

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ РЕКОНСТРУИРУЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Аннотация. В статье рассмотрено поведение реконструируемых железобетонных элементов, которые одновременно испытывают изгибающие и крутящие моменты при воздействии динамических нагрузок. В работе акцентировано внимание на важность учета сложного напряженного состояния конструкций в условиях аварийных и техногенных воздействий. Изложены как экспериментальные подходы (испытания с импульсными нагрузками, мониторинг трещин) на основе испытаний 108 железобетонных балок, так и теоретические методы (упругопластическое моделирование, анализ методом конечных элементов) на основе 4 математических моделей, направленные на всестороннюю оценку прочности и деформативности элементов. Отмечена ограниченность исследований, связанных с многократным динамическим нагружением, а также недостаток в задачах обратного проектирования. Проанализированы современные расчетные методы, преимущественно применяемые при статическом воздействии, и указана необходимость их адаптации для анализа динамических условий. Предложена комплексная методика с использованием современных испытательных установок и систем измерений, что позволяет повысить точность оценки и надежность на 7–9 % в сравнении с существующими методиками при расчете рассматриваемых конструкций. Результаты способствуют улучшению проектирования и эксплуатации железобетонных сооружений в условиях сложных динамических воздействий.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, кратковременные динамические нагрузки, трещиностойкость, теоретическое моделирование, экспериментальные методы, комплексное напряженное состояние.

Введение. Большое количество строительных конструкций в процессе эксплуатации одновременно воспринимают несколько разных силовых воздействий. Одним из примеров таких воздействий является одновременное действие изгибающего и крутящего моментов. Ригели перекрытий каркасных зданий являются типичными примерами подобных конструкций. На них действуют изгибающие моменты и, при приложении нагрузки с эксцентрикитетом, возникает также крутящий момент. Значения величины крутящего момента может достигать до 0,5 части от величины изгибающего момента, что обязывает учитывать сложное напряженное состояние в таких ответственных конструкциях, как: обвязочные ригели наружного контура, ригели дисков перекрытий, криволинейные балки, наклонные арки и др. [1]. При этом, в процессе проектирования и эксплуатации, необходимо тщательно следить за состоянием конструкций, а также оценивать необходимость проведения мероприятий по реконструкции.

В процессе эксплуатации значительная часть зданий различного назначения могут оказаться объектами динамического воздействия. Данный тип воздействий может возникать при авариях, техногенных происшествий, детонации газов, прогрессирующем обрушении здания или

части зданий. Вероятность возникновения данного типа особых нагрузок и, вследствие этого, появления динамического воздействия на конструкции, постоянно растет в связи с участниками различными случаями аварий, что приводит не только к материальным потерям, но и к возможным ранениям и гибелим людей [2].

При проведении капитального ремонта или реконструкции конструкций, испытывающих сложное напряженное состояние, которые были подвержены динамическому нагружению, важно верно оценить, какое воздействие оказало преобладающее влияние на наступление предельного, или близкого к нему, состояния.

Анализ различных исследований, как экспериментальных, так и теоретических в области работы конструкций на изгиб с кручением показал, что основная часть научных работ направлена на изучение работы данных конструкций при статическом нагружении [3–7]. Основываясь на этом можно утверждать, что в настоящее время не существует четкого алгоритма расчета конструкций, испытывающих сложное напряженное состояние, позволяющего верно оценить взаимное влияние изгибающего и крутящего моментов при их одновременном действии. В частности, исследований работы эксплуатируемых железобетонных конструкций на изгиб с кручением недоста-

точно для понимания остаточного запаса по предельным состояниям и необходимости усиления конструкций после воздействия динамических нагрузок.

Проанализировав различные литературные источники, можно прийти к выводу, что существует несколько расчетных методик для оценки взаимного влияния изгибающего и кручущего моментов на железобетонные элементы, предложенные авторами, работавшими в данном направлении, при этом можно отметить их существенный недостаток, существующие методики учитывали лишь небольшую часть применяемых на практике конструкций, что вызывает вопросы, насколько повсеместно можно использовать данные методики при проектировании элементов.

Материалы и методы. Для корректного анализа работы железобетонных элементов при изгибе с кручением в условиях динамического воздействия необходимо одновременное использование как экспериментальных, так и теоретических методов исследования [8-10].

1. Экспериментальные методы:

- Измерение напряжений и деформаций с помощью специализированных датчиков для фиксирования реальной реакции конструкции;
- Проведение испытаний с кратковременными импульсными нагрузками, моделирующими реальные вибрационные и ударные воздействия;
- Визуальное и инструментальное исследование процесса образования и развития трещин в конструкции;
- Измерение предельных нагрузок, деформаций и реакции элементов конструкции в условиях динамического воздействия;
- Натурные испытания полноразмерных конструкций для получения максимально достоверных результатов;
- Испытания масштабных моделей для экономичного анализа различных вариантов нагрузок;
- Комбинированные статико-динамические испытания, позволяющие учитывать влияние последовательных нагрузок;
- Использование высокоточных методов визуализации для детального изучения повреждений и трещинообразования.

2. Теоретические методы:

- Упругопластическое моделирование с учетом перехода материалов из упругого состояния к пластическому при динамических нагрузках;
- Временное моделирование динамического развития напряжений и деформаций с учетом множества степеней свободы;

– Методы выделения пластических шарниров и зон пластичности для упрощения анализа предельных состояний;

– Компьютерное моделирование с использованием метода конечных элементов для анализа сложных напряжений и трещинообразования;

– Анализ остаточных деформаций, влияющих на долговечность конструкции после снятия нагрузки.

Использование данного комплекса методик позволяет всесторонне исследовать реакцию железобетонных конструкций на совместное воздействие изгибающих и кручущих динамических нагрузок, что способствует повышению точности расчетов и надежности эксплуатации конструкций [11-12].

Основная часть. Вопросу работы железобетонных конструкций при изгибе с кручением в разных условиях посвящены работы многих отечественных и зарубежных специалистов.

Так, в работе [1], в рамках исследования, авторы оценили прочность железобетонных изгибаемых элементов при крутящих кратковременных динамических нагрузках и реализовали экспериментальные испытания на конкретном примере, с применением в качестве экспериментальных образцов железобетонных балок размером 200(b)×100(h)×2000(l), которые подвергались кратковременным динамическим загружением, в качестве которого принимался удар от свободного падения груза различной массы, двигающегося по направляющим в специально разработанном испытательном стенде [13].

