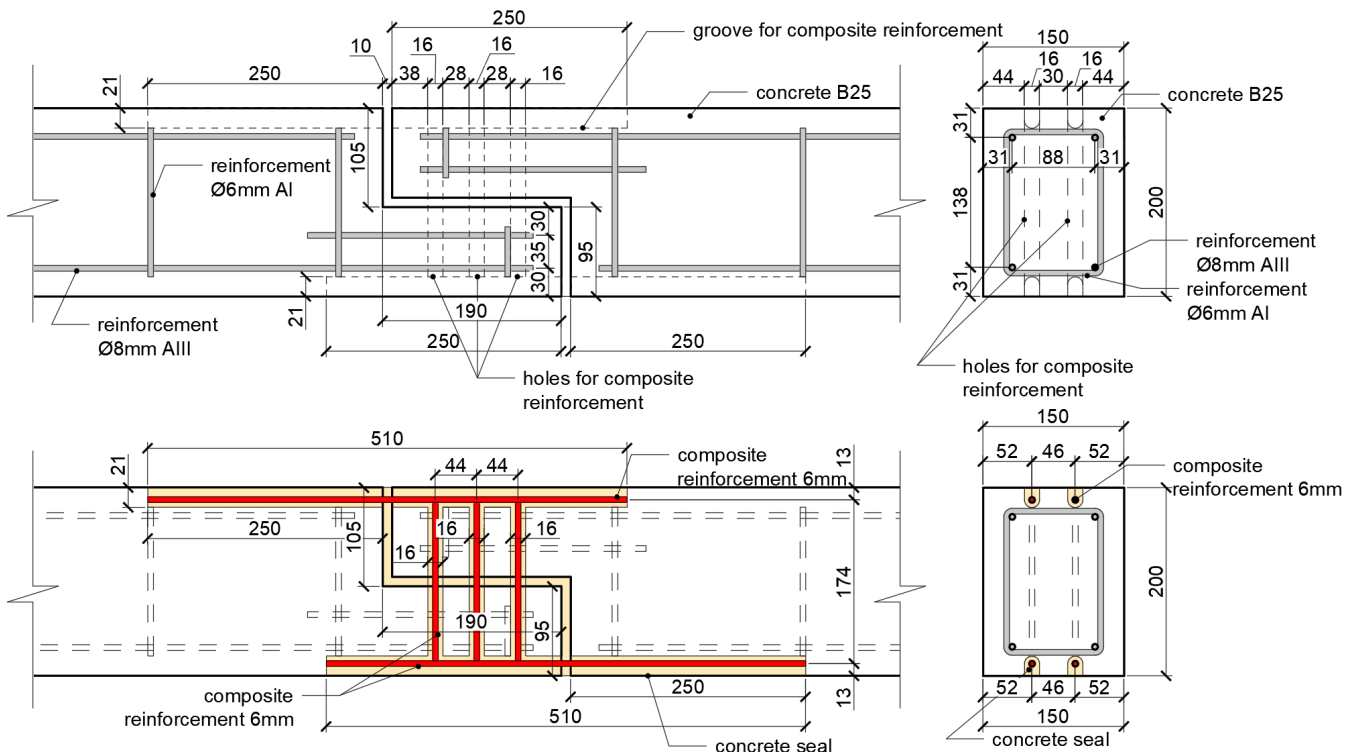
С целью оценки несущей способности и особенностей деформирования составных железобетонных балок со ступенчатым соединением, армированным композитными стержнями, было выполнено комплексное экспериментально-численное исследование. Программа работы включала изготовление опытных образцов, проведение лабораторных испытаний при статическом нагружении, а также построение и последующую калибровку численной модели методом конечных элементов. На рис. 1 представлены чертежи балок.



**Рис. 1 - Чертеж монолитной и составной балки**

**Fig. 1 - Drawing of a monolithic and composite beam**

Укрупненный узел составной железобетонной балки представлен на рис. 2.



