

Научная статья

Д.В. КОНИН¹, А.С. КРЫЛОВ¹, А.А. ЖДАНОВА¹, Д.Н. ГАВРИЛОВ¹

¹ Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК)
имени В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, Российская Федерация

ПРОЧНОСТЬ БЕТОННЫХ И СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ С ЛИСТОВЫМ АРМИРОВАНИЕМ ПРИ МНОГООСНЫХ НАГРУЖЕНИЯХ

Аннотация. Современные конструкции зданий и сооружений, выполненные из бетона, железобетона и сталежелезобетона, как правило, работают в условиях сложного напряженного состояния, что приводит к изменению их прочностных характеристик. В случае многоосного сжатия бетона происходит увеличение его прочностных показателей, что может быть выгодно использовано при расчетах и проектировании конструкций. В связи с недостаточной проработкой вопроса в современной научно-технической и нормативной литературе был подготовлен эксперимент по изучению особенностей поведения современных, в том числе высокопрочных, бетонов в условиях многоосного напряженного состояния. Были исследованы образцы с внешним листовым армированием. Оценка особенности работы бетона при сложном многоосном напряженном состоянии выполнена на основе результатов экспериментальных исследований и анализа существующего мирового опыта. Представлено описание исследуемых моделей, приведены особенности использованных при изготовлении моделей материалов и их характеристики. Приведены данные об экспериментальном оборудовании, схеме испытания и нагружения конструкций. Представлены общие виды и характер разрушения, графические результаты испытаний. Выполнено сравнение теоретических и экспериментальных данных.

Ключевые слова: бетон, сталь, железобетон, сталежелезобетонная конструкция, листовое армирование.

Для цитирования: Конин Д.В., Крылов А.С., Жданова А.А., Гаврилов Д.Н. Прочность бетонных и сталежелезобетонных образцов с листовым армированием при многоосных нагружениях // Строительство и реконструкция. 2026. №4. С. 33-46. DOI: 10.33979/2073-7416-2026-126-4-33-46. EDN: OZCYI

© Конин Д.В., Крылов А.С., Жданова А.А., Гаврилов Д.Н., 2026



Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the
Creative Commons NonCommercial license <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Research Article

D. V. KONIN¹, A. S. KRYLOV¹, A. A. ZHDANOVA¹, D. N. GAVRILOV¹¹JSC Research Center of Construction TSNIISK named after V.A. Koucherenko, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation**STRENGTH OF CONCRETE AND COMPOSITE STEEL AND CONCRETE STRUCTURES WITH STEEL-PLATE REINFORCEMENT UNDER MULTYAXIAL LOADING**

Abstract. Modern structures of buildings made of concrete, reinforced concrete and composite steel and concrete are in a complex stress state, which leads to a change in their strength characteristics. In the case of multiaxial compression of concrete, its strength indicators increase, which can be advantageously used in calculations and design of structures. Due to the insufficient study of the issue in modern scientific, technical and regulatory literature, an experiment was conducted to study the behavior of modern, including high performance concrete in a complex multiaxial stress state. Models with steel-plate reinforcement were investigated. The assessment of the behavior of concrete in a complex multiaxial stress state is based on the results of experimental research and analysis of existing international experience. The description of the studied models is presented, the features of the materials used in the manufacture of models and their characteristics are given. Data on experimental equipment, the scheme of testing and loading structures are presented. The general types and nature of destruction, graphical test results are presented. A comparison of theoretical and experimental data is performed.

Keywords: concrete, steel, reinforced concrete, composite steel and concrete structure, steel-plate reinforcement.

For citation: Konin D.V., Krylov A.S., Zhdanova A.A., Gavrilov D.N. Strength of concrete and composite steel and concrete structures with steel-plate reinforcement under multiaxial loading. *Building and Reconstruction*. 2026; 4: 33-46. DOI: 10.33979/2073-7416-2026-126-4-33-46. EDN: OZCYI

Введение

В современной строительной отрасли возрастает технологичность и сложность конструктивных решений. Важным является наличие исчерпывающей информации о поведении конструкций и материалов при различных воздействиях, приводящих к возникновению сложного напряженного состояния в конструкции. Особенности изменения механических характеристик (прочности) современных бетонов при многоосном напряженном состоянии в современных нормах по проектированию железобетонных [1] и сталежелезобетонных конструкций [2] недостаточно раскрыты. Особенности работы бетона при одновременном действии нагрузок в различных плоскостях исследовалась различными авторами. Значимый вклад был внесен Г.А. Гениевым [3-5], Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко [6-10], Е.С. Лейтесом [11], К.Ж. Уиллам – Е.Р. Уорнке [12], другими отечественными и зарубежными авторами [13-23].

Базовым трудом по теории прочности и пластичности бетона и железобетона является [4], где рассмотрены существующие теории прочности, разработанные отечественными и зарубежными авторами, приведены данные экспериментальных и теоретических исследований. Гениевым Г.А. в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко разработаны методы определения предельной несущей способности массивных и плоских конструкций из различных материалов, находящихся в сложном напряженном состоянии, основанные на теории идеально пластичной среды. За основу при разработке кривой, ограничивающей область прочного сопротивления при плоском напряженном состоянии, была принята парабола. Недостатком разработанной теории [4] является некоторое завышение несущей

способности при отдельных сочетаниях внешних нагрузок, действующих по различным ортогональным направлениям. Отличный от [4] критерий прочности предложен Е.С. Лейтесом [11], геометрическая интерпретация которого представляет собой сложную поверхность, сочлененную из трех частей. Критерий показывает хорошую сходимость с опытными данными при плоском напряженном состоянии и имеет некоторые расхождения при трехосном внешнем воздействии. Развитие теории [4] представлено в труде [5], где сформулирован доработанный критерий прочности, основанный, в том числе, на данных [11]. Поэтому недостатки, сформулированные для [4, 11], справедливы также и для теории, представленной в [5]. Условия прочности, разработанные Н.И. Карпенко [7] отличаются по способу построения от всех рассмотренных выше, что позволяет с одинаковой точностью описывать прочность бетона при напряженных состояниях сжатия-растяжения и трехосного сжатия [10]. В [10] приведены сведения о современных критериях прочности для бетонов при объемных напряженных состояниях, описаны достоинства, недостатки и особенности формирования критериев. Отмечается, что критерии прочности в работах [7] и [12] наиболее точно описывают экспериментальные данные при объемном напряженном состоянии. Специалистами НИИЖБ им. А.А. Гвоздева в 1985 году были выпущены Рекомендации по определению прочностных и деформационных характеристик бетона при неосиных напряженных состояниях [24], где приведены основные положения по методике статических испытаний для определения механических свойств бетонов. Положения Рекомендаций были рассмотрены при планировании экспериментальной части исследований.

