

Трещинообразование узлов сопряжения стержневых элементов из тяжелого бетона при статическом и статико-динамическом нагружении

Павел Анатольевич Кореньков¹, Наталия Витальевна Федорова¹,
Татьяна Александровна Ильющенко²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Курский государственный университет (КГУ); г. Курск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В связи с постоянным ув6-166-16белчением на здания и сооружения запроектных влияний техногенного и природного характера актуальным направлением повышения их безопасности является проведение экспериментальных исследований строительных конструкций, направленных на защиту от таких воздействий. Важнейшим элементом рассматриваемых конструктивных систем служат соединения их элементов, которые должны обеспечивать безопасность каркасов при различных, включая особые, воздействиях. Это связано с необходимостью более полной оценки их трещиностойкости при особых воздействиях.

Материалы и методы. Экспериментальное исследование проводилось на специально разработанной установке, позволяющей моделировать напряженно-деформированное состояние ригеля, как в эксплуатационной стадии, так и при аварийном влиянии. При осуществлении эксперимента на различных этапах загрузки проектной нагрузкой и после аварийного воздействия измерены деформации 1542-1552 бетона и арматуры, вертикальные и горизонтальные перемещения элементов узла, зафиксирована схема образования, развития и раскрытия трещин.

Результаты. Выполнено исследование узлов сопряжения стержневых элементов из тяжелого бетона при статическом и статико-динамическом нагружении. Получены результаты экспериментальных исследований трещиностойкости, развития и раскрытия трещин, а также картины трещинообразования узлов сопряжения стержневых элементов при статическом и статико-динамическом нагружении.

Выводы. Отмечен схожий характер трещинообразования в узлах сопряжения при статическом и статико-динамическом нагружении в ригелях и колоннах. Отличным является расположение нормальных трещин в колоннах, что объясняется многоступенчатостью и временным интервалом приложения статической нагрузки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетонные конструкции, сложное напряженное состояние, углы поворота, прогибы, раскрытие пространственных трещин, экспериментальная проверка расчетной модели

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-49-10010 (URL: <https://rscf.ru/project/24-49-10010/>).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кореньков П.А., Федорова Н.В., Ильющенко Т.А. Трещинообразование узлов сопряжения стержневых элементов из тяжелого бетона при статическом и статико-динамическом нагружении // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 10. С. 1542–1552. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1542-1552

Автор, ответственный за переписку: Павел Анатольевич Кореньков, kra_gbk@mail.ru.

Crack formation in heavy concrete reinforcing bar connection joints under static and static-dynamic loading of reinforced concrete structures

Pavel A. Korenkov¹, Natalia V. Fedorova¹, Tatiana A. Iliushchenko²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Kursk State University (KSU); Kursk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Due to the constant increase in design-exceeding technogenic and natural impacts on buildings and structures, an important direction for improving their safety is to conduct experimental research on structural elements designed to protect against such impacts. The most critical components of these structural systems are the connection joints between their elements, which must ensure the safety of the frames under various, including extreme, conditions. This necessitates a more comprehensive assessment of their crack resistance under special impacts.

Materials and methods. The experimental study was conducted on a specially designed test setup capable of simulating the stress-strain state of a beam both under service conditions and under emergency impacts. During the test, at various stages of loading with the design load and after the emergency impact, the following parameters were measured: strains in the concrete and reinforcement, vertical and horizontal displacements of the joint elements. The pattern of crack formation, propagation, and width was also recorded.

Results. A study was conducted on the connection joints of heavy concrete bar elements under static and static-dynamic loading. The results of experimental investigations into crack resistance, as well as the development, width, and patterns of crack formation in the connection nodes under these loading conditions, are presented.

Conclusions. The study results indicated a similar pattern of crack formation in the connection joints of beams and columns under both static and static-dynamic loading. A difference was observed in the location of flexural cracks in the columns, which is explained by the multi-stage nature and the time interval of the static load application.

KEYWORDS: reinforced concrete structures, complex stress state, rotation angles, deflections, opening of spatial cracks, experimental verification of the calculation model

Acknowledgements. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-49-10010 (URL: <https://rscf.ru/project/24-49-10010/>).

FOR CITATION: Korenkov P.A., Fedorova N.V., Iliushchenko T.A. Crack formation in heavy concrete reinforcing bar connection joints under static and static-dynamic loading of reinforced concrete structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(10):1542-1552. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1542-1552 (rus.).

Corresponding author: Pavel A. Korenkov, kpa_gbk@mail.

ВВЕДЕНИЕ

Решению задач, сопряженных с проблемой обеспечения живучести несущих систем зданий и сооружений в особых расчетных ситуациях, в последние годы уделяется все большее внимание как в отечественных [1–3], так и зарубежных работах [4–6]. Как показывает ряд последних исследований [7], понятие «живучесть» открывает новое отдельное направление в области механической безопасности зданий и сооружений, связанное, в первую очередь, с развитием физических моделей механической безопасности для сооружений из различных материалов [8]. Поэтому необходимы исследования по решению задач указанной проблемы, ориентированные на совершенствование и создание современных способов защиты каркасов различных зданий от особых воздействий. По результатам этих и других исследований предложены различные способы защиты железобетонных (ЖБ) каркасов зданий от прогрессирующего обрушения при особых воздействиях. В частности, известны предложения по увеличению сечений конструктивных элементов зданий [9, 10], усилению элементов ЖБ конструктивных систем установкой косвенной арматуры [11], предварительно напряженной арматуры в ригелях [12], использование высокопрочного железобетона [13].

Что касается изучения элементов конструкций из высокопрочного ЖБ, то можно отметить работы [14, 15], в которых рассматриваются вопросы обеспечения конструктивной безопасности, создания новых расчетных моделей из такого материала. В трудах [16, 17] представлены расчетные модели теории ЖБ при различных напряженных состояниях и режимах длительного сопротивления. Следует выделить и ряд зарубежных исследований, посвященных сопротивлению конструкций прогрессирующему обрушению из высокопрочного ЖБ [18–20].