Авторами был произведен сравнительный анализ теоретического расчета железобетонных элементов с результатами экспериментальных исследований. Для расчета напряжений в железобетонной конструкции при изгибе с кручением под воздействием кратковременных динамических нагрузок за основу принималась пространственная модель, разработанная В. Н. Байковым [14, 15], использование которой позволяет установить зависимость между внешними нагрузками и напряжениями в арматуре конструкции. Ученые также произвели расчеты данных элементов по методике в СП63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции», а также осуществлен расчет МКЭ объемной модели. Отклонения теоретических расчетов от результатов экспериментального исследования составила 5-10 % (рис. 1).

Результатом исследований стала модернизация и верификация расчетной модели по способу Байкова В. Н., Фомичева В. И. [14, 15], а также разработка способа расчета железобетонных элементов при изгибе с кручением при действии

кратковременной динамической нагрузки с помощью МКЭ [1, 16]. При этом, мало внимания уделено обратной задаче проектирования, а именно, оценке трещинообразования и анализу вязанного с этим НДС.

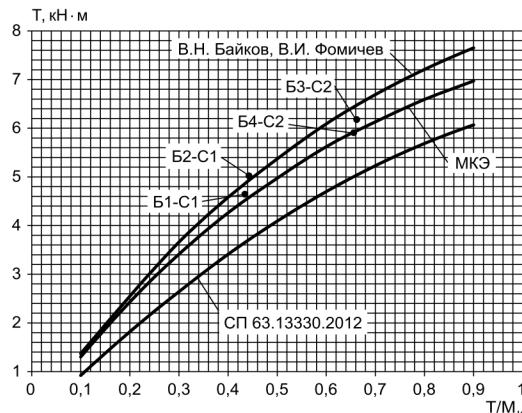


Рис. 1. Сравнение результатов экспериментов с результатами расчетов, проведенные в работе [1] (Б1-С1, Б2-С1, Б3-С2, Б4-С2 – экспериментальные образцы)

В работе [17] проведено исследование трещиностойкости и деформационного поведения конструкций, подвергающихся комбинированному изгибу и кручению. В этом исследовании разработаны модели расчёта железобетонных элементов коробчатого и кольцевого сечений, а также сплошных сечений, которые испытывают одновременно изгибающие и крутящие моменты после возникновения пространственных трещин. При этом учитывались параметры трещин, напряженно-деформированное состояние продольной и поперечной арматуры, характеристики бетона и напряжения в сжатой зоне.

На основе теоретического анализа и экспериментальных данных созданы уточнённые модели расчета для железобетонных конструкций с коробчатыми и кольцевыми сечениями, работающими под комплексными нагрузками. Для элементов со сплошными сечениями выявлено, что необходимо учитывать перераспределение моментов в области трещин: часть крутящего мо-

мента воспринимает центральная зона без трещин, а остальная – поврежденное трещинами сечение. Численные значения данных моментов были получены по опытным исследованиям с помощью эмпирической зависимости «момент-угол закручивания» а также по формулам, полученным в работе [18]. Авторами было доказано, что при изгибе с кручением можно ввести допущение, которое обозначает, что при наличии в расчетном сечении бетона сжатой зоны влиянием центральной части сплошного элемента можно пренебречь, так как это максимально приближено к реальной работе элементов [19-21].

Предложенная авторами расчетная модель позволяет оценить напряженно деформированное состояние железобетонного элемента, а также определять деформации и кривизну элемента, и угол закручивания. Эта модель может использоваться для проектирования различных типов железобетонных конструкций из обычного и высокопрочного бетона, а также фиброжелезобетона, которые работают под комбинированным воздействием изгиба и кручения; при этом в рассматриваемых исследованиях анализировалось только статическое воздействие [22].

В работе [23] рассматривается устойчивость и деформационные характеристики балочных и плитных конструкций при кратковременных динамических нагрузках на упругих опорах. Автор, основываясь на теории деформаций трещинованного железобетона, разработанной профессором Карпенко [17], создал расчетную модель, которая учитывает нелинейные свойства бетона и арматуры, влияние нагельного эффекта, а также прочность бетона в областях, расположенных между трещинами, в условиях кратковременного динамического нагружения.

Для представления работы арматуры, как с физической площадкой текучести, так и с ее отсутствием, в конструкциях, подверженных динамическому воздействию, автор опирался на [24] (рис. 2).

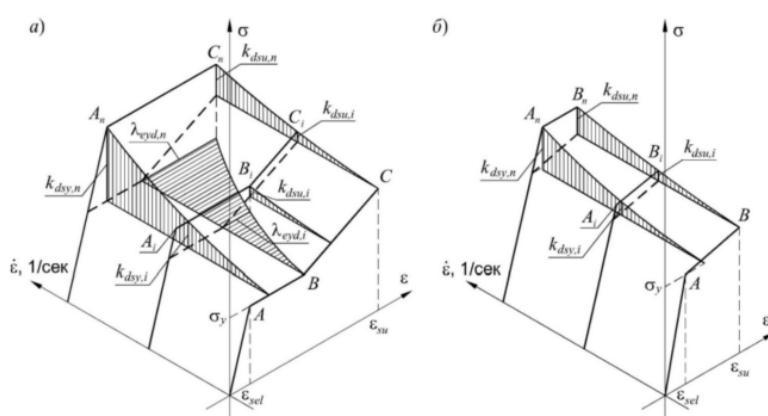


Рис. 2. Диаграмма деформирования арматурной стали с физической площадкой текучести (а) и без площадки текучести (б) при кратковременном динамическом нагружении

Модель имеет некоторые ограничения. В частности, она не показывает, как скорость деформирования влияет на предел текучести арматурной стали, хотя экспериментальные данные указывают, что скорость деформации влияет не только на пределы текучести, но и на прочностные характеристики материала [25, 26].

В исследовании была предложена модель динамического деформирования железобетона с образовавшимися трещинами при изгибе, учитывая неоднородное распределение напряжений по высоте сечения и образование трещин как по площади, так и по высоте конструкции. В рамках модели нелинейные деформации железобетона в отдельных слоях описываются с помощью плоского напряженно-деформированного состояния [23].