Зарубежными авторами исследованы различные аспекты теорий прочности и предложены собственные формулировки и интерпретации по определению несущей способности конструкций, находящихся в сложном напряженном состоянии. Например, в [15] приведены сведения по учету трещинообразования, происходящего по разным направлениям; в [20] исследованы особенности работы бетона при двухосном растяжении. В отдельных работах затронуты вопросы работы бетонов повышенной прочности [21, 22].

Рассмотренные экспериментальные и теоретические исследования отечественных и зарубежных авторов недостаточно полно охватывают вопросы работы бетонов высокой прочности, в том числе в составе конструкции (конструкции с листовым армированием), при многоосном напряженном состоянии.

Цель настоящей работы – получить актуальные сведения о работе современных бетонов, являющихся частью сталежелезобетонной конструкции с листовым армированием, находящейся в условиях сложного многоосного напряженного состояния.

Модели и методы

Для проведения испытаний по определению несущей способности бетонных и сталежелезобетонных моделей с листовым армированием при воздействии сжимающих напряжений в различных плоскостях были изготовлены 90 опытных образцов. Модели разделены на 5 групп по 18 моделей в каждой. Модели представлены бетонными и сталежелезобетонными кубами с листовым армированием. Размеры моделей 200х200 мм, приняты исходя из оптимизированных возможностей испытательного стенда и силового оборудования. Кроме того, при подборе размера образцов учитывался фактор соотношения внешних силовых воздействий при создании сложного напряженного состояния.

Модели группы 1 представляют собой бетонные кубы размером 200х200 мм. Проектный класс бетона по прочности на сжатие – В30.

Модели группы 2 представляют собой сталежелезобетонные кубы с листовым армированием размером 200х200 мм. Листовое армирование толщиной 3 мм. Материал листовой арматуры – сталь С255. Проектный класс бетона по прочности на сжатие – В30.

Модели группы 3 представляют собой сталежелезобетонные кубы с листовым армированием размером 200х200 мм. Листовое армирование толщиной 6 мм. Материал листовой арматуры – сталь С255. Проектный класс бетона по прочности на сжатие – В30.

Модели группы 4 представляют собой бетонные кубы размером 200х200 мм. Проектный класс бетона по прочности на сжатие – В100.

Модели группы 5 представляют собой сталежелезобетонные кубы с листовым армированием размером 200х200 мм. Листовое армирование толщиной 3 мм. Материал листовой арматуры – сталь С255. Класс бетона по прочности на сжатие – В100.

Общий вид моделей приведен на рисунках 1, 2. Характеристики моделей с указанием используемых материалов приведены в таблице 1.

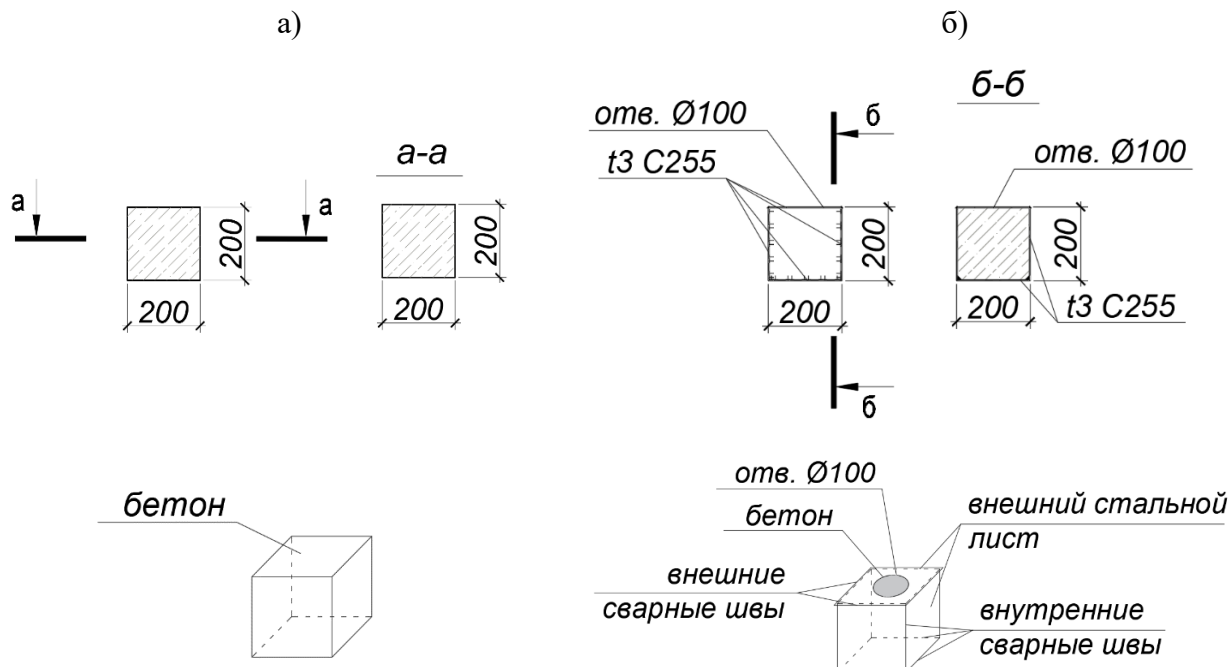


Рисунок 1 – Общий вид экспериментальных моделей:

а) экспериментальные модели бетонных кубов;

б) экспериментальные модели сталежелезобетонных кубов с листовым армированием

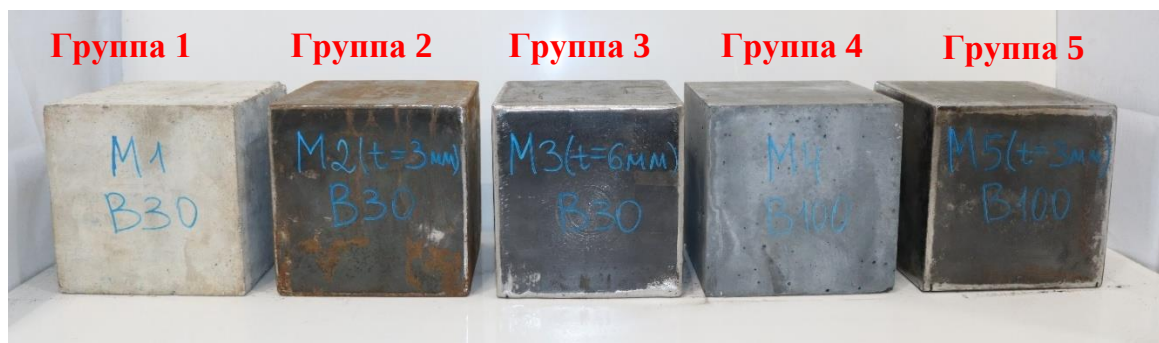


Рисунок 2 – Общий вид экспериментальных моделей

Таблица 1 – Характеристики экспериментальных моделей

№ модели	Группа моделей	Бетон	Тип конструкции	Листовое армирование
1, 2, 3	1	В30	бетон без армирования	-
4, 5, 6	2		бетон с листовым армированием	t=3 мм
7, 8, 9	3		бетон с листовым армированием	t=6 мм
10, 11, 12	4	В100	бетон без армирования	-
13, 14, 15	5		бетон с листовым армированием	t=3 мм

Для выполнения экспериментальных исследований использовано следующее силовое оборудование: машина испытательная гидравлическая Instron серии HDX мод.1000 HDX – максимальное усилие 1000 кН; пресс испытательный гидравлический ПММ-1000 (MAN 1000) – максимальное усилие 10000 кН; гидравлические домкраты ДГ100П300 – максимальное усилие 1000 кН.