Важнейшим элементом рассматриваемых конструктивных систем являются соединения их элемен-

тов, которые должны обеспечивать безопасность каркасов при различных, включая особые, воздействиях. Известны отечественные публикации по изучению узлов сопряжения конструктивных элементов ЖБ каркасов зданий при запроектных воздействиях. Так, проводились исследования работы узлового сопряжения ригелей и колонн в сборно-монолитном ЖБ каркасе с использованием программных комплексов [21] и экспериментальные исследования [22, 23], в которых рассматривались узлы сопряжения ЖБ каркасов многоэтажных зданий при запроектных и трехкратных динамических воздействиях. Большая часть зарубежных исследований посвящена анализу сборных ЖБ узлов сопряжения ригелей и колонн [24, 25]. Можно отметить численное изучение механизма разрушения узла сопряжения ригеля и колонны при динамическом воздействии на ригель [26].

Среди исследований соединения конструктивных элементов из высокопрочного ЖБ имеются отдельные зарубежные работы по экспериментально-теоретическому изучению узлов сопряжений колонны из высокопрочного ЖБ и стальной балки в условиях сейсмики [27], стальной колонны круглого сечения и балки из высокопрочного ЖБ [28], сейсмостойкости узла соединения балка – колонна из высокопрочного фибробетона [29].

В то же время, как показали эти труды и анализ [21], изучение узлов сопряжения конструктивных элементов из высокопрочного ЖБ при запроектных воздействиях даст возможность наибольшим образом раскрыть особенности сопротивления всей конструктивной системы. В связи с этим в настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований узлов сопряжения стержневых элементов из тяжелого бетона при статическом и статико-динамическом нагружении.

Рассмотрены и решены следующие задачи: получены результаты экспериментальных исследований трещиностойкости, развития и раскрытия тре-

щин, а также картины трещинообразования узлов сопряжения стержневых элементов при статическом и статико-динамическом нагружении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На основании разработанной ранее методики проведения экспериментальных исследований узлов сопряжения¹ выполнена качественная и количественная оценка трещинообразования узлов сопряжения

¹ Патент RU № 2841155 С1, МПК G01М 99/00. Способ экспериментального определения динамических догрузений в несущих конструктивных элементах монолитных железобетонных каркасов / В.И. Колчунов, П.А. Кореньков, И.М. Безгодов, С.Р. Меликсетян; заявитель Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; заявл. от 22.11.2024; опубл. 03.06.2025. EDN DPABYG.

стержневых элементов из тяжелого бетона при статическом и статико-динамическом нагружении. На рис. 1 приведена схема испытаний узла, позволяющая моделировать напряженно-деформированное состояние (НДС) ригеля, как в эксплуатационной стадии, так и при аварийных воздействиях с учетом того, что в процессе нагружения в ригелях рамных каркасов зданий над местом начального локального разрушения могут последовательно быть реализованы следующие стадии НДС: изгибаная до достижения текучести в стержнях продольной растянутой арматуры; арочная до достижения прогибом величины, равной высоте сечения ригеля, а применительно к испытаниям узлов — до разрушения бетона сжатой зоны; цепная до момента обрыва наиболее растянутой арматуры. Это достигается посредством ограничения смещения торцов узла по горизонтали с одновременной возможностью поворота в плоско-