В работе [27] представлена методика и программа экспериментов на железобетонных балках с композитным усилением, работающих под воздействием изгиба и кручения. На напряженно-деформированное состояние таких конструкций существенно влияет сцепление между бетоном и материалом усиления, при этом отсутствуют полноценные теоретические и экспериментальные исследования для элементов с подобным комбинированным нагружением.

Разработанная методика и полученные результаты подтверждают правильность расчетной модели и заложенных в неё предпосылок, что позволяет выявить закономерности деформирования усиленных железобетонных конструкций при сложных нагрузках.

Кручение снижает несущую способность элементов, работающих одновременно на изгиб и кручение, по сравнению с простым изгибом. Часто крутящие моменты, хотя и бывают относительно небольшими по величине, существенно ухудшают прочность и жесткость конструкций. При кручении в элементе возникают главные сжимающие и растягивающие напряжения под углом 45° к продольной оси, что ведет к появлению винтообразных трещин вокруг элемента. Эти трещины возникают уже на ранних стадиях нагружения и уменьшают несущую способность конструкции. Разрушение происходит, когда растянутая арматура испытывает значительные неупругие удлинения. В элементах с изгибом и кручением обычно развивается пространственное напряженное состояние, где трещины распространяются по трем сторонам сечения, а на четвертой стороне расположена сжатая зона. Для надежной работы таких железобетонных элементов требуется армирование, учитывающее все воздействия изгибающий момент, поперечную силу и крутящий момент.

В исследовании [3] представлен метод расчёта железобетонных элементов, которые работают под одновременным воздействием продольных сил, изгибающих и крутящих моментов с использованием поверхностей относительного сопротивления прочности и трещиностойкости. Для этих поверхностей выявлены закономерности изменения предельных значений. Кручение возникает в изгибающихся элементах из-за случайного смещения нагрузки, неоднородности материала или асимметричного сечения. Учёт этого явления особенно важен в ответственных конструкциях, таких как балки с боковыми консолями, наклонные арки и опоры ЛЭП, так как игнорирование кручения может привести к ошибкам в распределении усилий. Авторы предлагают расчёт в системе координат α_l , α_m , α_t на базе нелинейной деформационной модели, которая отражает приближённое реальное поведение бетона и арматуры с помощью нелинейных диаграмм деформирования. Модель применима к одновременному воздействию продольных сил $N_l(t)$, изгибающих $M_l(t)$ и крутящих $T_l(t)$ при статических и динамических нагрузках, включая переход от центрального растяжения к осевому сжатию. При этом за единичные величины приняты: прочность бетонного сечения на осевое сжатие ($N_b, \max = R_{bd} * A$) и прочность сжатого бетонного сечения на изгиб ($M_b, \max = R_{bd} * S$) [28–30].

Условие прочности сечения задаётся замкнутой выпуклой поверхностью в пространстве относительных усилий. На основе анализа теоретических данных создана визуальная схема, показывающая комбинации усилий, при которых элемент функционирует с трещинами или без них, основанная на объединении областей прочности и трещиностойкости в сочетании с векторным представлением нагрузок (рис. 3) [31].

В результате разработаны математическая модель и программный комплекс JBK-NMT, позволяющие решать задачи проектирования железобетонных элементов, работающих при комбинированном действии продольных сил, изгибающих и крутящих моментов во всём диапазоне приложенных нагрузок [3, 32]. Модель и программа расчета верифицирована и подробно рассмотрена в работах [33–37].

Некоторыми исследователями были разработаны и практически применялись испытательные стенды [38, 39], показывающие высокий уровень сходимости результатов с теоретическими предпосылками. Вместе с тем, были определены некоторые пути совершенствования установок для повышения гибкости и модульности при проведении испытаний, особенно в условиях появления и фиксации спиральных трещин [40–42].

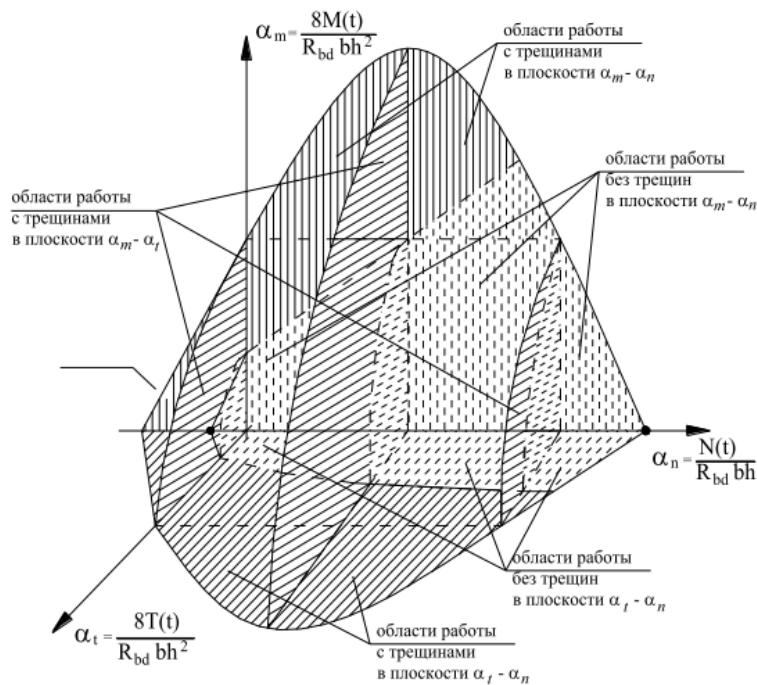


Рис. 3. Поверхности относительного сопротивления по прочности и трещиностойкости железобетонного элемента при действии продольной силы $N(t)$, изгибающего $M(t)$ и кручущего $T(t)$ моментов [31]

Выводы. Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что для точной оценки работы элементов, подвергающихся одновременно изгибу и кручению при кратковременной динамической нагрузке, необходимо учитывать, как комплексность нагрузок, так и взаимодействие факторов, влияющих на деформацию конструкции, при этом, проведено довольно мало исследований, позволяющих однозначно представить работу данных элементов. При современном техническом оснащении зданий высока вероятность воздействия динамическими воздействиями на железобетонные элементы вследствие технологических аварий, а также сейсмических воздействий, при этом, вопрос воздействия динамических нагрузок на элементы, испытывающие одновременное воздействие изгиба и кручения, остаётся слабо изученным. Исследователи разработали несколько математических моделей для расчёта железобетонных элементов в условиях статических воздействий. При этом данные математические модели прошли верификацию на довольно ограниченном количестве экспериментальных исследований, показав при этом большую дисперсию. Влиянию многократного действия динамических нагрузок на элементы, работающие на изгиб с кручением в работах ученых внимания уделено не было. Для учета многократного динамического воздействия можно на базе существующего испытательного стенда произвести некоторые усовершенствования в зоне сбрасывающего механизма.