Модели испытывались на одноосное, двухосное и трехосное сжатие. Для создания сложного напряженно-деформированного состояния в образце была разработана и изготовлена силовая рама, внутрь устанавливался экспериментальный образец. Нагружение по вертикальной оси выполнялось прессом ПММ-1000 (MAN 1000), по горизонтальным осям – домкратами ДГ100П300, установленными внутри силовой рамы. Общий вид испытательной установки приведен на рисунке 3.

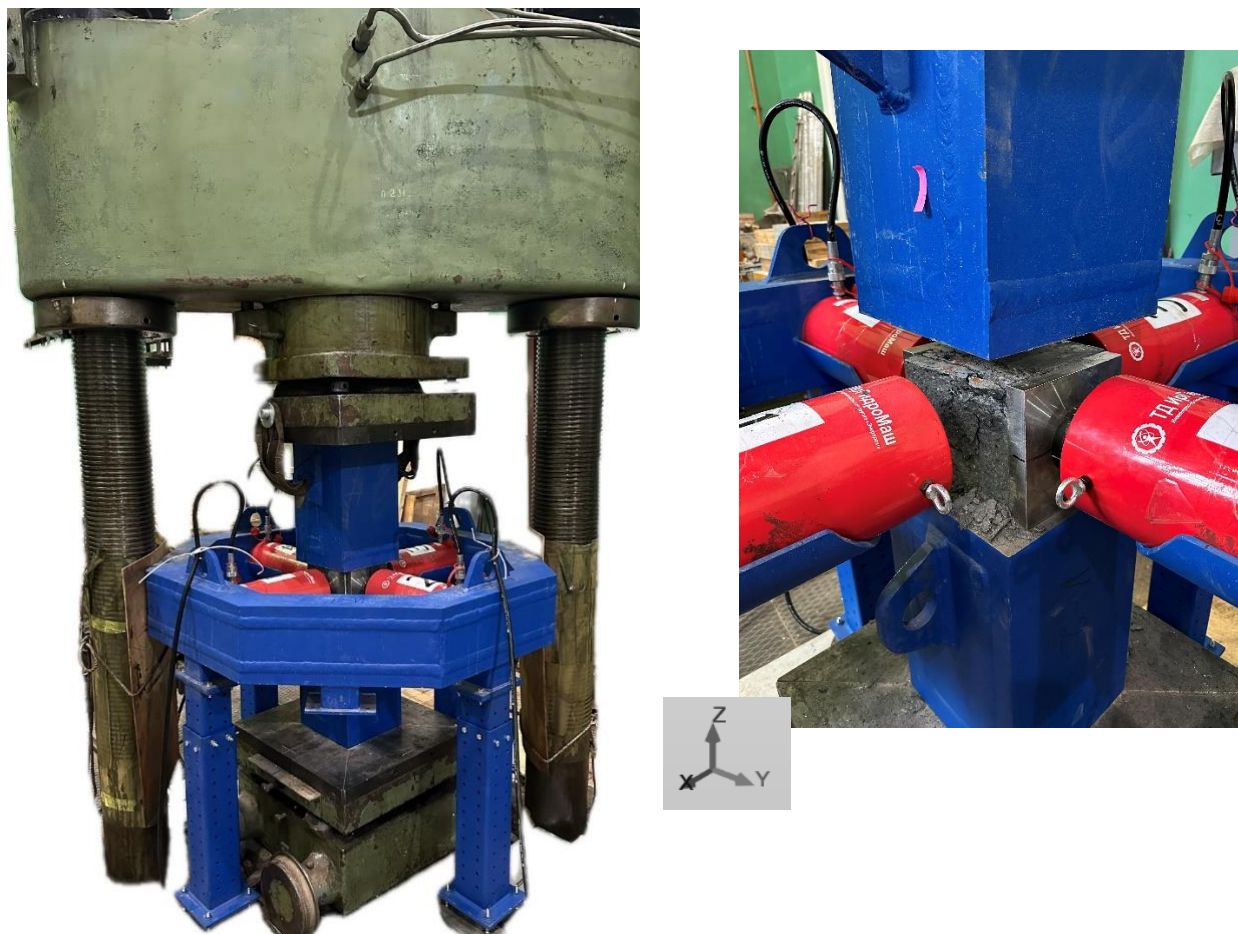


Рисунок 3 – Общий вид испытательной установки для испытаний на двух- и трехосное сжатие

Нагружение производилось с учетом положений ГОСТ 8829-2018 «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости». Нагрузка прикладывалась ступенями с выдержкой на каждой ступени нагружения. Экспериментальные модели были испытаны при различном соотношении внешних воздействий.

Результаты исследования и их анализ

По результатам испытания стандартных образцов стали и бетона получены фактические прочностные характеристики материалов. Класс бетона по прочности на сжатие для моделей групп 1-3 – В41, для моделей групп 4-5 – В91. Предел текучести листового

армирования толщиной 3 мм – 305,1 МПа, толщиной 6 мм – 461,3 МПа. Фактические прочностные характеристики материалов учтены при обработке экспериментальных данных.

Для определения деформаций моделей использованы датчики перемещений – электронные индикаторы и индикаторы часового типа.

Результаты испытаний на одноосное сжатие показали, что достижение предельной нагрузки и разрушение кубов, выполненных из бетонов проектным классом В30 и В100 без листового армирования было схожим, характеризовалось выколом по всем четырем свободным граням фрагментов бетона сложной формы в виде пирамид, либо возникновением вертикальных трещин по свободным граням. Разрушение кубов с листовым армированием сопровождалось локальной потерей устойчивости стальных листов по свободным граням куба с характерным выгибом их наружу.

Общий вид моделей и характерные виды разрушения приведены на рисунках 4, 5.



Рисунок 4 – Общий вид моделей-кубов, испытанных на одноосное сжатие.