**Рис. 2 - Укрупненные чертежи ступенчатого узла**

**Fig. 2 - Enlarged drawings of the stepped unit**

В рамках экспериментальной части были изготовлены четыре образца: один монолитный, принятый в качестве контрольного, и три составных. Контрольный образец представлял собой монолитную железобетонную балку размерами 2000 × 200 × 150 мм (длина × ширина × высота). Использование монолитной балки позволило получить базовые данные о работе цельного элемента и обеспечить корректное сопоставление с результатами испытаний составных конструкций (рис. 3).

Каждый составной образец состоял из двух железобетонных элементов, объединённых посредством ступенчатого стыка (рис. 3 – 5). Соединение частей балки осуществлялось с использованием композитной арматуры, устанавливаемой в заранее подготовленные отверстия и штробы с последующим замоноличиванием зоны сопряжения. Особое внимание при изготовлении образцов уделялось точности геометрических параметров, соблюдению проектного положения армирующих элементов и качеству выполнения стыкового узла, поскольку именно эти факторы в значительной степени определяют достоверность экспериментальных результатов и корректность их дальнейшей инженерной интерпретации.



**Рис. 3 - Внешний вид монолитной и составной балки**

**Fig. 3 - External appearance of monolithic and composite beams**

*Image by the author of the article*



**Рис. 4 - Внешний вид одной части составной балки**  
**Fig. 4 - External appearance of one part of a composite beam**  
*Image by the author of the article*



**Рис. 5 - Внешний вид ступенчатого узла**  
**Fig. 5 - External appearance of the stepped unit**  
*Image by the author of the article*

Для изготовления образцов применялся бетон класса В25. В качестве рабочей арматуры использовалась стальная арматура класса АIII диаметром 8 мм, а в качестве конструктивной — арматура класса АI диаметром 6 мм (Магнитогорский металлургический комбинат, Россия, Магнитогорск). Указанный набор материалов был принят исходя из необходимости воспроизведения условий, характерных для реальных строительных конструкций малых и средних пролётов.

Изготовление образцов выполнялось в лабораторных условиях. Опалубка формировалась из листовой фанеры и деревянных реек, что обеспечивало требуемую геометрическую точность и повторяемость формы. Арматурные каркасы собирались с использованием нейлоновых стяжек, позволивших надёжно зафиксировать армирующие элементы в проектом положении на стадии бетонирования.

Лабораторные испытания проводились на гидравлическом прессе П-50 (ООО ГК «АВЕРСЛабКомплект», Россия, Екатеринбург) с максимальным усилием до 500 кН. Нагрузку прикладывали ступенчато, с регистрацией соответствующих перемещений и визуальным контролем характера трещинообразования и разрушения. Точность контроля нагрузки составляла  $\pm 2\%$ . Измерение перемещений осуществлялось прибором с ценой деления 0.01 мм, что обеспечивало возможность регистрации начальных стадий деформирования и последующего нарастания прогибов в процессе нагружения (рис.6).



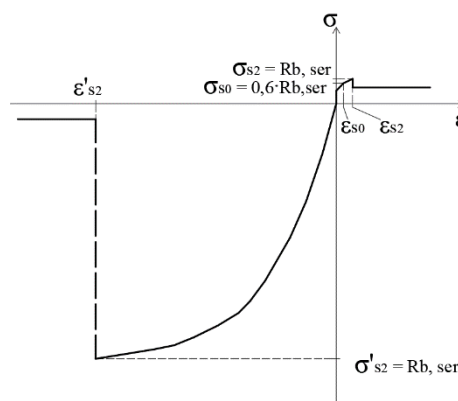
**Рис. 6 - Гидравлический пресс П-50**

**Fig. 6 - Hydraulic press P-50**

*Image by the author of the article*

Во время испытания был осуществлен контроль перемещений нагружающей нижней платформы гидравлического пресса П-50 с помощью индикатора часового типа ИЧ-50 (, цена деления 0.01мм, диапазон измерений 0-50мм (ЗАО «Кировский завод „Красный инструментальщик“, Россия, Киров). Вместе с этим, фиксировались показания на аналоговом циферблате гидравлического пресса П-50.