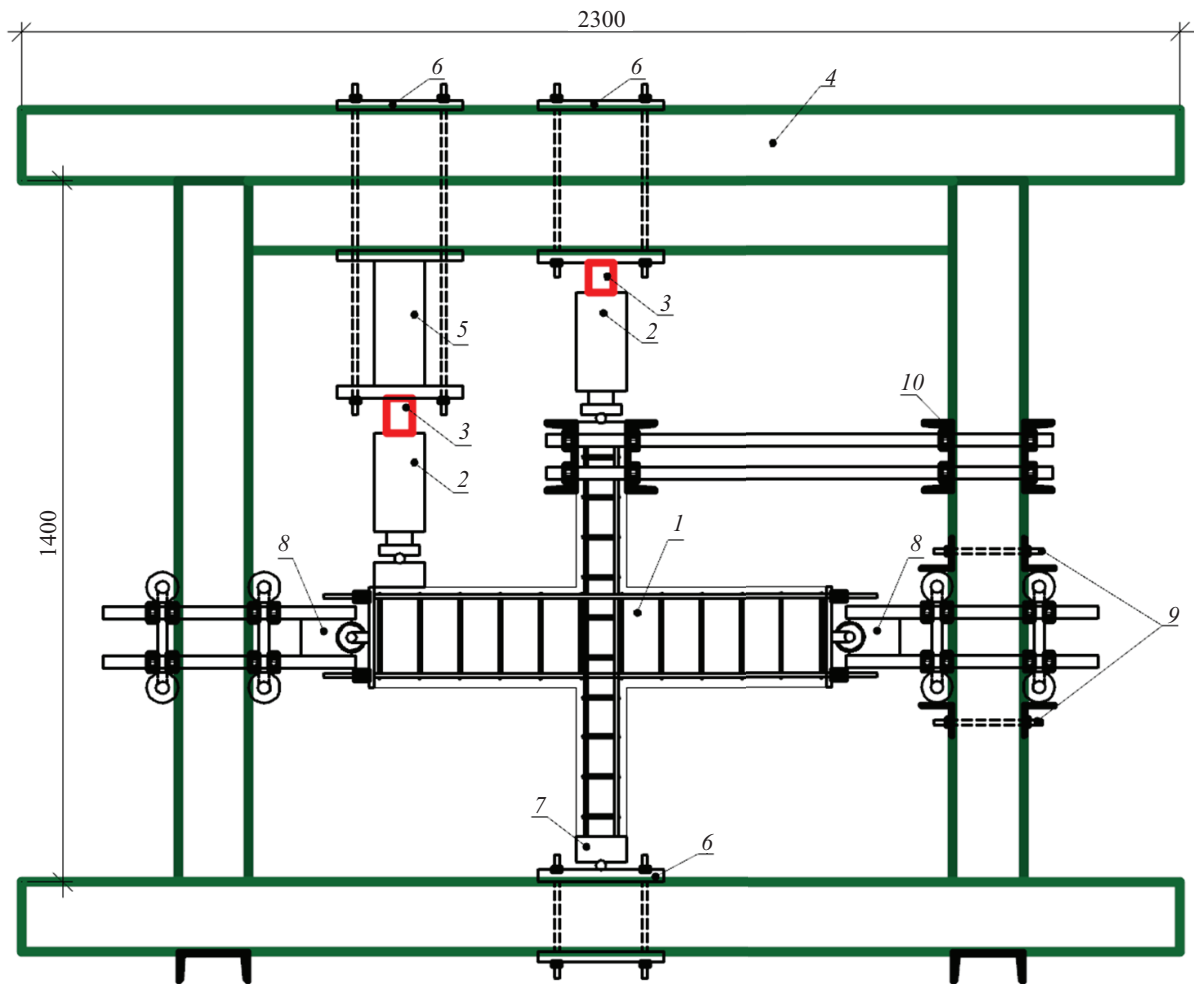


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки: 1 — опытная конструкция; 2 — гидравлический домкрат; 3 — датчик силы; 4 — силовая рама; 5 — упор гидравлического домкрата; 6 — распределительные пластины; 7 — металлические пластины; 8 — устройство двусторонних линейных связей; 9 — ограничитель вертикальных перемещений; 10 — ограничитель горизонтальных перемещений

Fig. 1. General view of the experimental setup: 1 — experimental structure; 2 — hydraulic jack; 3 — force sensor; 4 — load frame; 5 — hydraulic jack stop; 6 — distribution plates; 7 — metal plates; 8 — bilateral linear linkage device; 9 — vertical displacement limiter; 10 — horizontal displacement limiter

Значения нагрузок и изгибающих моментов на ступенях при статическом нагружении

Values of loads and bending moments on steps under static loading

Номер ступени Step number	Нагрузка P , кН Load P , kN	Момент M , кНм Moment M , kNm	Номер ступени Step number	Нагрузка P , кН Load P , kN	Момент M , кНм Moment M , kNm
I	2,84	0,99	VI	15,74	5,51
II	5,53	1,94	VII	18,53	6,49
III	7,87	2,75	VIII	21,27	7,44
IV	10,81	3,78	IX	23,71	8,30
V	13,2	4,62	X	26,4	9,24

сти изгиба с перемещением по вертикали с помощью опор качения, закрепленных на раме.

В процессе испытаний на различных этапах загрузки проектной нагрузкой и после аварийного воздействия были измерены деформации бетона и арматуры, вертикальные и горизонтальные перемещения элементов узла, зафиксирована схема образования, развития и раскрытия трещин. Величина нагрузки P на ступенях представлена в таблице.

При приложении проектной нагрузки в виде сосредоточенных сил (по две силы в каждом пролете ригеля) общая картина трещинообразования соответствовала характеру НДС в элементах рамы как первой, так и второй серии.

В ЖБ элементах в зависимости от внешних силовых воздействий принято различать трещины трех типов: первый — нормальные к продольной оси элемента, пересекающие продольную и поперечную арматуру; образуются на участках, где момент трещинообразования превышает действующий, а перерезывающая сила не превышает значений, при которых происходит трещинообразование в наклонных сечениях. Второй соответствует наклонным трещинами в зоне совместного действия изгибающего момента и перерезывающей силы, значения которых превышают момент трещинообразования как нормальных, так и наклонных трещин. В третьем значения изгибающего момента не превышают момента трещинообразования, а величина поперечной силы выше, чем сопротивление раскрытию наклонной трещины в бетоне. Однако озвученная классификация касается элементов, испытывающих в основном изгиб. В рассматриваемых узловых соединениях имеет место также влияние продольной силы в колонне, что в значительной степени усложняет напряженное состояние.

Первые трещины в образце, загружаемом статической силой, образовались на III ступени от действия изгибающего момента, превышающего $M_{crc,beam} = 2,52$ кН·м, и развиваясь вдоль грани колонны на величину $h_{crc} = 97$ мм на V ступени, после чего возникает вторая нормальная трещина на расстоянии $l_{crc1} = 75$ мм от грани колонны и доходит до оси арматуры, далее на VI ступени ее направление меняется и ее развитие продолжается под углом 36° к продольной оси ригеля, на этой же ступени длина первой трещины увеличива-

ется до $h_{crc} = 124$ мм, а ширина раскрытия составляет $a_{crc} = 0,2$ мм (рис. 2).

На VII ступени образовалась третья нормальная трещина на расстоянии от второй $l_{crc2} = 66$ мм на глубину защитного слоя, при этом величина смещения $\Delta l_{crc1} = 2,66$ мм, а $\Delta l_{crc2} = 4,85$ мм относительно первой трещины, в то же время высота первой трещины увеличилась на максимальную величину $h_{crc} = 138$ мм, что соответствует $a_{crc} = 0,3$ мм, после чего увеличивалась только ширина ее раскрытия на IX и X ступенях нагружения с максимальной $a_{crc} = 0,4$ мм. Также на VII ступени образовались нормальные трещины на глубину $h_{crc4} = h_{crc5} = 18$ мм в колонне шириной $a_{crc} = 0,01$ мм, первая по границе ригеля, вторая на расстоянии $l_{crc} = 28$ мм (трещины 4 и 5 соответственно), что свидетельствует о превышении момента трещинообразования $M_{crc,col} = 0,76$ кН·м в колонне при действующей продольной силе $N = 12,5$ кН.