Бетон В30 и В100, без листового армирования:

а) до испытаний; б) после испытаний

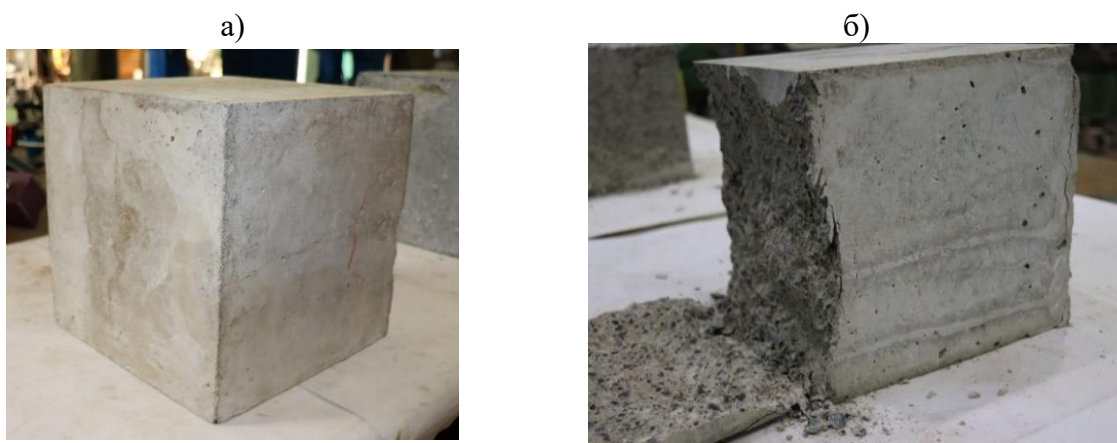


Рисунок 5 – Общий вид моделей-кубов, испытанных на одноосное сжатие.

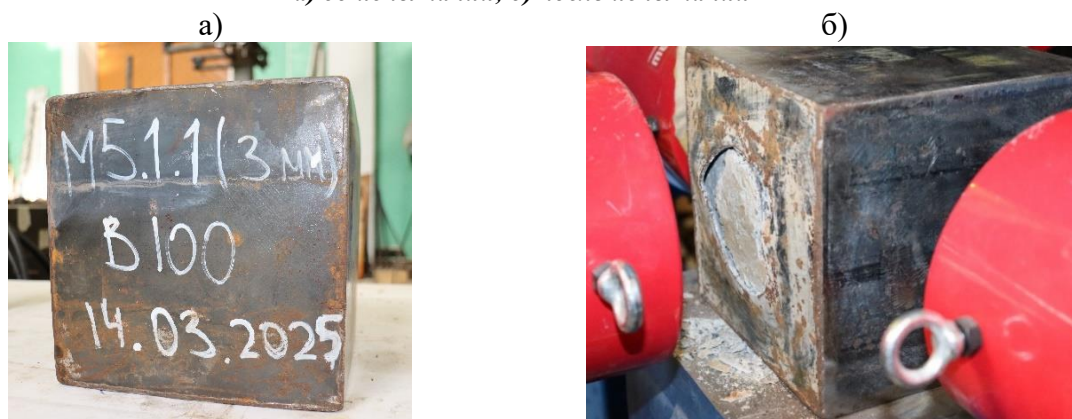
Бетон В30 и В100, с листовым армированием:

а) до испытаний; б) после испытаний

Результаты испытаний на двухосное сжатие показали, что достижение предельной нагрузки и разрушение кубов, выполненных из бетонов В30 и В100 без листового армирования было схожим, характеризовалось выколом по двум свободным граням, не подвергавшимся нагружению, фрагментов бетона сложной формы в виде пирамид, параллелепипедов. Разрушение кубов с листовым армированием сопровождалось локальной потерей устойчивости стальных листов по свободным граням куба с характерным выгибом наружу. Общий вид моделей и характерные виды разрушения приведены на рисунках 6, 7.



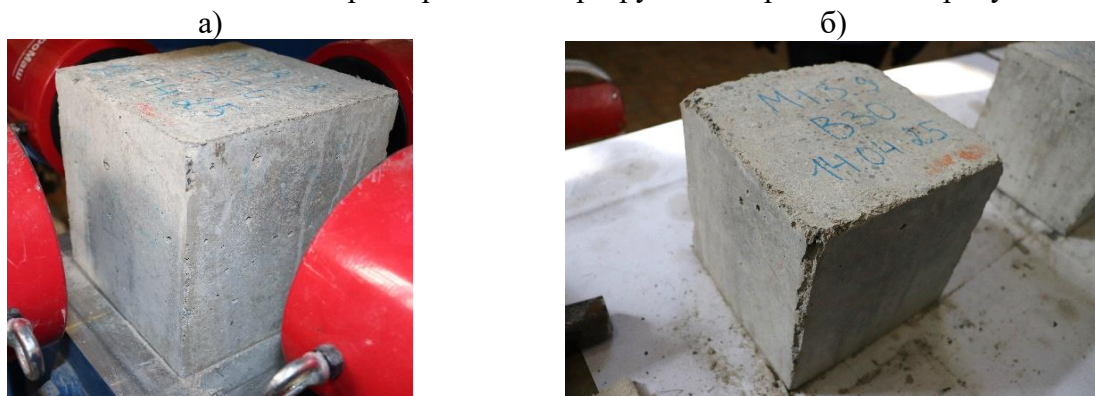
*Рисунок 6 – Общий вид моделей-кубов, испытанных на двухосное сжатие.
Бетон В30 и В100, без листового армирования:
а) до испытаний; б) после испытаний*



*Рисунок 7 – Общий вид моделей-кубов, испытанных на двухосное сжатие.
Бетон В30 и В100, с листовым армированием:
а) до испытаний; б) после испытаний*

Результаты испытаний на трехосное сжатие показали, что достижение предельной нагрузки и разрушение кубов, выполненных из бетонов В30 и В100 без листового армирования было схожим, характеризовалось уменьшением размера образца по вертикали – в направлении приложения основной сжимающей нагрузки. Почти для всех образцов видимые разрушения отсутствовали, за исключением околос вертикальных граней. Разрушение кубов с листовым армированием было аналогичным. Местной потери устойчивости стальных листов не зафиксировано.

Общий вид моделей и характерные виды разрушения приведены на рисунках 8, 9.



*Рисунок 8 – Общий вид моделей-кубов, испытанных на трехосное сжатие.
Бетон В30 и В100, без листового армирования: а) до испытаний; б) после испытаний*



**Рисунок 9 – Общий вид моделей-кубов, испытанных на трехосное сжатие.
Бетон В30 и В100, с листовым армированием:
а) до испытаний; б) после испытаний**

Обобщенные результаты по полученным разрушающим нагрузкам и вертикальным деформациям моделей представлены на рисунках 10 – 14.