Наряду с физическим экспериментом было выполнено численное моделирование в программном комплексе **LIRA-SAPR** (<https://www.liraland.com>). Геометрия расчётной модели соответствовала фактическим размерам испытанных образцов. Бетон моделировался объёмными конечными элементами типа 244 с учётом физической нелинейности по 25-му экспоненциальному закону деформирования (рис. 7). Для объёмных конечных элементов был принят характерный шаг сетки 5 мм, что позволило детализировать напряжённо-деформированное состояние, прежде всего в зоне стыка.



*Рисунок ранее опубликован в статье Tyukalov, Y. and Ashikhmin, S. (2023) Quickly constructed joint of precast concrete arch elements. Construction of Unique Buildings and Structures; 107. <https://doi.org/10.4123/CUBS.107.3>.*

**Рис. 7 - Диаграмма нелинейного деформирования бетона**

**Fig. 7 - The non-linear deformation diagrams of concrete**

*Image by the author of the article*

Стальная и композитная арматура моделировались конечными элементами типа 10. Модуль упругости композитной арматуры принимался равным ( $4.5 \cdot 10^7$ ) кН/м<sup>2</sup>, стальной — ( $2.0 \cdot 10^8$ ) кН/м<sup>2</sup>. Численное моделирование использовалось для определения предельных нагрузок, анализа распределения напряжений и перемещений, а также для сопоставления расчётных результатов с данными натуральных испытаний.

### 3 Results and Discussion

Нагружающая платформа гидравлического пресса П-50 расположена в нижней части установки, вследствие чего испытание проводилось при следующей компоновке образцов. На платформе одновременно размещались монолитная и составная балки, а на крайних участках дополнительно устанавливались стальные подкладки, обеспечивавшие требуемый зазор и устойчивость системы в процессе нагружения (рис. 8).



**Рис. 8 - Схема проведения испытания**

**Fig. 8 - Test scheme**

*Image by the author of the article*

Экспериментально установлено, что предельная нагрузка для составных образцов составила порядка 25 кН. При приближении к разрушающему уровню нагрузки наблюдалось интенсивное развитие локальных повреждений в области стыка: образование наклонных и вертикальных трещин, частичное разрушение защитного слоя бетона, а также локальное отслоение материала вблизи соединительных элементов. После достижения предельного состояния фиксировался ускоренный рост перемещений, свидетельствующий о потере жёсткости и переходе конструкции в стадию разрушения (рис.9 – 10).



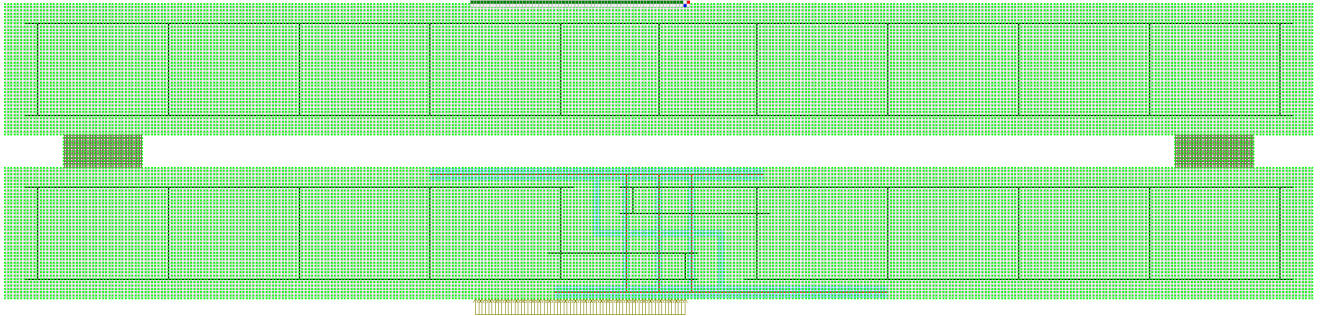
**Рис. 9 - Разрушение составной балки по стыку**  
**Fig. 9 - Destruction of a composite beam at a joint**  
*Image by the author of the article*