На VIII ступени произошло увеличение глубины трещины $h_{crc2} = 105$ мм под тем же углом 36° и увеличение глубины трещины $h_{crc3} = 93$ мм практически по нормали к продольной оси ригеля. Также на данной ступени от совместного действия сжимающих и растягивающих напряжений образовалась наклонная трещина № 6 в узловой зоне ригеля и колонны шириной $a_{crc} = 0,1$ мм.

На IX ступени произошло приращение до максимального значения глубины приращения трещин 2 и 3 $h_{crc2} = h_{crc3} = 119$ мм, при этом угол наклона трещины № 2 не изменился, а трещины № 3 с практически вертикального изменился до 66° к нормали сечения, что объясняется направлениями главных растягивающих напряжений. Также отмечается образование двух новых трещин в колонне под ригелем глубиной от $h_{crc7} = 22$ мм до $h_{crc7} = 50$ мм с незначительной шириной раскрытия $a_{crc7} = 0,01$ мм и $a_{crc7} = 0,05$ мм. На этой ступени продолжилось и развитие наклонной трещины внутри узла к левой нижней грани.

На последней X ступени, помимо развития всех описанных трещин, к внутреннему левому углу соединения ригеля и колонны также трещина № 3 получила развитие в сторону поверхности ригеля под углом 36° к нормали сечения, кроме этого, образовались две новые: одна (№ 9) сжатия вдоль арматуры колонны глубиной $h_{crc9} = 130$ мм и шириной раскрытия $a_{crc9} = 0,30$ мм, и вторая (№ 10) параллельно уже

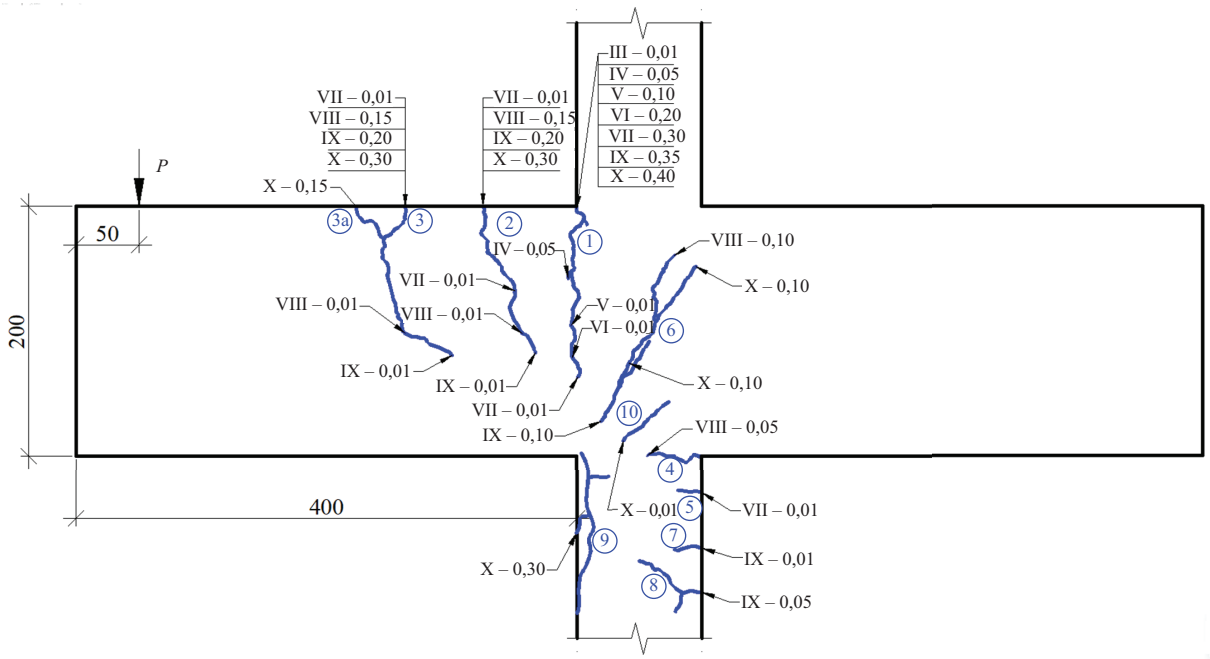


Рис. 2. Схема образования и раскрытия трещин всех типов при статическом нагружении
Fig. 2. Scheme of formation and opening of cracks of all types under static loading

имеющейся трещине № 6 на расстоянии $l_{cr} = 31$ мм от значительной величины сдвигающих усилий. Значение нагрузки и действующего изгибающего момента на каждой ступени приведено в таблице. Схема приложения нагрузки, образования и раскрытия трещин всех типов при проектной на-

грузке показана на рис. 2 для опытного образца, загруженного статической нагрузкой. Общий вид образца после испытаний представлен на рис. 3. На следующем этапе экспериментальных исследований был испытан аналогичный узел, но нагружение осуществлялось с нуля до уровня, соот-