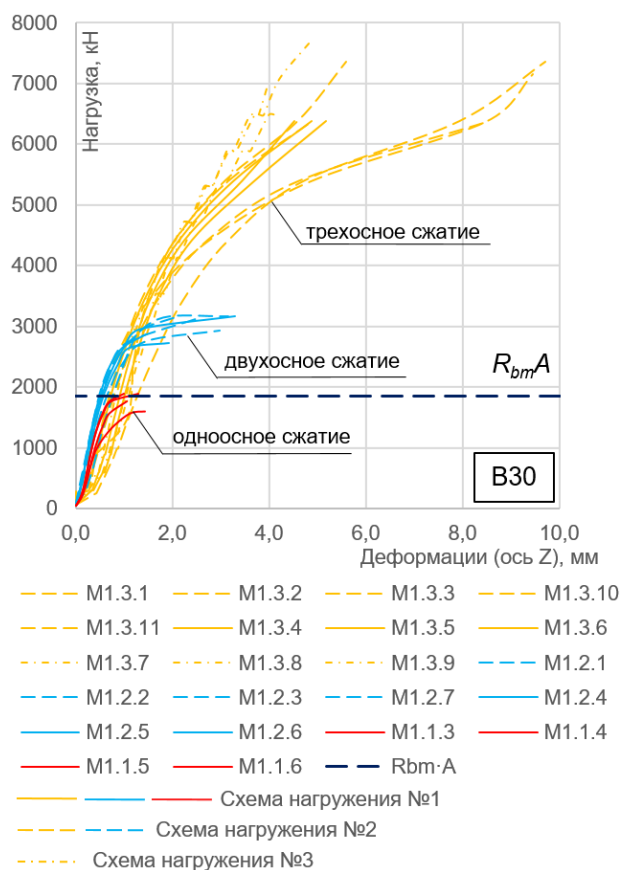


Рисунок 10 – Графическая зависимость деформирования экспериментальных образцов группы М1 под нагрузкой (бетон В30, без листового армирования)

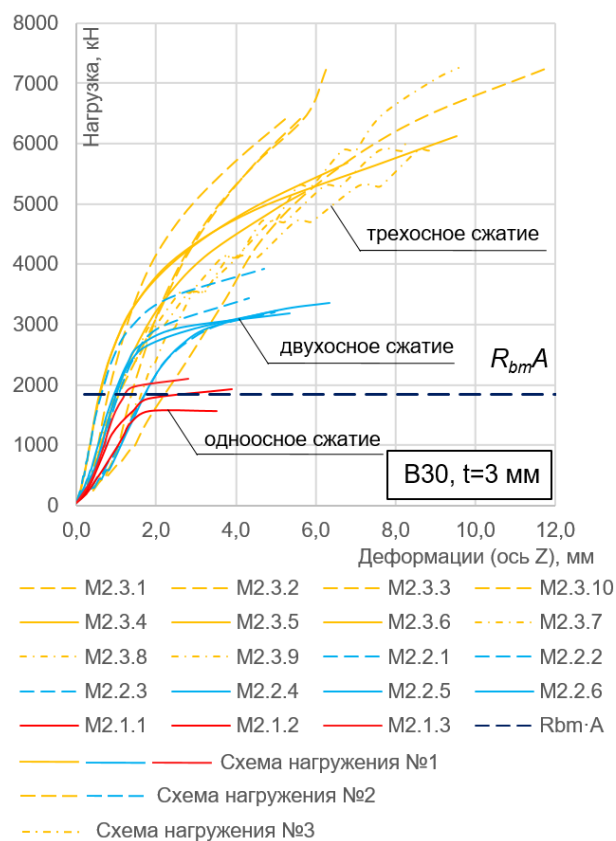
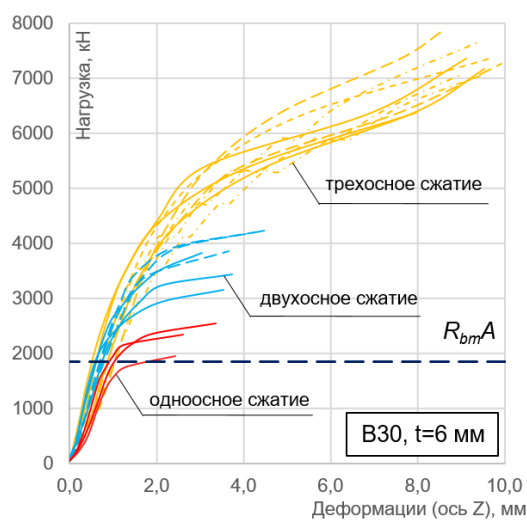
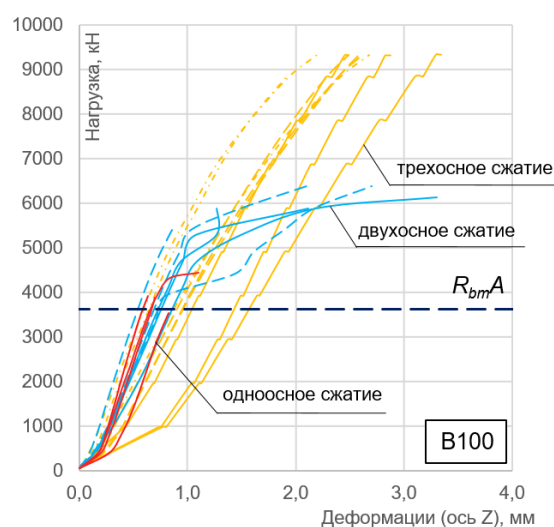


Рисунок 11 – Графическая зависимость деформирования экспериментальных образцов группы М2 под нагрузкой (бетон В30, листовое армирование t=3 мм)



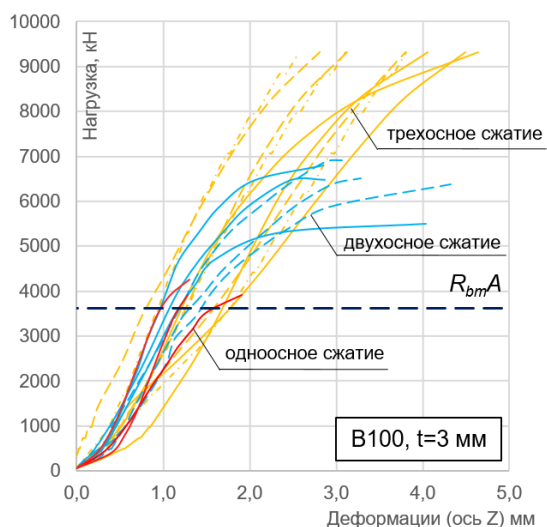
M3.3.1 M3.3.2 M3.3.3 M3.3.4
 M3.3.5 M3.3.6 M3.3.7 M3.3.8
 M3.3.9 M3.2.1 M3.2.2 M3.2.3
 M3.2.4 M3.2.5 M3.2.6 M3.1.1
 M3.1.2 M3.1.3 Rbm·A
 Схема нагружения №1
 Схема нагружения №2
 Схема нагружения №3