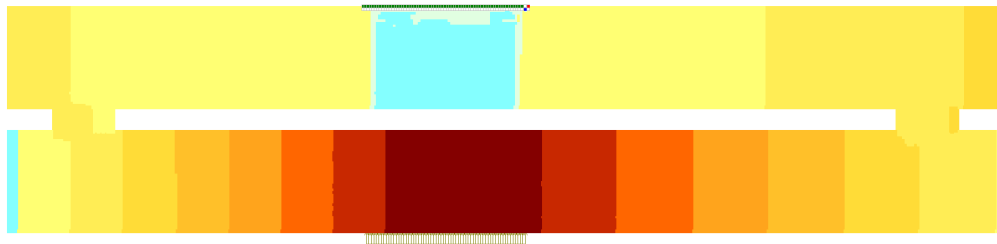
**Рис. 10 - Разрушение соединения (вид на арматуру)**  
**Fig. 10 - Destruction of the connection (view of the reinforcement)**  
*Image by the author of the article*

Полученные экспериментальные данные были использованы для уточнения расчётной модели. На основе калиброванной численной схемы выполнена серия расчётов, позволивших определить характер распределения перемещений и напряжений в объёме балки, а также

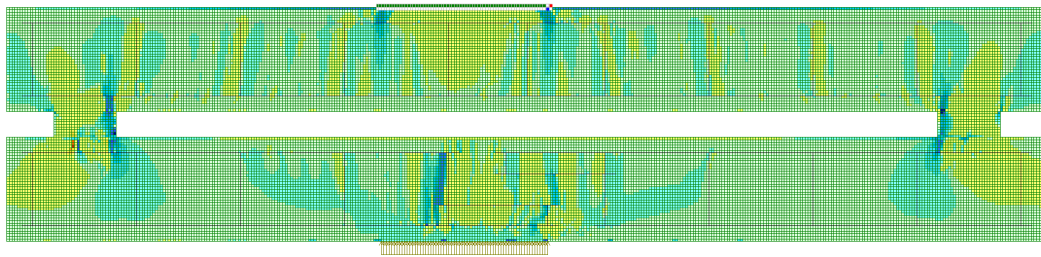
выявить наиболее напряжённые зоны конструкции. Результаты моделирования показали, что максимальные напряжения концентрируются в области ступенчатого соединения и в приповерхностной зоне анкеровки композитных стержней. Такое распределение напряжений согласуется с наблюдаемым в опытах характером разрушения и подтверждает, что именно стыковой узел является наиболее уязвимым элементом исследуемой системы (рис. 11-13).



**Рис. 11 - Численная модель испытания**  
**Fig. 11- Numerical model of testing**  
*Image by the author of the article*



**Рис. 12 - Перемещения в составной балке**  
**Fig. 12 - Displacements in a composite beam**  
*Image by the author of the article*