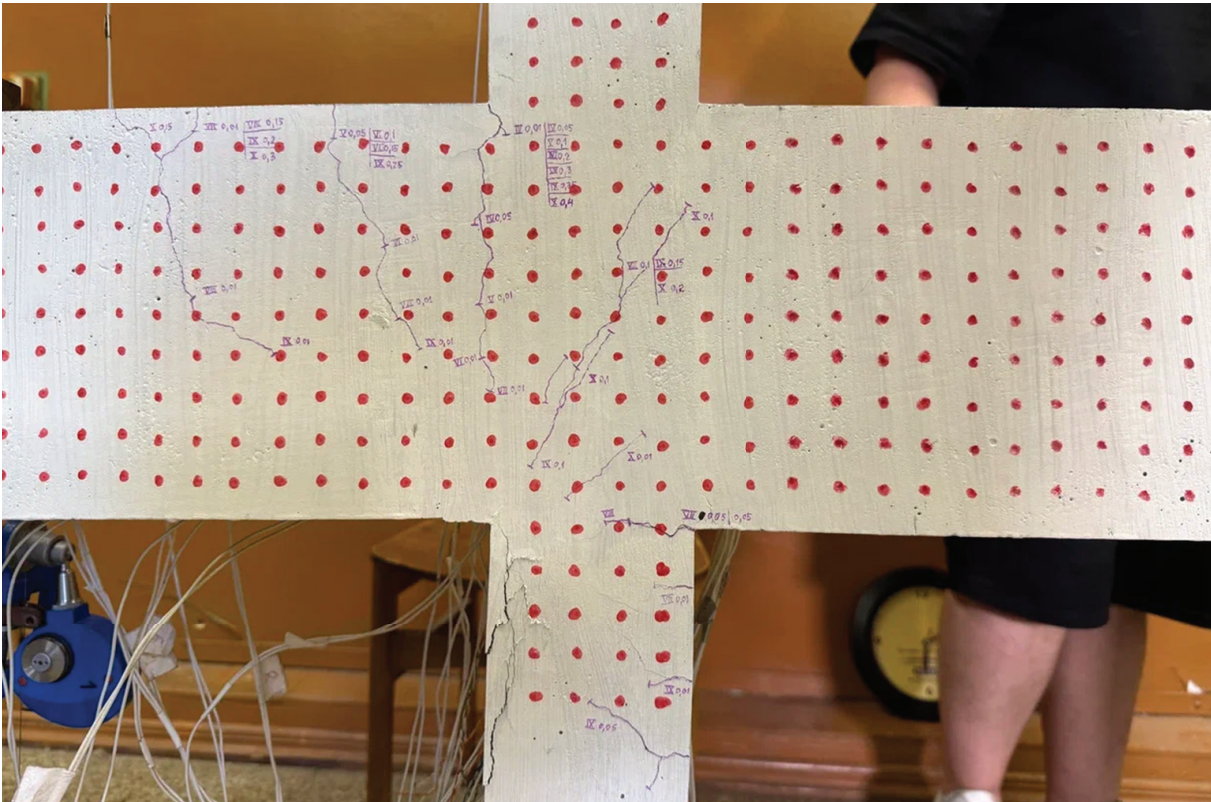


Рис. 3. Общий вид образования трещин при испытании статической нагрузкой
Fig. 3. General appearance of crack formation during static load testing



Обобщая анализ трещинообразования при статическом и статико-динамическом нагружении, можно отметить схожий характер расположения трещин, но отличающийся в расположении нормальных трещин в колонне. При статическом нагружении они располагались под ригелем, а при статико-динамическом — над ригелем в зоне максимального и изгибающего момента в колонне. Также носят повторяющийся характер вертикальные трещины в колоннах, возникающие от сжатия. Нормальные и наклонные трещины в ригеле и узловых зонах имеют схожие углы наклона, differing количеством и шириной раскрытия (при статическом нагружении больше трещин и меньше ширина их раскрытия, при статико-динамическом — меньше трещин, но больше ширина раскрытия), что объясняется многоступенчатостью приложения статической нагрузки, большим временным интервалом, в течение которого происходило поглощение энергии на раскрытии пластических шарниров, а также постепенное образование новых трещин

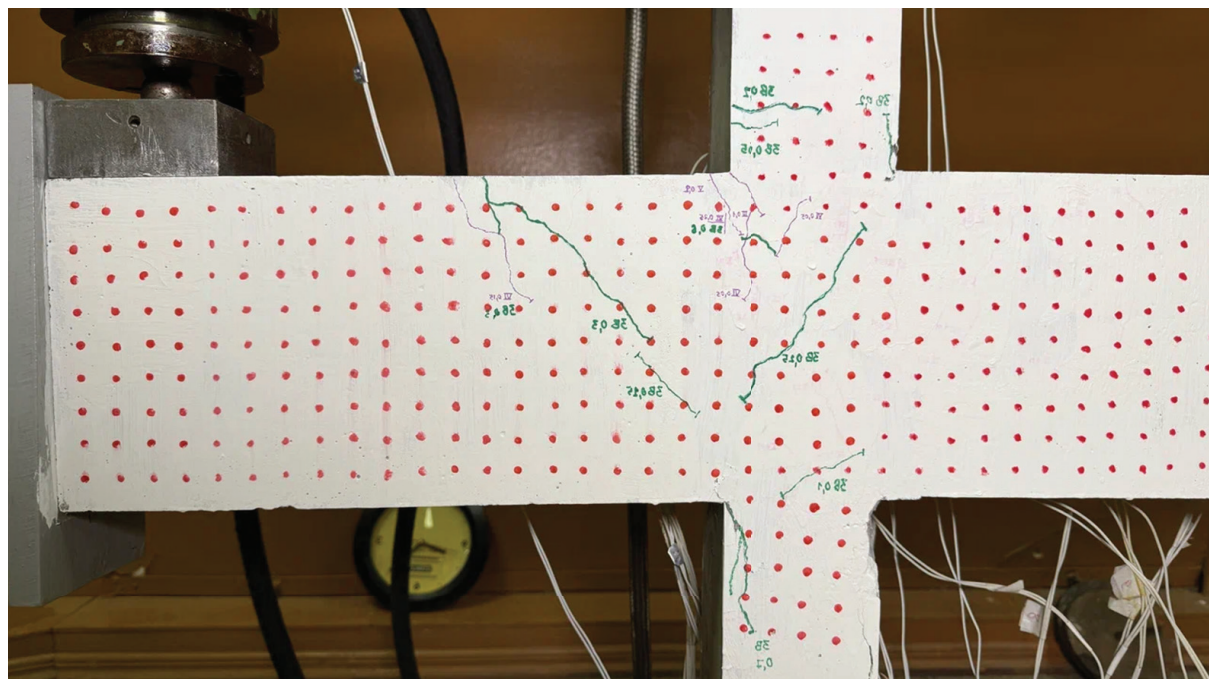


Рис. 5. Общий вид образования трещин при испытании статико-динамической нагрузкой