Рисунок 12 – Графическая зависимость деформирования экспериментальных образцов группы M3 под нагрузкой (бетон B30, листовое армирование $t=6$ мм)



M4.3.1 M4.3.2 M4.3.3 M4.3.4
 M4.3.5 M4.3.6 M4.3.7 M4.3.8
 M4.3.9 M4.2.1 M4.2.2 M4.2.6
 M4.2.3 M4.2.4 M4.2.5 M4.1.1
 M4.1.2 M4.1.3 M4.1.4 Rbm·A
 Схема нагружения №1
 Схема нагружения №2
 Схема нагружения №3

Рисунок 13 – Графическая зависимость деформирования экспериментальных образцов группы M4 под нагрузкой (бетон B100, без листового армирования)



M5.3.1 M5.3.2 M5.3.3 M5.3.4
 M5.3.5 M5.3.6 M5.3.7 M5.3.8
 M5.3.9 M5.2.1 M5.2.2 M5.2.3
 M5.2.4 M5.2.5 M5.2.6 M5.1.1
 M5.1.2 M5.1.3 Rbm·A
 Схема нагружения №1
 Схема нагружения №2
 Схема нагружения №3

Рисунок 14 – Графическая зависимость деформирования экспериментальных образцов группы M5 под нагрузкой (бетон B100, листовое армирование $t=3$ мм)

На рисунках 10 – 14 прослеживается разница в несущей способности экспериментальных моделей при испытаниях на одноосное, двухосное и трехосное сжатие. Отмечено увеличение прочности по отношению к одноосному сжатию: до двух раз при двухосном сжатии и до трех раз при трехосном сжатии.

Анализ результатов измерения деформаций моделей выявил особенности работы сталежелезобетонных конструкций при многоосном нагружении, обусловленные наличием листового армирования – отмечено более позднее возникновение деформаций растяжения в горизонтальной плоскости по сравнению с моделями без листового армирования. При этом возникновение горизонтальных деформаций растяжения для моделей с листовым армированием наблюдалось при нагрузках от 30 % до 80% от разрушающей. Отмеченный эффект был зафиксирован для одного, либо одновременно для двух горизонтальных направлений приложения нагрузки. Для моделей без листового армирования деформации растяжения в горизонтальной плоскости наблюдались с первой ступени нагружения.

Наличие замкнутого листового армирования и стеснение деформаций бетона по трем направлениям позволяет более эффективно использовать материал заполнения сталежелезобетонной конструкции, так как деформации растяжения в горизонтальном направлении при вертикальном сжатии появляются только на средних и более поздних стадиях нагружения (30-80% от разрушающей). Одновременно заполнение замкнутых полостей стальных конструкций позволяет повысить демпфирование конструкций для снижения отклика при сейсмических или ветровых воздействиях.

Выполнены теоретические расчеты несущей способности экспериментальных моделей, выполненных из бетона без листового армирования, находящихся в сложном напряженном состоянии, по [5]. Сравнение величин несущей способности, полученной экспериментальным и теоретическим путем, приведено в таблице 2 (для величины бокового обжатия 932,0 кН).

Таблица 2 – Сравнение экспериментальной и теоретической несущей способности моделей

№ п/п	Бетон	Напряженное состояние	Теоретическая разрушающая нагрузка, кН	Экспериментальная разрушающая нагрузка, кН	Отличие, %
1	В30	Одноосное	1940,4	1785,4	8,7
2		Двухосное	3135,3	3269,7	4,1
3		Трехосное	4420,4	6874,8	35,7
4	В100	Одноосное	3805,3	4105,5	7,3
5		Двухосное	5228,7	6410,8	18,4
6		Трехосное	6620,8	11772,0*	43,8
* - получена путем аппроксимации экспериментальной кривой (ввиду исчерпания нагрузочных мощностей прессового оборудований, ограниченного величиной 10000 кН)					

Из таблицы 2 видно, что отличие теоретических и экспериментальных данных достигает 43,8% при трехосном сжатии. При этом для одноосного и сжатия отличие не превышает 9,0%, для двухосного сжатия – 18,4 %, что является удовлетворительным результатом. Это говорит о том, что расчетные зависимости для вычисления несущей способности конструкций, выполненных из бетона и находящихся в сложном напряженном состоянии, используемые в базовом труде [5], имеют ограниченную область применения и адаптированы к бетонам низкой и средней прочности, при условии их работы при одноосном, либо при двухосном сжатии.

Ввиду отсутствия исчерпывающих данных (как отечественных, так и зарубежных исследователей) по испытанию сталежелезобетонных конструкций с листовым

армированием при сложных напряженных состояниях и отсутствию наработок по расчету подобных конструкций, теоретические расчеты и сопоставление с результатами проведенного эксперимента не выполнялось. Дальнейшие исследования в данной области планируется продолжить.

Заключение

1. Рассмотрена и проанализирована нормативно-техническая литература по определению прочностных характеристик бетона, находящегося в сложном напряженном состоянии. Запроектированы опытные модели для проведения эксперимента. Проведены испытания экспериментальных образцов-кубов, в том числе с внешним листовым армированием, выполненных из бетонов класса по прочности на сжатие В30, В100, на одно-, двух- и трехосное сжатие в количестве 90 шт.

2. Полученные по результатам испытаний картины разрушения моделей не противоречат известным теоретическим положениям строительной механики и сопротивления материалов. По результатам проведенных экспериментальных исследований зафиксированы и обобщены сведения о разрушающих нагрузках, перемещениях, деформациях и характере разрушения.

3. Результаты анализа данных экспериментальных исследований подтвердили, что в железобетонных и сталежелезобетонных конструкциях, находящихся в сложном напряженном состоянии, наблюдается изменение прочностных характеристик материалов. В частности, при двух-, либо трехстороннем сжатии отмечается повышение прочности бетона.

4. Анализ результатов измерения деформаций моделей выявил особенности работы сталежелезобетонных конструкций при многоосном нагружении, обусловленные наличием листового армирования. Наличие замкнутого листового армирования и стеснение деформаций бетона по трем направлениям позволяет более эффективно использовать материал заполнения сталежелезобетонной конструкции, так как деформации растяжения в горизонтальном направлении при вертикальном сжатии появляются только на средних и более поздних стадиях нагружения (30-80% от разрушающей). Одновременно заполнение замкнутых полостей стальных конструкций позволяет повысить демпфирование конструкций для снижения отклика при сейсмических или ветровых воздействиях.