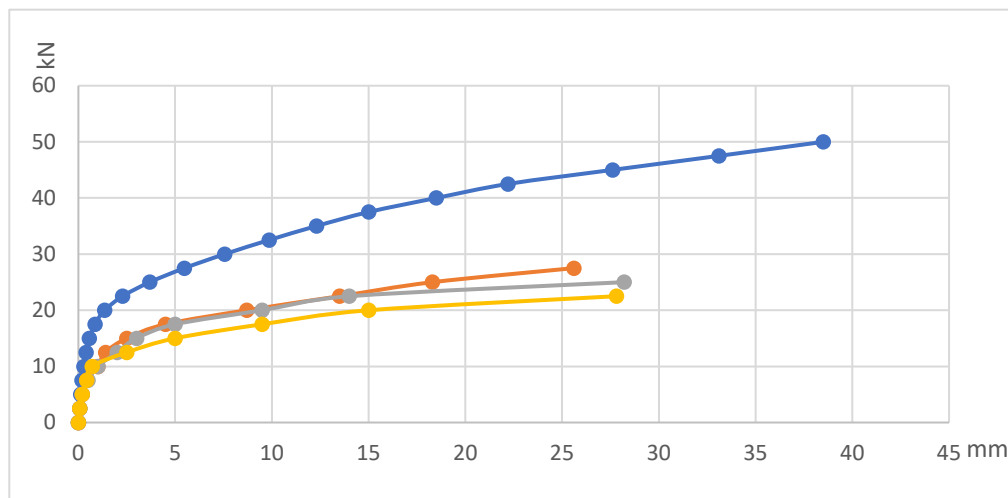


**Рис. 13 - Напряжения в объемных конечных элементах**

**Fig. 13 - Stresses in volumetric finite elements**

*Image by the author of the article*

Сопоставление результатов численного и физического экспериментов показало, что расчётная модель в целом корректно воспроизводит общую картину деформирования конструкции (рис. 14), однако количественные значения предельной нагрузки оказались завышенными. В среднем разрушающая нагрузка, полученная по результатам натурных испытаний, оказалась примерно в 1.8 раза ниже расчётной. Указанное расхождение может быть обусловлено рядом причин: неоднородностью бетонной структуры, технологическими отклонениями при изготовлении образцов, локальными дефектами в зоне стыка, неточностями в положении армирующих элементов, а также идеализированным описанием контактного взаимодействия материалов в рамках численной модели. Также необходимо отметить, что стыковое соединение сборной балки и колонны будет находиться в зоне, где изгибающие моменты близки к нулю, поэтому большая несущая способность в данном сечении не требуется.



**Рис. 14 - Перемещение центра балки. Синий – численный эксперимент, остальные цвета – лабораторный эксперимент**

**Fig. 14 - Displacement of beam center. Blue – numerical experiment, other color – laboratory experiment**

*Image by the author of the article*

Анализ результатов позволяет предположить, что одной из ключевых причин пониженной несущей способности составной балки является недостаточная глубина анкеровки композитной арматуры в зоне соединения. При таком конструктивном решении критические напряжения локализуются вблизи поверхности бетона, что способствует ускоренному развитию трещин и преждевременному разрушению узла. В связи с этим дальнейшие исследования целесообразно направить на увеличение глубины анкеровки композитных стержней, совершенствование схемы армирования и уточнение параметров контактной зоны. Реализация указанных мероприятий



может обеспечить более равномерное перераспределение усилий в объёме элемента и, как следствие, повышение несущей способности соединения.

Кроме того, представляется необходимым расширить программу численных исследований за счёт варьирования характеристик бетона, композитной арматуры и геометрии стыка, а также за счёт моделирования длительных и циклических воздействий. Такой подход позволит получить более полное представление о работе составных железобетонных балок со ступенчатыми соединениями и сформировать обоснованные инженерные рекомендации для их практического применения.

## 4 Conclusions

1. В работе выполнено комплексное экспериментально-численное исследование составной железобетонной балки со ступенчатым соединением, армированным композитными стержнями. Проведённые испытания и расчёты позволили установить особенности напряжённо-деформированного состояния конструкции, а также определить характер разрушения стыкового узла при статическом нагружении.
2. Сопоставление результатов физического эксперимента и численного моделирования показало, что расчётные значения предельной нагрузки превышают экспериментальные в среднем примерно в 1.8 раза. Установленное расхождение свидетельствует о необходимости дальнейшей калибровки численной модели с учётом технологических факторов изготовления, реальной неоднородности бетона, особенностей анкеровки композитной арматуры и параметров контактного взаимодействия материалов в зоне стыка.
3. Для исследованной конструктивной схемы предельная нагрузка составной балки составила порядка 25 кН. Полученный результат подтверждает принципиальную работоспособность предлагаемого решения, однако его практическое применение требует дальнейшей оптимизации параметров соединения, прежде всего глубины анкеровки композитных стержней и конфигурации армирования, а также выполнения уточнённых расчётов с учётом реальных условий эксплуатации. Стыковое соединение сборной балки и колонны будет находиться в зоне, где изгибающие моменты близки к нулю, поэтому большая несущая способность в данном сечении не требуется.