Fig. 5. General view of crack formation during static-dynamic load testing

и раскрытие уже существующих. При статико-динамическом режиме нагружения поглощение энергии деформации произошло за счет образования новых трещин с небольшим раскрытием и последующим закрытием до прежних значений трещин, возникших в процессе эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведения экспериментального исследования узлов сопряжения стержневых элементов из тяжелого бетона при статическом и статико-дина-

мическом нагружении получены результаты трещиностойкости, развития и раскрытия трещин, а также картины трещинообразования узлов сопряжения стержневых элементов при статическом и статико-динамическом нагружении. По результатам исследования отмечен схожий характер трещинообразования в узлах сопряжения при статическом и статико-динамическом нагружении в ригелях и колоннах. Отличительным является расположение нормальных трещин в колоннах, что объясняется многоступенчатостью и временным интервалом приложения статической нагрузки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колчунов В.И., Ильющенко Т.А., Федорова Н.В., Савин С.Ю., Тур В.В., Лизогуб А.А. Живучесть конструктивных систем зданий и сооружений: аналитический обзор исследований // Строительство и реконструкция. 2024. № 3 (113). С. 31–71. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-113-3-31-71. EDN FHLGWN.
2. Савин С.Ю., Шарипов М.З., Московцев В.С. Экспериментально-теоретическое исследование несущей способности длительно нагруженных железобетонных сжатых элементов при динамическом воздействии // Строительство и реконструкция. 2025. № 2 (118). С. 65–80. DOI: 10.33979/2073-7416-2025-118-2-65-80. EDN TBTLKB.
3. Травуш В.И., Колчунов В.И., Леонтьев Е.В. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в рамках законодательных и нормативных требований // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С. 46–54. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.02.46-54. EDN YXLQNV.
4. Sadek F., Bao Y., Main J.A., Lew H.S. Evaluation and enhancement of robustness for reinforced concrete buildings // Journal of Structural Engineering. 2022. Vol. 148. Issue 1. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0003226
5. Riedel K., Vollum R., Izzuddin B., Rust G. Robustness assessment of precast concrete connections using component-based modelling // Structures. 2024. Vol. 59. P. 105689. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105689
6. Zhao Z., Cheng X., Li Y., Diao M., Liu Y., Zhang W. Robustness analysis of dynamic progressive collapse of precast concrete beam–column assemblies using dry connections under uniformly distributed load // Engineering Structures. 2025. Vol. 323. P. 119206. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.119206

7. Карпенко Н.И., Белостоцкий А.М., Павлов А.С., Акимов П.А., Карпенко С.Н., Петров А.Н. Обзор методов расчета железобетонных конструкций при сложных напряженных состояниях с учетом физической нелинейности, анизотропии и конструктивной неоднородности. Часть 1: Разработки отечественных ученых // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году : сб. науч. тр. РААСН. Т. 2. 2020. С. 255–265. EDN WVFNAE.

8. Колчунов В.И., Тур В.В. Направления проектирования конструктивных систем в особых расчетных ситуациях // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 7. С. 5–15. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.07.05-15. EDN RNQPRJ.

9. Алмазов В.О., Плотников А.И., Расторгуев Б.С. Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению // Вестник МГСУ. 2011. Т. 1. № 2. С. 16–20. EDN OUVYJV.

10. Nav F.M., Usefi N., Abbasnia R. Analytical investigation of reinforced concrete frames under middle column removal scenario // Advances in Structural Engineering. 2018. Vol. 21. Issue 9. Pp. 1388–1401. DOI: 10.1177/1369433217746343

11. Федорова Н.В., Фан Д.К., Нгуен Т.Ч. Экспериментальные исследования живучести железобетонных рам с ригелями, усиленными косвенным армированием // Строительство и реконструкция. 2020. № 1 (87). С. 92–100. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-87-1-92-100. EDN ITILDU.

12. Fedorova N.V., Iliushchenko T.A. Influence of pre-stressing over parameters of diagram of static-dynamic deformation of RC elements // IOP Conference Series : materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687. Issue 3. P. 033033. DOI: 10.1088/1757-899X/687/3/033033

13. Deng X.-F., Liang S.-L., Fu F., Qian K. Effects of high-strength concrete on progressive collapse resistance of reinforced concrete frame // Journal of Structural Engineering. 2020. Vol. 146. Issue 6. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002628

14. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов В.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Коноров А.В. Основные результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций из высокопрочного бетона В100 круглого и кольцевого сечений при кручении с изгибом // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 1. С. 51–61. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-1-51-61. EDN YZIQCD.

15. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kapriyelov S.S., Demyanov A.I., Bulkin S.A. et al. Results of experimental studies of high-strength fiber reinforced concrete beams with round cross-sections under com-

bined bending and torsion // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2020. Vol. 16. Issue 4. Pp. 290–297. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-4-290-297. EDN JXJMCG.

16. Колчунов В.И. Метод расчетных моделей сопротивления для железобетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 3. С. 261–275. DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-3-261-275. EDN PUMWAG.

17. Федоров В.С., Баширов Х.З., Колчунов В.И. Элементы теории расчета железобетонных составных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2014. № 2. С. 116–118. EDN SNDSHP.