Динамическая нагрузка создается посредством сброса груза с высоты, до которой он поднимается с помощью подъемника. Высота подъема контролируется системой датчиков положения, а груз удерживается в верхней позиции системой автоматической фиксации, гарантируя безопасность и точность процесса. При сбросе груз падает вертикально вниз, воздействуя через распределительную траверсу, что создает ударную силу, направленную перпендикулярно продольной оси образца и строго вертикально. Этот вид нагрузки вызывает в элементе комплексную стрессовую ситуацию с одновременным действием изгибающих и кручущих моментов.

Процесс испытания на усовершенствованном стенде должен начинаться с надежной фиксации испытуемого строительного элемента на жестких опорах. В определенных местах образца устанавливаются оголовники с противоположно направленными вылетами, на которые монтируют распределительную траверсу, служащую для передачи нагрузочного воздействия. Для точного снятия деформаций конструкции на обоих концах образца вблизи оголовников располагаются электронные прогибомеры. Они измеряют вертикальные перемещения двух противоположных точек на поперечном сечении, что позволяет вывести индивидуальные значения прогибов и углов поворота, связанных с изгибом и кручением.

В результате такого воздействия образуется характерный тип трещин – спиральные или вин-

товые. Эти трещины расположены по поверхности конструкции под углами от 25° до 40° относительно продольной оси и могут образовывать пространственные сетки, ухудшающие механические характеристики и увеличивающие степень пластической деформации. Такая форма трещиноватости является типичной при сочетании изгибных и крутильных деформаций и требует особого внимания при анализе прочности конструкции.

После завершения испытаний необходимо провести детальный контроль состояния образца. Визуальная инспекция сопровождается фиксацией положения, длины и ширины раскрытия трещин. Для мониторинга изменения параметров повреждений можно использовать щелемеры и трещиномеры, фиксирующие динамику раскрытия за время испытаний и после них.

Такой комплексный подход к испытаниям и анализу сможет обеспечить высокую точность оценки реального поведения строительных конструкций при кратковременных динамических нагрузках. Внедрение автоматизированных систем подъема и контроля нагрузки повышает эффективность и воспроизводимость испытаний, снижая влияние человеческого фактора и обеспечивая высокое качество исследований. Данные о деформациях и повреждениях, полученные в ходе таких испытаний, служат основой для принятия обоснованных инженерных решений по проектированию и эксплуатации надежных и долговечных сооружений.

Данный способ испытаний позволит решить часть проблем, возникнувших при проведенных исследований разных ученых, а также позволит более детально изучить реальную работу конструкций, работающих при изгибе с кручением в условиях динамических воздействий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Родевич В.В., Арзамасцев С.А. К оценке прочности железобетонных изгибающихся элементов при кручении от кратковременных динамических нагрузок // Вестник ТГАСУ. 2017. №2. С. 112–122.

2. Родевич В.В. Совершенствование метода расчета железобетонных изгибающихся элементов на основе блочной модели деформирования при кратковременном динамическом нагружении // Вестник ТГАСУ. 2004. №1. С. 45–50.

3. Плевков В.С., Балдин И.В., Балдин С.В., Плевков Р.А. Расчет прочности и трещиностойкости железобетонных элементов при совместном действии продольных сил, изгибающих и крутящих моментов // Вестник ТГАСУ. 2018. №3. С. 133–146.

4. Lin W. Experimental investigation on composite beams under combined negative bending and torsional moments // Advances in Structural Engineering. 2020. Vol. 24(6). Pp. 1456–1465. DOI: 10.1177/1369433220981660.

5. Jariwala V.H., Patel P.V., Purohit S.P. Strengthening of RC Beams subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites // Procedia Engineering. 2013. Vol. 51. Pp. 282–289.

6. Vishnu H. Jariwala, Paresh V. Patel, Sharadkumar P. Purohit. Strengthening of RC Beams subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites // Procedia Engineering. 2013. Vol. 51. Pp. 282–289. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.01.038

7. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов Вл.И. 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

8. Колчунов В.И., Демьянов А.И., Печенев И.В. Результаты экспериментальных исследований конструкций квадратного сечения при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2020. №5. С. 3–12. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-91-5-3-12

9. Колчунов Вл.И., Демьянов А.И., Протченко М.В. Моменты в железобетонных конструкциях при изгибе с кручением // Строительство и реконструкция. 2021. № 3 (95). С. 25–44. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-95-3-27-46

10. Kim C., Kim S., Kim K.-H., Shin D., Ha-roon M., Lee J.-Y. Torsional Behavior of Reinforced Concrete Beams with High-Strength Steel Bars // Structural Journal. 2019. Vol. 116. P. 251–233.

11. Bernardo L. Modeling the Full Behavior of Reinforced Concrete Flanged Beams under Torsion // Applied Sciences. 2019. Vol. 9: 2730. Pp. 1–16. DOI: 10.3390/app9132730.

12. Kolchunov V., Dem'yanov A., Naumov N. Analysis of the "nagel effect" in reinforced concrete structures under torsion with bending // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 953.

13. Родевич В.В., Арзамасцев С.А. Экспериментальные исследования железобетонных элементов, работающих на изгиб с кручением, при статическом и кратковременном динамическом воздействиях // Жилищное строительство. 2014. № 10. С. 15–18.

14. Байков В.Н. Исследование железобетонных элементов, подверженных изгибу и кручению с учетом снижения предела текучести сложнонапряженной арматуры // Известия вузов.

Строительство и архитектура. 1975. № 1. С. 11–17.