## References

1. Figueira, D., Ashour, A., Yildirim, G., Aldemir, A. and Şahmaran, M. (2021). Demountable connections of reinforced concrete structures: Review and future developments. *Structures*, **34(1)**, 3028–3039. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.053>
2. Saeedifar, M., Saleh, M. N., Nijhuis, P., de Freitas, S. T. and Zarouchas, D. (2022). Damage assessment of a titanium skin adhesively bonded to carbon fiber–reinforced plastic omega stringers using acoustic emission. *Structural Health Monitoring*, **21(2)**, 407–423. <https://doi.org/10.1177/14759217211001752>
3. Lamberti, M., Maurel-Pantel, A. and Lebon, F. (2023). Experimental and numerical evaluation of hydro-thermal ageing's effects on adhesive connections in offshore structures. *Ocean Engineering*, **290(4)**, 116303. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116303>
4. Akpinar, S., Demir, K., Gavgali, E. and Yetim, A. F. (2022). A study on the effects of nanostructure reinforcement on the failure load in adhesively bonded joints after the subjected to fully reversed fatigue load. *Journal of Adhesion*, **98(13)**, 1972–1997. <https://doi.org/10.1080/00218464.2021.1947811>
5. Younas, H., Yu, J. and Leung, C. K. Y. (2026). Enhancing bond performance of near surface mounted CFRP in high-strength strain-hardening cementitious composites (SHCC) through surface treatment. *Construction and Building Materials*, **514(8)**, 145534. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.145534>
6. Chernin, L., Newlands, M. and Khosravi, N. (2024). Flat-face epoxy-bonded concrete joints loaded in torsion: Physical modelling. *Construction and Building Materials*, **411**, 134558. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134558>