5. Выполнен анализ экспериментальных данных и сопоставление с результатами, полученными расчетным путем (по существующим теориям прочности). Отличие теоретических и экспериментальных данных достигает 43,8% при трехосном сжатии. При этом для одноосного и сжатия отличие не превышает 9,0%, для двухосного сжатия – 18,4 %, что является удовлетворительным результатом. Это говорит о том, что зависимости, используемые в базовом труде [5], имеют ограниченную область применения и адаптированы к бетонам низкой и средней прочности, при условии их работы при одноосном, либо при двухосном сжатии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.
2. СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные правила проектирования. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.
3. Гениев Г.А., Киссюк В.Н. К вопросу обобщения теории прочности бетона // Бетон и железобетон. 1965. № 2. С. 15–17.
4. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1974. 316 с. EDN: RSNPAX.
5. Гениев Г.А., Аликова Н.М. Вариант условия прочности бетона // Теоретические исследования в области строительной механики пространственных систем: сборник научных трудов / под ред. М.И. Ерхова. М.: ЦНИИСК, 1974. С. 21–27.

6. Карпенко Н.И. К построению условия прочности бетонов при неодноосных напряженных состояниях // Бетон и железобетон. 1985. № 10. С. 35–37.
7. Карпенко С.Н. О разработке более совершенных трехинвариантных критериев прочности бетонов // Известия Орловского государственного технического университета. Серия «Строительство. Транспорт». 2007. № 2/14. С. 42–49. EDN: KZHKNT.
8. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
9. Автоматизированные методы расчета массивных железобетонных конструкций при объемном напряженном состоянии: методическое пособие / под рук. д.т.н. Н.И. Карпенко, д.т.н. В.И. Травуша. М.: Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве, 2019. 131 с.
10. Корсун В.И., Карпенко С.Н., Макаренко С.Ю., Недорезов А.В. Современные критерии прочности для бетонов при объемных напряженных состояниях // Строительство и реконструкция. 2021. № 5 (97). С. 16–30. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-16-30. EDN: HYNCLS.
11. Korsun V., Kalmykov Y., Niedoriezoa A., Korsun A. The Influence of the Initial Concrete Strength on its Deformation under Triaxial Compression // International Scientific Conference Urban Civil Engineering and Municipal Facilities. 2015. No. 117. P. 959–969. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.190. EDN: UZYNEX.
12. Geel van H.J.G.M. Concrete behaviour in multiaxial compression: experimental research: PhD Thesis. Technische Universiteit Eindhoven, 1998. 169 p. DOI: 10.6100/IR515170.
13. Cerioni R., Bernardi P., Michelini E., Mordini A. A general 3D approach for the analysis of multi-axial fracture behavior of reinforced concrete elements // Engineering Fracture Mechanics. 2011. No. 78. P. 1784–1793. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2011.01.020.
14. Chiew S.M., Ibrahim I.S., Sarbini N.N., Mohamed R.N., Jamaluddin N. Behaviour of Plain Concrete and Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) under Biaxial Stresses – A Review // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 431. 14th International Conference on Concrete Engineering and Technology. DOI: 10.1088/1757-899X/431/4/042006.
15. Curbach M., Mosig O., Quast M. Die zweiaxiale dynamische Druckfestigkeit von Beton – The compressive strength of concrete under biaxial dynamic compression // Beton- und Stahlbetonbau. 2019. No. 114. P. 956–964. DOI: 10.1002/best.201900053.
16. Windisch A. Multiaxial strength and deformations of concrete, failure modes and a new failure criterion // Concrete Structures. 2023. P. 137–148. DOI: 10.32970/CS.2023.1.19.
17. Hobbs D.W. Strength of concrete under combined stress // Cement and Concrete Research. 1971. Vol. 1. P. 41–56. DOI: 10.1016/0008-8846(71)90082-2.
18. Lemnitzer L., Eckfeldt L., Lindorf A., Curbach M. Biaxial tensile strength of concrete – Answers from statistics // Materials Science. 2008. P. 1101–1102. DOI: 10.1201/9781439828410.CH184.
19. Yan-Bo Wang, Liew J.Y.R., Lee S.C., Xiong D.X. Experimental Study of Ultra-High-Strength Concrete under Triaxial Compression // ACI Materials Journal. 2016. Vol. 113(1). DOI: 10.14359/51688071.
20. Ritter R., Curbach M. Material Behavior of Ultra-High-Strength Concrete under Multiaxial Stress States // ACI Materials Journal. 2015. Vol. 112(5). P. 641–651. DOI: 10.14359/51687663.
21. Lei B., Qi T., Li Y., Qin S. An improved Lubliner strength model based on Ottosen failure criterion for concrete under multiaxial stress state // Structural Concrete. 2021. Vol. 23(5). P. 3199–3220. DOI: 10.1002/suco.202100450. EDN: WYQVZE.
22. Рекомендации по определению прочностных и деформационных характеристик бетона при неодноосных напряженных состояниях. М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1985. 72 с.

REFERENCES

1. SP 63.13330.2018. Concrete and Reinforced Concrete Structures. General Provisions. Updated edition of SNiP 52-01-2003. (In Russ.)
2. SP 266.1325800.2016. Steel-Reinforced Concrete Structures. Design Rules. Updated edition of SNiP 52-01-2003. (In Russ.)
3. Geniev G.A., Kissyuk V.N. On the problem of generalizing the strength theory of concrete. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1965. No. 2. Pp. 15–17. (In Russ.)
4. Geniev G.A., Kissyuk V.N., Tyupin G.A. Theory of Plasticity of Concrete and Reinforced Concrete. Moscow: Stroyizdat, 1974. 316 p. (In Russ.) EDN: RSNPAX
5. Geniev G.A., Alikova N.M. A variant of the strength condition for concrete. Theoretical Studies in the Field of Structural Mechanics of Spatial Systems. Collection of scientific papers. Ed. by M.I. Erkhov. Moscow: TsNIISK, 1974. Pp. 21–27. (In Russ.)
6. Karpenko N.I. On constructing the strength condition for concretes under multiaxial stress states. *Concrete and Reinforced Concrete*. No. 10, 1985. Pp. 35–37. (In Russ.)
7. Karpenko S.N. On the development of more advanced three-invariant strength criteria for concretes. *Proceedings of Oryol State Technical University. "Construction. Transport"*. 2/14, 2007. Pp. 42–49. (In Russ.) EDN: KZHKNT