15. Чиненков Ю.В. Исследование работы железобетонных элементов при совместном действии изгиба и кручения // Исследование прочности элементов железобетонных конструкций. М.: Госстройиздат, 1959. Вып. 5.

16. Родевич В.В., Арзамасцев С.А. К расчету железобетонных элементов на изгиб с кручением // Известия вузов. Строительство. 2015. № 9. С. 99–109.

17. Карпенко Н.И., Колчунов Вл.И. Колчунов В.И. Травуш В.И., Демьянов А.И. Деформирование железобетонных конструкций при изгибе с кручением // Строительные материалы. 2021. № 6. С. 48–56. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-792-6-48-56

18. Чистова Т.П., Исследование деформативности железобетонных элементов прямоугольного сечения при кручении, при изгибе с кручением и при совместном действии изгибающего и крутящего моментов и поперечной силы: Автографат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. (05.23.01) / Науч.-исслед. ин-т бетона и железобетона "НИИЖБ". Москва: [б. и.], 1973. 22 с.

19. Karpenko N.I., Kolchunov Vl.I., Travush V.I. Calculation model of a complex stress reinforced concrete element of a boxed section during torsion with bending // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2021. № 3 (51). Pp. 7–26. DOI: 10.36622/VSTU.2021.51.3.001

20. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов В.И., Каприлов С.С., Демьянов А.И., Конорев А.В. Результаты экспериментальных исследований конструкций квадратного и коробчатого сечений из высокопрочного бетона при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2018. Vol. 6 (80). С. 32–43.

21. Vishnu H.J., Paresh V.P., Sharadkumar P.P. Strengthening of RC beams subjected to combined torsion and bending with GFRP Composites // Procedia Engineering. 2013. Vol. 51. Pp. 282–289.

22. Колчунов В.И., Сафонов А.Г. Построение расчета железобетонных конструкций на кручение с изгибом // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. 2008. № 4. С. 7–13.

23. Галяутдинов З.Р. Прочность и деформативность балочных и плитных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении: специальность 05.23.01 «строительные конструкции, здания и сооружения»: Диссертация на соискание доктора технических наук / Томский государственный архитектурно-строительный институт. Томск, 2021. 506 с.

24. Котляревский В.А., Ганушкин В.И., Костин А.А., Костин А.И., Ларионов В.И. Убежища гражданской обороны. Конструкции и расчет. М.: Стройиздат, 1989. 606 с.

25. Федоров В.С., Колчунов Вл.И., Покусаев А.А. Расчет расстояния между пространственными трещинами и ширины их раскрытия в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом (случай 2) // Жилищное строительство. 2016. № 5. С. 16–21.

26. Касаев Д.Х. Трещиностойкость железобетонных элементов прямоугольного сечения при изгибе с кручением // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. 2005. № 2. С. 124–125.

27. Меркулов С.И., Есипов С.М. Методика экспериментальных исследований усиленных железобетонных балок при изгибе с кручением // Труды международной научно-практической конференции «Архитектура. Строительство. Информационные технологии - 2023» (г. Новороссийск, 4–8 сентября 2023 г.). Новороссийск:НФ БГТУ им. В. Г. Шухова, 2023. С. 67–69.

28. Koistek V., Prùša J., Vítek J.L. Torsion of reinforced concrete structural members // Solid State Phenomena. 2018. Vol. 272. Pp. 178–184. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.272.178>

29. Kalkan I., Kartal S. Torsional rigidities of reinforced concrete beams subjected to elastic lateral torsional buckling // International Journal of Civil and Environmental Engineering. 2017. Vol. 11. No. 7. Pp. 969–972.

30. Santhakumar R., Dhanaraj R., Chandrasekaran E. Behaviour of retrofitted reinforced concrete beams under combined bending and torsion: A numerical study // Electronic Journal of Structural Engineering. 2007. No. 7. Pp. 1–7. DOI: 10.56748/ejse.769

31. Плевков В.С., Балдин И.В., Балдин С.В., Плевков Р.А. Расчет прочности и трещиностойкости железобетонных элементов при совместном действии продольных сил, изгибающих и крутящих моментов // Вестник ТГАСУ. Томск: ТГАСУ, 2018. №3. С. 133–146.

32. Балдин С.В. Прочность и трещиностойкость железобетонных элементов при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил от статического и кратковременного динамического нагружения: специальность 05.23.01 «строительные конструкции, здания и сооружения»: Диссертация на соискание кандидата технических наук / Томский государственный архитектурно-строительный институт. Томск, 2013. 217 с.

33. Tsai H.C., Liao M.C. Modeling Torsional Strength of Reinforced Concrete Beams using Genetic Programming Polynomials with Building

Codes // KSCE Journal of Civil Engineering. 2019. Vol. 23. Pp. 3464–3475. DOI: 10.1007/s12205-019-1292-7

34. Klein G., Lucier G., Rizkalla S., Zia P., Gleich H. Torsion simplified: a failure plane model for design of spandrel beams. ACI Concrete International Journal, 2012. Pp. 1–19.

35. Nahvi H., Jabbari M. Crack detection in beams using experimental modal data and finite element model // International Journal of Mechanical Sciences. 2005. Vol. 47. Pp. 1477–1497.

36. Морозов В.И. К расчету фиброжелезобетонных конструкций, подверженных совместному воздействию кручения с изгибом // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5.

37. Vitek J.L., Prusa J., Kristek V. Torsion of Rectangular Concrete Sections // ACI Symposium Publication. 2020. Vol. 344. Pp. 111–130.

38. Патент № 2570231 С1 Российская Федерация, МПК G01M 7/08, G01N 3/30. Стенд для испытания железобетонных элементов на совместное кратковременное динамическое воздействие изгибающего и крутящего моментов: № 2014136689/28: заявл. 09.09.2014: опубл. 10.12.2015 / В.В. Родевич, Г.И. Однокопылов, С.А. Арзамасцев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный архитектурно-строительный университет" (ТГАСУ), Общество с ограниченной ответственностью "Стройтехинновации ТДСК" (ООО "СТИ ТДСК"). EDN LEIZPV.