7. El-Naqeeb, M. H., Hassanli, R., Zhuge, Y., Ma, X. and Manalo, A. (2024). Numerical investigation on the behaviour of socket connections in GFRP-reinforced precast concrete. *Engineering Structures*, **303**, 117489. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117489>
8. Tyukalov, Y. and Ashikhmin, S. (2023) Quickly constructed joint of precast concrete arch elements. *Construction of Unique Buildings and Structures*; **107**. <https://doi.org/10.4123/CUBS.107.3>.
9. Ashikhmin S.E., Tyukalov, Yu. Ya. (2023) The joint of precast reinforcement frame elements using composite rods. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **4(109)**, 60. <https://doi.org/10.4123/CUBS.109.10>
10. Tadi Beni, M. B. and Madhkhan, M. (2022). Experimental study on two innovative ductile moment-resisting precast concrete beam-column connections. *Structures*, **39(12)**, 559–572. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.059>
11. Zhou, W., Xu, Z. and Ma, C. (2022). Flexural behavior of precast concrete beams in-span assembled with bolt-steel plate joints. *Structures*, **43(4)**, 1291–1304. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.07.067>
12. Hassanli, R., Vincent, T., Manalo, A., Smith, S. T., Gholampour, A., Gravina, R. and Zhuge, Y. (2021). Connections in GFRP reinforced precast concrete frames. *Composite Structures*, **276(4)**, 114540. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114540>
13. Lu, X. Z., Teng, J. G., Ye, L. P. and Jiang, J. J. (2020). Analytical modelling of bond-slip failure between epoxy bonded FRP and concrete substrate. *Composite Structures*, **251(6)**, 112596. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.112596>
14. Abd El-Hameed, S., Eladawy, M., Agamy, M. H. and Haggag, H. (2022). Experimental and numerical investigation on the performance of adhesive steel-dowels used in precast reinforced concrete elements. *Structures*, **40(2)**, 49–63. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.04.006>
15. Lu, K., Xu, Q., Wang, M., Yao, Y. and Wang, J. (2021). Anchorage performance of bolt connection embedded in thin UHPC members. *Structures*, **34(2)**, 1253–1260. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.060>
16. Wang, S., Deng, Z., Fan, B. and Cheang, I. (2026). Numerical study on seismic performance of a novel self-centering steel-concrete composite joint. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **30(3)**, 100393. <https://doi.org/10.1016/j.kscej.2025.100393>
17. Park, S. and Clayton, P. (2025). Effects of bolted double-angle gravity connections with floor systems on building seismic performance. *Journal of Building Engineering*, **111(1)**, 113569. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113569>
18. Saibabu, S., Srinivas, V., Sasmal, S., Lakshmanan, N. and Iyer, N. R. (2013). Performance evaluation of dry and epoxy jointed segmental prestressed box girders under monotonic and cyclic loading. *Construction and Building Materials*, **38(4)**, 931–940. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.068>
19. Nascimbene, R. and Bellotti, D. (2026). Innovative beam-column joint solutions for precast frames under seismic loading. *Procedia Structural Integrity*, **78(5)**, 193–198. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.12.025>
20. Jeon, S. H., Moon, H. D., Sim, C. and Ahn, J. H. (2021). Construction stage analysis of a precast concrete buried arch bridge with steel outriggers from full-scale field test. *Structures*, **29(8)**, 1671–1689. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.050>
21. Wong, R. W. M. and Loo, B. P. Y. (2026). Evaluation of the flexural behavior of precast concrete reinforced beams encased with cold-formed steel channels. *Structures*, **85**, 111139. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134486>
22. Zhang, C., Shi, F., Cao, P. and Liu, K. (2022). The fracture toughness analysis on the basalt fiber reinforced asphalt concrete with prenotched three-point bending beam test. *Case Studies in Construction Materials*, **16(2)**, e01079. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01079>
23. Mrozek, M. and Mrozek, D. (2020). Analysis of location of composites reinforcement of masonry structures with use topological optimization. *Applications in Engineering Science*, **3(3)**, 100015. <https://doi.org/10.1016/j.apples.2020.100015>
24. Pisapia, A., Fabbrocino, F. and Piluso, V. (2026). Stiffness evaluation of floor diaphragms. *Procedia Structural Integrity*, **78(5)**, 568–575. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.12.073>
25. Wang, Y., Khan, M., Uy, B., Lim, L., Thai, H. T. and Ngo, T. (2025). Behaviour, design and performance of steel-concrete composite walls in fire. *Journal of Constructional Steel Research*, **227(3)**, 109408. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109408>

Tyukalov Y.; Ashikhmin S.

Reinforced concrete precast beam with a stepped joint;

2026; Construction of Unique Buildings and Structures; 122 Article No 12201. doi: 10.4123/CUBS.122.1



26. Sui, F., Guo, R., Zhang, Z., Gu, G. X. and Lin, L. (2021). Deep Reinforcement Learning for Digital Materials Design. *ACS Materials Letters*, **3(10)**, 1433–1439. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.1c00390>
27. Janiak, T., Christou, G. and Classen, M. (2025). Web openings in inverted steel and concrete composite beams – Experimental insights and numerical simulation. *Engineering Structures*, **333(1)**, 120127. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120127>
28. Zhang, Y., Guo, J., Shu, Z., Guan, Y. and Ademiloye, A. S. (2025). Fracture simulation of fiber reinforced composite panels with holes. *Composite Structures*, **351(2)**, 118627. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118627>
29. Zheng, Y., Qiu, W., Liu, X., Huang, Z. and Xia, L. (2025). Topology optimization design of frame structures based on the Direct FE2 method. *Materials and Design*, **254**, 114091. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113546>
30. He, T., Karamian-Surville, P. and Choï, D. (2025). Phantom Domain Finite Element Method: A novel approach for heterogeneous materials. *Applications in Engineering Science*, **22(4)**, 100218. <https://doi.org/10.1016/j.apples.2025.100218>