8. Karpenko N.I. General Models of Reinforced Concrete Mechanics. Moscow: Stroyizdat, 1996. 416 p. (In Russ.)
9. Methodological Guide. Automated Methods for Calculating Massive Reinforced Concrete Structures under Triaxial Stress State. Under the supervision of Dr. Sc. (Eng.) N.I. Karpenko, Dr. Sc. (Eng.) V.I. Travush. Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation. Federal Autonomous Institution "Federal Center for Standardization, Standardization and Technical Conformity Assessment in Construction". Moscow: 2019. 131 p. (In Russ.)
10. Korsun V.I., Karpenko S.N., Makarenko S.Yu., Nedorezov A.V. Modern strength criteria for concretes under triaxial stress states. *Building and Reconstruction*. 2021. No. 5 (97). Pp. 16–30. (In Russ.) DOI: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-16-30, EDN: HYNCLS
11. Korsun V., Kalmykov Y., Niedoriezoa A., Korsun A. The Influence of the Initial Concrete Strength on its Deformation under Triaxial Compression. *International Scientific Conference Urban Civil Engineering and Municipal Facilities*. 2015. No. 117. Pp. 959–969. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.190, EDN: UZYNEX
12. Geel, van, H. J. G. M. Concrete behaviour in multiaxial compression: experimental research. Phd Thesis 1 (Research TU/e / Graduation TU/e), Built Environment. Technische Universiteit Eindhoven. 1998. 169 p. <https://doi.org/10.6100/IR515170>.
13. Cerioni R., Bernardi P., Michelini E., Mordini A. A general 3D approach for the analysis of multi-axial fracture behavior of reinforced concrete elements. *Engineering Fracture Mechanics*. 2011. No. 78. Pp. 1784–1793. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2011.01.020,
14. Chiew S.M., Ibrahim I.S., Sarbini N.N., Mohamed R.N., Jamaluddin N. Behaviour of Plain Concrete and Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) under Biaxial Stresses - A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 431. 14th International Conference on Concrete Engineering and Technology. 2018. DOI: 10.1088/1757-899X/431/4/042006.
15. Curbach Manfred, Mosig Oliver, Quast Matthias. Die zweiachiale dynamische Druckfestigkeit von Beton - The compressive strength of concrete under biaxial dynamic compression. *Beton- und Stahlbetonbau*. November 2019. No. 114. Pp. 956–964. DOI: 10.1002/best.201900053.
16. Windisch Andor. Multiaxial strength and deformations of concrete, failure modes and a new failure criterion. *Concrete Structures*. December 2023. Pp. 137–148. DOI: 10.32970/CS.2023.1.19.
17. Hobbs D.W. Strength of concrete under combined stress. *Materials Research Department, Cement and Concrete Association, Slough, Bucks, England. Cement and Concrete Research*. 1971. Vol. 1. Pp. 41–56. DOI: 10.1016/0008-8846(71)90082-2
18. Lemnitzer L., Eckfeldt L., Lindorf A., Curbach M. Biaxial tensile strength of concrete – Answers from statistics. *Materials Science*. 2008. Pp. 1101–1102. DOI: 10.1201/9781439828410.CH184. DOI: 10.1201/9781439828410.CH184
19. Yan-Bo Wang, Jat Yuen Richard Liew, Siew Chin Lee, D.X. Xiong. Experimental Study of Ultra-High-Strength Concrete under Triaxial Compression. February 2016. *ACI Materials Journal*. 113(1). DOI: 10.14359/51688071.
20. Robert Ritter, Manfred Curbach. Material Behavior of Ultra-High-Strength Concrete under Multiaxial Stress States. September 2015. *ACI Materials Journal*. 112(5):641–651. DOI: 10.14359/51687663.
21. Bo Lei, Taiyue Qi, Yan Li, Shaojie Qin. An improved Lubliner strength model based on Ottosen failure criterion for concrete under multiaxial stress state. November 2021. *Structural Concrete*. 23(5):3199–3220. DOI: 10.1002/suco.202100450. EDN: WYQVZE
22. Recommendations for Determining Strength and Deformation Characteristics of Concrete under Multiaxial Stress States. Moscow: NIIZhB Gosstroy USSR, 1985. 72 p. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Конин Денис Владимирович, доктор техн. наук, заместитель Директора по научной работе, заведующий лабораторией Высотных зданий и сооружений, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО "НИЦ "Строительство", г. Москва. Scopus ID: 57195770688, SPIN-код: 3456-9230, AuthorID: 558706, <https://orcid.org/0000-0002-9961-1631> E-mail: konden@inbox.ru

Крылов Алексей Сергеевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории Высотных зданий и сооружений, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО "НИЦ "Строительство", г. Москва. SPIN-код: 3401-3073, AuthorID: 955166. E-mail: kryl07@mail.ru

Жданова Анастасия Андреевна, младший научный сотрудник лаборатории Комбинированных конструкций, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО "НИЦ "Строительство", г. Москва. E-mail: zhdanovaaa8002@gmail.com

Гаврилов Дмитрий Николаевич, младший научный сотрудник лаборатории Комбинированных конструкций, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО "НИЦ "Строительство", г. Москва. E-mail: gavrilovd_10@mail.ru

About the authors:

Denis V. Konin, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director of Scientific Work, Head of Laboratory of High-Rise Buildings and Structures, JSC Research Center of Construction TSNIISK named after V.A. Koucherenko, Moscow. Scopus ID: 57195770688, SPIN-код: 3456-9230, AuthorID: 558706, <https://orcid.org/0000-0002-9961-1631>. E-mail: konden@inbox.ru

Alexey S. Krylov, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of Laboratory of High-Rise Buildings and Structures, JSC Research Center of Construction TSNIISK named after V.A. Koucherenko, Moscow. SPIN-код: 3401-3073, AuthorID: 955166. E-mail: kry107@mail.ru

Anastasia A. Zhdanova, Junior Researcher of Laboratory of Composite Steel and Concrete Structure, JSC Research Center of Construction TSNIISK named after V.A. Koucherenko, Moscow. E-mail: zhdanovaaa8002@gmail.com

Dmitry N. Gavrilov, Junior Researcher of Laboratory of Composite Steel and Concrete Structure, JSC Research Center of Construction TSNIISK named after V.A. Koucherenko, Moscow. E-mail: gavrilovd_10@mail.ru

Вклад авторов: Конин Д.В., Крылов А.С. – концепция исследований, научное редактирование, выполнение теоретической подготовки данных; Гаврилов Д.Н., Жданова А.А. – научное редактирование, выполнение теоретической подготовки данных, подготовка рисунков и таблиц.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы утвердили окончательный вариант статьи.

The author's declares no conflict of interest.

The author's has approved the final version.

Статья поступила в редакцию 20.07.2026

Одобрена после рецензирования 02.08.2026

Принята к публикации 14.08.2026

The article was submitted 20.07.2026

Approved after reviewing 02.08.2026

Accepted for publication 14.08.2026