Информация об авторах

Есипов Станислав Максимович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: bgtu@esipov-sm.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Мишенин Олег Владимирович, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: OlMish6565@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 09.09.2025 г.
© Есипов С.М., Мишенин О.В., 2025

***Esipov S.M., Mishenin O.V.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova
*E-mail: bgtu@esipov-sm.ru

STRESS-STRAIN STATE OF RECONSTRUCTED CONCRETE ELEMENTS UNDER BENDING AND TWISTING DURING DYNAMIC LOADING

Abstract. The article considers the behavior of reconstructed reinforced concrete elements, which simultaneously experience bending and torques when exposed to dynamic loads. The paper focuses on the importance of taking into account the complex stress state of structures under conditions of emergency and man-made impacts. Experimental approaches (pulse load tests, crack monitoring) based on tests of 108 reinforced

39. Патент № 2578662 С1 Российская Федерация, МПК G01M 7/00, G01N 3/303, G01N 3/307. Способ испытания строительных конструкций на изгиб с кручением при статическом и кратковременном динамическом воздействии: № 2015101043/28: заявл. 12.01.2015: опубл. 27.03.2016 / Г.И. Однокопылов, В.В. Родевич, С.А. Арзамасцев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный архитектурно-строительный университет" (ТГАСУ), Общество с ограниченной ответственностью "Стройтехинновации ТДСК" (ООО "СТИ ТДСК"). EDN ZEOCOD.

40. Колчунов Вл.И., Козарез А.В., Протченко М.В. Сопротивление обычных и высокопрочных железобетонных конструкций прямоугольного или коробчатого сечения при кручении с изгибом // Известия вузов. Строительство. 2022. № 1. С. 5–21.

41. Колчунов Вл.И., Демьянин А.И., Михайлов М.М. Статико-динамическое деформирование сжатого бетона в неопределенной железобетонной раме при изгибе с кручением // Известия вузов. Строительство. 2020. № 4. С. 5–21. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-736-4-5-21

42. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Кокорин Д.Н. Экспериментально-теоретические исследования железобетонных балок на податливых опорах по наклонным сечениям при сейсмических и других динамических нагрузлениях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. № 1. С. 40–45.

concrete beams, as well as theoretical methods (elastoplastic modeling, finite element analysis) based on 4 mathematical models aimed at a comprehensive assessment of the strength and deformability of the elements are described. The limited research related to multiple dynamic loading, as well as the lack of reverse engineering tasks, is noted. Modern calculation methods, mainly used for static effects, are analyzed, and the need for their adaptation for the analysis of dynamic conditions is indicated. A comprehensive methodology using modern testing facilities and measurement systems is proposed, which makes it possible to increase the accuracy of the assessment and reliability by 7–9 % in comparison with existing methods for calculating the structures under consideration. The results contribute to the improvement of the design and operation of reinforced concrete structures in conditions of complex dynamic impacts.

Keywords: reinforced concrete structures, short-term dynamic loads, crack resistance, theoretical modeling, experimental methods, and complex stress state.

REFERENCES

1. Rodevich V.V., Arzamastsev S.A. On the assessment of the strength of reinforced concrete bending elements under torsion from short-term dynamic loads [K oценке прочности железобетонных изгибаемых элементов при кручении от кратковременных динамических нагрузок]. Bulletin of TSUAB. Tomsk: TSUAB, 2017. Vol. 2. Pp. 112–122. (rus)
2. Rodevich V.V. Improvement of the calculation method for reinforced concrete bending elements based on a block deformation model under short-term dynamic loading [Совершенствование метода расчета железобетонных изгибаемых элементов на основе блочного моделирования деформации при кратковременном динамическом нагружении]. Bulletin of TSUAB. 2004. Vol. 1. Pp. 45–50. (rus)
3. Plevkov V.S., Baldin I.V., Baldin S.V., Plevkov R.A. Calculation of the strength and crack resistance of reinforced concrete elements under the combined action of longitudinal forces, bending and torsional moments [Расчет прочности и трещиностойкости железобетонных элементов при совместном действии продольных сил, изгиба и изгиба с кручением]. Bulletin of TSUAB. 2018. Vol/ 3/ Pp. 133–146. (rus)
4. Lin W. Experimental investigation on composite beams under combined negative bending and torsional moments. Advances in Structural Engineering, 2020. Vol. (6). Pp. 1456–1465. DOI: 10.1177/1369433220981660.
5. Jariwalaa V.H., Patel P.V., Purohit S.P., Strengthening of RC Beams subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites. Procedia Engineering. 2013. Vol. 51. Pp. 282–289.
6. Vishnu H. Jariwalaa, Paresh V. Patel, Sharadkumar P. Purohit. Strengthening of RC Beams subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites. Procedia Engineering. 2013. Vol. 51. Pp. 282–289. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.01.038.
7. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I. Main results of experimental studies of reinforced concrete structures made of high-strength concrete B100 with circular and annular cross-sections under torsion with bending [Основные результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций из высокопрочного бетона В100 при кручении и изгибе]. Structural Mechanics of Engineering Constructions and Structures. 2019. Vol. 15, No. 1. Pp. 51–61. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-1-51-61 (rus)
8. Kolchunov V.I., Demyanov A.I., Pechenev I.V. Results of experimental studies of square-section structures under torsion with bending [Результаты экспериментальных исследований конструкций квадратного сечения при кручении и изгибе]. Construction and Reconstruction. 2020. No. 5. Pp. 3–12. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-91-5-3-12 (rus)
9. Kolchunov V.I., Demyanov A.I., Protchenko M.V. Moments in reinforced concrete structures under bending with torsion [Моменты в железобетонных конструкциях при изгибе с кручением]. Construction and Reconstruction. 2021. No. 3 (95). Pp. 25–44. (rus) DOI: 10.33979/2073-7416-2021-95-3-27-46
10. Kim C., Kim S., Kim K.-H., Shin D., Ha-roon M., Lee J.-Y. Torsional Behavior of Reinforced Concrete Beams with High-Strength Steel Bars. Structural Journal. 2019. Vol. 116. P. 251–233.
11. Bernardo L. Modeling the Full Behavior of Reinforced Concrete Flanged Beams under Torsion. Applied Sciences. 2019. Vol. 9: 2730. Pp. 1–16. DOI: 10.3390/app9132730.
12. Kolchunov V, Dem'yanov A., Naumov N. Analysis of the "nagel effect" in reinforced concrete structures under torsion with bending. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. P. 953.
13. Rodevich V.V., Arzamastsev S.A. Experimental studies of reinforced concrete elements working under bending with torsion under static and short-term dynamic effects [Экспериментальные исследования железобетонных элементов, работающих при изгибе с кручением при статическом и кратковременном динамическом воздействии]. Housing Construction. 2014. No. 10. Pp. 15–18. (rus)