18. Lu J.X., Shen P., Ali H.A., Poon C.S. Mix design and performance of lightweight ultra high-performance concrete // Materials & Design. 2022. Vol. 216. P. 110553. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110553

19. Karamloo M., Mazloom M., Payganeh G. Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 123. Pp. 508–515. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.061

20. Sim J.I., Yang K.H., Kim H.Y., Choi B.J. Size and shape effects on compressive strength of lightweight concrete // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 38. Pp. 854–864. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.073

21. Луценко А.И., Арускин М.В. Исследование работы узлового сопряжения ригелей и колонн в сборно-монолитном железобетонном каркасе с применением системы автоматизированного проектирования // Современное строительство и архитектура. 2022. № 7 (31). С. 8–25. DOI: 10.18454/mca.2022.28.8.002. EDN MOJFVD.

22. Копаница Д.Г., Капарулин С.Л., Данильсон А.И., Устинов А.М., Усеинов Э.С., Шашков В.В. Динамическая прочность и деформативность узла сопряжения железобетонного каркаса // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 5 (52). С. 57–63. EDN VHMMTX.

23. Колчунов В.И., Ключева Н.В., Бухтиярова А.С. Сопротивление пространственных узлов сопряжения железобетонных каркасов многоэтажных зданий при запроектных воздействиях // Строительство и реконструкция. 2011. № 5 (37). С. 21–32. EDN OIRNVV.

24. Kim S.H., Kim H.D., Kang S.M., Hwang H.J., Choi H. Effect of joint details on progressive collapse resistance of precast concrete structures // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 69. P. 106217. DOI: 10.1016/j.job.2023.106217

25. Nguyen V.H., Tan K.H. Progressive collapse behaviour of advanced precast reinforced concrete joints with headed bars and plastic hinge relocation // Engineering Structures. 2023. Vol. 293. P. 116603. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116603

26. Jin L., Li X., Zhang R., Du X. Failure mechanism and dynamic response of reinforced concrete joints under impact load acting on beam ends // *International Journal of Impact Engineering*. 2024. Vol. 185. P. 104863. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104863

27. Ou Y.C., Joju J., Lai B.C., Wang J.C. Development and seismic performance evaluation of New high strength reinforced concrete column and steel beam (New-RCS) joint // *Engineering Structures*. 2023. Vol. 288. P. 116186. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116186

28. Ou Y.C., Joju J., Wang W.L. Composite RCS joint designs for circular high-strength reinforced concrete columns // *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 104. P. 112233. DOI: 10.1016/j.job.2025.11-2233

29. Wang D., Zhao J., Ju Y., Shen H., Li X. Behavior of beam-column joints with high performance fiber-reinforced concrete under cyclic loading // *Structures*. 2022. Vol. 44. Pp. 171–185. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.07.090

Поступила в редакцию 6 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 6 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 9 октября 2025 г.

О Б А В Т О Р А Х : Павел Анатольевич Кореньков — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2566-4260, Scopus: 57193453366, ResearcherID: AAG-4024-2020, ORCID: 0000-0003-1847-4303; kpa_gbk@mail.ru;

Наталья Витальевна Федорова — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства, советник РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3365-8320, Scopus: 57196437054, ResearcherID: V-7282-2018, ORCID: 0000-0002-5392-9150; fedorovanv@mfgsu.ru;

Татьяна Александровна Ильющенко — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства; **Курский государственный университет (КГУ)**; 305000, г. Курск, ул. Радищева, д. 33; SPIN-код: 6913-5863, Scopus: 57213811914, ResearcherID: AAJ-6459-2021, ORCID: 0000-0001-6885-588X; tatkhulina93@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kolchunov V.I., Iliushchenko T.A., Fedorova N.V., Savin S.Y., Tur V.V., Lizahub A.A. Structural robustness: an analytical review. *Building and Reconstruction*. 2024; 3(113):31-71. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-113-3-31-71. EDN FHLGWH. (rus.).

2. Savin S.Yu., Sharipov M.Z., Moskovtseva V.S. Experimental and theoretical study of the performance of long-term loaded reinforced concrete members in compression under dynamic action. *Building and Reconstruction*. 2025; 2(118):65-80. DOI: 10.33979/2073-7416-2025-118-2-65-80. EDN TBTLKB. (rus.).

3. Travush V.I., Kolchunov V.I., Leont'yev E.V. Protection of buildings and structures against progressive collapse within the framework of legislative and regulatory requirements. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 2:46-54. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.02.46-54. EDN YXLQNV. (rus.).

4. Sadek F., Bao Y., Main J.A., Lew H.S. Evaluation and enhancement of robustness for reinforced concrete buildings. *Journal of Structural Engineering*. 2022; 148(1). DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0003226

5. Riedel K., Vollum R., Izzuddin B., Rust G. Robustness assessment of precast concrete connections

using component-based modelling. *Structures*. 2024; 59:105689. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105689

6. Zhao Z., Cheng X., Li Y., Diao M., Liu Y., Zhang W. Robustness analysis of dynamic progressive collapse of precast concrete beam-column assemblies using dry connections under uniformly distributed load. *Engineering Structures*. 2025; 323:119206. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.119206

7. Karpenko N., Belostotsky A., Pavlov A., Aki-mov P., Karpenko S., Petrov A. Review of methods of analysis of reinforced concrete structures under complex stress states with allowance for physical nonlinearity, anisotropy and structural inhomogeneity part 1: results of Soviet and Russian scientists. *Fundamental, exploratory and applied research of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2019 : collection of scientific papers of RAASN*. Vol. 2. 2020; 255-265. EDN WVFNAE. (rus.).

8. Kolchunov V.I., Tur V.V. Directions for the design of structural systems in accidental design situations. *Industrial and Civil Engineering*. 2023; 7:5-15. DOI:

10.33622/0869-7019.2023.07.05-15. EDN RNQPRJ. (rus.).

9. Almazov V.O., Plotnikov A.I., Rastorguev B.S. Problems of building's strength to progressive collapse. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 1-2:16-20. EDN OUVYJV. (rus.).