14. Baikov V.N. Study of reinforced concrete elements subjected to bending and torsion considering the reduction of the yield strength of complex-stressed reinforcement [Issledovanie zhelezobetonnyh elementov, podverzhennyh izgibu i krucheniyu s uchetom snizheniya predela tekuchesti slozhnonapryazhennyj armatury]. Proceedings of Higher Education Institutions. Construction and Architecture. 1975. No. 1. Pp. 11–17. (rus)

15. Chinenkov Yu.V. Study of the behavior of reinforced concrete elements under combined bending and torsion [Issledovanie raboty zhelezobetonnyh elementov pri sovmestnom dejstvii izgiba i krucheniya]. Study of the strength of reinforced concrete structural elements. Moscow: Gosstroyizdat, 1959. Issue 5. (rus)

16. Rodevich V.V., Arzamastsev S.A. On the calculation of reinforced concrete elements under bending with torsion [K raschetu zhelezobetonnyh elementov na izgib s krucheniem]. Proceedings of Higher Education Institutions. Construction. 2015. No. 9. Pp. 99–109. (rus)

17. Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kolchunov V.I., Travush V.I., Demyanov A.I. Deformation of reinforced concrete structures under bending with torsion [Deformirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij pri izgibe s krucheniem]. Construction Materials. 2021. No. 6. Pp. 48–56. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-792-6-48-56 (rus)

18. Chistova T.P. Study of the deformability of reinforced concrete elements of rectangular cross-section under torsion, under bending with torsion, and under combined action of bending and torsional moments and transverse force: Abstract of dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences (05.23.01) [Issledovanie deformativnosti zhelezobetonnyh elementov pryamougol'nogo secheniya pri kruchenii, pri izgibe s krucheniem i pri sovmestnom dejstvii izgibayushchego i krutayushchego momentov i poperechnoj sily: Avtoreferat dis. na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. (05.23.01)]. / Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete "NIIZhB". Moscow: [s. n.], 1973. 22 p. (rus)

19. Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Travush V.I. Calculation model of a complex stress reinforced concrete element of a boxed section during torsion with bending. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2021. No. 3 (51). Pp. 7–26. DOI: 10.36622/VSTU.2021.51.3.001

20. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kapriev S.S., Demyanov A.I., Konorev A.V. Results of experimental studies of square and box-section structures made of high-strength concrete under torsion with bending [Rezul'taty eksperimental'nyh issledovanij konstrukcij kvadratnogo i korobchatogo sechenij iz vysokoprochnogo betona pri kruchenii s izgibom]. Construction and Reconstruction. 2018. Vol. 6 (80). Pp. 32–43. (rus)

21. Vishnu H.J., Paresh V.P., Sharadkumar P.P. Strengthening of RC beams subjected to combined torsion and bending with GFRP Composites. Procedia Engineering. 2013. Vol. 51. Pp. 282–289.

22. Kolchunov V.I., Safonov A.G. Development of calculation of reinforced concrete structures under torsion with bending [Postroenie rascheta zhelezobetonnyh konstrukcij na kruchenie s izgibom]. Proceedings of Orel State Technical University. Series: Construction and Transport. 2008. No. 4. Pp. 7–13. (rus)

23. Galyautdinov Z.R. Strength and deformability of beam and slab structures on flexible supports under short-term dynamic loading: specialty 05.23.01 "Building structures, buildings and constructions": Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences [Prochnost' i deformativnost' balochnyh i plitnyh konstrukcij na podatlivyh oporah pri kratkovremennom dinamicheskem nagruzhenii: special'nost' 05.23.01 «stroitel'nye konstrukcii, zdaniya i sooruzheniya»: Dissertaciya na soiskanie doktora tekhnicheskikh nauk]. Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. Tomsk, 2021. 506 p. (rus)

24. Kotlyarevsky V.A., Ganushkin V.I., Kostin A.A., Kostin A.I., Larionov V.I. Civil defense shelters. Design and calculation [Ubezhiishcha grazhdanskoy oborony. Konstrukcii i raschet]. Moscow: Stroyizdat, 1989. 606 p. (rus)

25. Fedorov V.S., Kolchunov V.I., Pokusaev A.A. Calculation of the distance between spatial cracks and their opening width in reinforced concrete structures under torsion with bending (case 2) [Raschet rasstoyaniya mezhdu prostranstvennymi treshchinami i shiriny ih raskrytiya v zhelezobetonnyh konstrukciyah pri kruchenii s izgibom (sluchaj 2)]. Housing Construction. 2016. No. 5. Pp. 16–21. (rus)

26. Kasaev D.Kh. Crack resistance of reinforced concrete elements of rectangular section under bending with torsion [Treshchinostojkost' zhelezobetonnyh elementov pryamougol'nogo secheniya pri izgibe s krucheniem]. Proceedings of Higher Education Institutions. North Caucasus Region. 2005. No. 2. Pp. 124–125. (rus)

27. Merkulov S.I., Esipov S.M. Methodology of experimental studies of strengthened reinforced concrete beams under bending with torsion [Metodika eksperimental'nyh issledovanij usilennyh zhelezobetonnyh balok pri izgibe s krucheniem]. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Architecture. Construction. Information Technologies - 2023" (Novorossiysk, September 4–8, 2023). Novorossiysk: NF BSTU named after V. G. Shukhov, 2023. Pp. 67–69. (rus)

28. Kóistek V., Prùša J., Vítek J.L. Torsion of reinforced concrete structural members. Solid State Phenomena. 2018. Vol. 272. Pp. 178–184. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.272.178

29. Kalkan I., Kartal S. Torsional rigidities of reinforced concrete beams subjected to elastic lateral torsional buckling. International Journal of Civil and Environmental Engineering. 2017. Vol. 11, No. 7. Pp. 969–972.

30. Santhakumar R., Dhanaraj R., Chandrasekaran E. Behaviour of retrofitted reinforced concrete beams under combined bending and torsion: A numerical study. Electronic Journal of Structural Engineering. 2007. No. 7. Pp. 1–7. DOI: 10.56748/ejse.769

31. Plevkov V.S., Baldin I.V., Baldin S.V., Plevkov R.A. Calculation of the Strength and Fracture Resistance of Reinforced Concrete Elements under the Combined Action of Longitudinal Forces, Bending Moments, and Twisting Moments [Raschet prochnosti i treshchinostojkosti zhelezobetonnyh elementov pri sovmestnom dejstvii prodol'nyh sil, izgibayushchih i krutyashchih momentov]. Bulletin TGASU. Tomsk: TGASU, 2018. Vol. 3. Pp. 133–146. (rus)

32. Baldin S.V. Strength and crack resistance of reinforced concrete elements under combined action of bending moments, longitudinal and transverse forces from static and short-term dynamic loading: specialty 05.23.01 “Building structures, buildings and constructions”: Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences [Prochnost' i treshchinostojkost' zhelezobetonnyh elementov pri sovmestnom dejstvii izgibayushchih momentov, prodol'nyh i poperechnyh sil ot staticheskogo i kratkovremennogo dinamicheskogo nagruzheniya: spetsial'nost' 05.23.01 «stroitel'nye konstrukcii, zdaniya i sooruzheniya»: Dissertaciya na soiskanie kandidata tekhnicheskikh nauk]. Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. Tomsk, 2013. 217 p. (rus)

33. Tsai H.C, Liao M.C. Modeling Torsional Strength of Reinforced Concrete Beams using Genetic Programming Polynomials with Building Codes. KSCE Journal of Civil Engineering. 2019. Vol. 23. Pp. 3464–3475. DOI: 10.1007/s12205-019-1292-7

34. Klein G., Lucier G., Rizkalla S., Zia P., Gleich H. Torsion simplified: a failure plane model for design of spandrel beams. ACI Concrete International Journal, 2012, Pp. 1–19.

35. Nahvi H., Jabbari M. Crack detection in beams using experimental modal data and finite element model. International Journal of Mechanical Sciences. 2005. Vol. 47. Pp. 1477–1497.

36. Morozov V.I., Bakhotsky I.V. On the calculation of fiber-reinforced concrete structures subjected to combined torsion and bending [K raschetu fibrozhelezobetonnyh konstrukcij, podverzhennyh sovmestnomu vozdejstviyu krucheniya s izgibom]. Modern Problems of Science and Education. 2013. No. 5. (rus)

37. Vitek J.L., Prusa J., Kristek V. Torsion of Rectangular Concrete Sections. ACI Symposium Publication, 2020, Vol. 344, Pp. 111–130.

38. Patent No. 2570231 C1 Russian Federation, IPC G01M 7/08, G01N 3/30. Test bench for reinforced concrete elements under combined short-term dynamic action of bending and torsional moments: No. 2014136689/28: appl. 09.09.2014: publ. 10.12.2015 [Patent № 2570231 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK G01M 7/08, G01N 3/30. Stend dlya ispytaniya zhelezobetonnyh elementov na sovmestnoe kratkovremennoe dinamicheskoe vozdejstvie izgibayushchego i krutyashchego momentov: № 2014136689/28]. V.V. Rodevich, G.I. Odnokopylov, S.A. Arzamastsev; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering" (TSUAB), Limited Liability Company "Stroytekhinovatsii TDSK" (LLC "STI TDSK"). EDN LEIZPV. (rus)

39. Patent No. 2578662 C1 Russian Federation, IPC G01M 7/00, G01N 3/303, G01N 3/307. Method of testing building structures under bending with torsion under static and short-term dynamic effects: No. 2015101043/28: appl. 12.01.2015: publ. 27.03.2016 [Patent № 2578662 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK G01M 7/00, G01N 3/303, G01N 3/307. Sposob ispytaniya stroitel'nyh konstrukcij na izgib s krucheniem pri staticeskom i kratkovremennom dinamicheskem vozdejstvii: № 2015101043/28]. G.I. Odnokopylov, V.V. Rodevich, S.A. Arzamastsev; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering" (TSUAB), Limited Liability Company "Stroytekhinovatsii TDSK" (LLC "STI TDSK"). EDN ZEOCOD. (rus)

40. Kolchunov V.I., Kozarez A.V., Protchenko M.V. Resistance of normal and high-strength reinforced concrete structures of rectangular or box section under torsion with bending [Soprotivlenie obychnyh i vysokoprochnyh zhelezobetonnyh konstrukcij pryamougol'nogo ili korobchatogo secheniya pri kruchenii s izgibom]. Proceedings of Higher Education Institutions. Construction. 2022. No. 1. Pp. 5–21. (rus)

41. Kolchunov V.I., Demyanov A.I., Mikhailov M.M. Static-dynamic deformation of compressed concrete in an indeterminate reinforced concrete frame under bending with torsion [Statiko-

dynamicheskoe deformirovaniye szhatogo betona v neopredelimoj zhelezobetonnoj rame pri izgibe s krucheniem]. Proceedings of Higher Education Institutions. Construction. 2020. No. 4. Pp. 5–21. (rus) DOI: 10.32683/0536-1052-2020-736-4-5-21

42. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Korokin D.N. Experimental and theoretical studies of reinforced concrete beams on flexible supports along

inclined sections under seismic and other dynamic loads [Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya zhelezobetonnyh balok na podatlivykh oporakh po naklonnym secheniyam pri sejsmicheskikh i drugikh dinamicheskikh nagruzheniyah]. Earthquake-Resistant Construction. Safety of Structures. 2013. No. 1. Pp. 40–45. (rus)

Information about the authors

Esipov, Stanislav M. PhD. E-mail: bgtu@esipov-sm.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Mishenin, Oleg V. Postgraduate student. E-mail: OlMish6565@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 09.09.2025

Для цитирования:

Есипов С.М., Мишенин О.В. Напряженно-деформированное состояние реконструируемых железобетонных элементов при изгибе с кручением в условиях динамической нагрузки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 1. С. 58–69. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-1-58-69

For citation:

Esipov S.M., Mishenin O.V. Stress-strain state of reconstructed concrete elements under bending and twisting during dynamic loading. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 1. Pp. 58–69. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-1-58-69