10. Nav F.M., Usefi N., Abbasnia R. Analytical investigation of reinforced concrete frames under middle column removal scenario. *Advances in Structural Engineering*. 2018; 21(9):1388-1401. DOI: 10.1177/1369433217746343

11. Fedorova N.V., Fang D.K., Nguyen T.Ch. Experimental life studies of reinforced concrete frames with girders reinforced by indirect reinforcement. *Building and Reconstruction*. 2020; 1(87):92-100. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-87-1-92-100. EDN ITILDU. (rus.).

12. Fedorova N.V., Iliushchenko T.A. Influence of pre-stressing over parameters of diagram of static-dynamic deformation of RC elements. *IOP Conference Series : materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 687. Issue 3. P. 033033. DOI: 10.1088/1757-899x/687/3/033033

13. Deng X.-F., Liang S.-L., Fu F., Qian K. Effects of high-strength concrete on progressive collapse resistance of reinforced concrete frame. *Journal of Structural Engineering*. 2020; 146(6). DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002628

14. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kaprielov S.S., Dem'yanov A.I., Konorev A.V. Main results of experimental studies of reinforced concrete structures of high-strength concrete B100 round and circular cross sections in torsion with bending. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019; 15(1):51-61. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-1-51-61. EDN YZIQCD. (rus.).

15. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kaprielov S.S., Demyanov A.I., Bulkin S.A. et al. Results of experimental studies of high-strength fiber reinforced concrete beams with round cross-sections under combined bending and torsion. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020; 16(4):290-297. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-4-290-297. EDN JXJMCG.

16. Kolchunov V.I. Method of computational models of resistance for reinforced concrete. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023; 19(3):261-275. DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-3-261-275. EDN PUMWAG. (rus.).

17. Fyodorov V.S., Bashirov H.Z., Kolchunov V.I. Elements of composite reinforced concrete construction calculation theory. *Academia. Architecture and Construction*. 2014; 2:116-118. EDN SNDSP. (rus.).

18. Lu J.X., Shen P., Ali H.A., Poon C.S. Mix design and performance of lightweight ultra high-performance concrete. *Materials & Design*. 2022; 216:110553. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110553

19. Karamloo M., Mazloom M., Payganeh G. Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2016; 123:508-515. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.061

20. Sim J.I., Yang K.H., Kim H.Y., Choi B.J. Size and shape effects on compressive strength of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2013; 38:854-864. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.073

21. Lutsenko A.I., Ariskin M.V. A study of the work of the node coupling of crossbars and columns in a half-precast monolithic reinforced frame using a computer-aided-design system. *Modern Construction and Architecture*. 2022; 7(31):8-25. DOI: 10.18454/mca.2022.28.8.002. EDN MOJFVD. (rus.).

22. Kopanitsa D.G., Kaparulin S.L., Danil'son A.I., Ustinov A.M., Useinov E.S., Shashkov V.V. Dynamic strength and deformability of beam-to-column joint. *Journal of Construction and Architecture*. 2015; 5(52):57-63. EDN VHMMTX. (rus.).

23. Kolchunov V.I., Kljueva N.V., Buhtijarova A.S. Strength of joints in spatial reinforced concrete frames of high rise buildings under actions beyond design basis. *Building and Reconstruction*. 2011; 5(37):21-32. EDN OIRNVV. (rus.).

24. Kim S.H., Kim H.D., Kang S.M., Hwang H.J., Choi H. Effect of joint details on progressive collapse resistance of precast concrete structures. *Journal of Building Engineering*. 2023; 69:106217. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.106217

25. Nguyen V.H., Tan K.H. Progressive collapse behaviour of advanced precast reinforced concrete joints with headed bars and plastic hinge relocation. *Engineering Structures*. 2023; 293:116603. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116603

26. Jin L. Li X., Zhang R., Du X. Failure mechanism and dynamic response of reinforced concrete joints under impact load acting on beam ends. *International Journal of Impact Engineering*. 2024; 185:104863. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104863

27. Ou Y.C., Joju J., Lai B.C., Wang J.C. Development and seismic performance evaluation of New high strength reinforced concrete column and steel beam (New-RCS) joint. *Engineering Structures*. 2023; 288:116186. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116186

28. Ou Y.C., Joju J., Wang W.L. Composite RCS joint designs for circular high-strength reinforced concrete columns. *Journal of Building Engineering*. 2025; 104:112233. DOI: 10.1016/j.jobbe.2025.112233

29. Wang D., Zhao J., Ju Y., Shen H., Li X. Behavior of beam-column joints with high performance fiber-reinforced concrete under cyclic loading. *Structures*. 2022; 44:171-185. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.07.090

Received August 6, 2025.

Adopted in revised form on October 6, 2025.

Approved for publication on October 9, 2025.

B I O N O T E S: **Pavel A. Korenkov** — Candidate of Technical Sciences, Associated Professor, Associated Professor of the Department of Industrial and Civil Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2566-4260, Scopus: 57193453366, ResearcherID: AAG-4024-2020, ORCID: 0000-0003-1847-4303; kpa_gbk@mail.ru;

Natalia V. Fedorova — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial and Civil Construction; Advisor of RAASC; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3365-8320, Scopus: 57196437054, ResearcherID: V-7282-2018, ORCID: 0000-0002-5392-9150; fedorovanv@mfngsu.ru;

Tatiana A. Iliushchenko — Candidate of Technical Sciences, Associated Professor of the Department of Industrial and Civil Construction; **Kursk State University (KSU)**; 33 Radishcheva st., Kursk, 305000, Russian Federation; SPIN-code: 6913-5863, Scopus: 57213811914, ResearcherID: AAJ-6459-2021, ORCID: 0000-0001-6885-588X; tatkhulina93@yandex.ru.

Authors' contributions: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflicts of interest.