

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-8-16-30

Шипулин С.А., Беляева З.В., Миронова Л.И.Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина***E-mail: sa_shipulin@mail.ru*

РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ПРОЧНОСТИ НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ ПРИ ДВУХОСЕВОМ ДЕЙСТВИИ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ

Аннотация. В действующих нормах проектирования железобетонных конструкций отсутствуют методики расчета наклонных сечений при двухосевом действии поперечных сил. В то же время значительная часть железобетонных конструкций подвержены действию поперечных сил в двух плоскостях. Актуальность статьи определяется отсутствием нормативных методов расчета наклонных сечений железобетонных элементов на двухосевое действие поперечных сил, что вынуждает проектировщиков прибегать к упрощениям в расчетах. В статье выполнен обзор российской и зарубежной литературы по теории расчета железобетонных элементов на действие поперечных сил и анализ методов расчета, предложенных в действующих российских и зарубежных нормах проектирования, а также в нормах прошлых лет. В анализе методов расчета железобетонных элементов на действие поперечных сил рассматривается учет в различных методах расчета факторов, влияющих на прочность наклонных сечений на действие поперечных сил при плоском и косом изгибе, таких как пролет среза, угол наклона силовой плоскости, количество продольного растянутого армирования, Влияние продольных сил, эффект масштаба. Определены основные направления для дальнейшего исследования вопроса и приведены рекомендации, обобщающие отечественный и зарубежный опыт.

Ключевые слова: наклонное сечение, косой изгиб, поперечная сила, железобетонные конструкции, пролет среза, силы зацепления, нагельный эффект.

Введение. Практически все несущие железобетонные конструкции подвержены действию поперечных сил. Часто встречаются элементы, работающие на косой изгиб или на косое внецентренное сжатие. К таким конструкциям относятся колонны каркасных зданий, сваи, подкрановые балки, элементы фахверков наружных стен, линейные конструкции в условиях работы на сейсмические нагрузки. Отличительной особенностью напряженно-деформированного состояния таких элементов является несовпадение силовой плоскости (плоскости действия суммарного вектора поперечной силы) с одной из главных осей сечения рассматриваемой конструкции.

Для случая плоского изгиба или внецентренного сжатия в одной плоскости произведено большое количество исследований и накоплена обширная база опытных данных, а в различные нормы проектирования включены рекомендации и методики расчета. Работа наклонных сечений железобетонных элементов в большинстве теорий описывается комплексом эмпирических или полуэмпирических зависимостей, полученных экспериментально.

В действующих отечественных нормах проектирования отсутствуют рекомендации по расчету железобетонных конструкций на двухосевое действие поперечных сил. Это связано, во-первых, с относительно небольшим количеством теоретических и экспериментальных исследований в этой области, а во-вторых, со сложностью разработки удобной инженерной методики рас-

чета элементов на двухосевое действие поперечных сил, обладающей одновременно простотой применения и достаточной надежностью результата, проверенной экспериментально. Отсутствие нормативных методик расчета конструкций на двухосевое действие поперечных сил делает вопрос исследований по данной теме актуальным.

Целью статьи является анализ и обобщение отечественной и зарубежной нормативной и научно-технической литературы, посвященной вопросам расчета железобетонных элементов на двухосевое действие поперечных сил, и подготовка практических рекомендаций для инженеров-проектировщиков.

Обзор литературы по теме работы. Экспериментальные работы, определившие развитие отечественной теории расчета железобетонных элементов на действие поперечных сил, были произведены в 30–40-х годах XX века М.С. Боришанским под руководством А.А. Гвоздева [1, 2]. В работах М.С. Боришанского исследован вопрос влияния величины пролета среза на прочность элементов без поперечной арматуры, в результате чего была получена эмпирическая формула, устанавливающая зависимость предельной поперечной силы, воспринимаемой бетоном, от рабочих размеров поперечного сечения элемента, прочности бетона на сжатие при изгибе и от угла наклона опасной трещины. Установлено, что при увеличении относительного пролета среза происходит резкое паде-

ние предельной поперечной силы, воспринимаемой элементом, описываемое гиперболической зависимостью. К тем же выводам позднее пришел G.N.J. Kani [3]. Предпосылки метода М.С. Боришанского предполагали, что на прочность элементов влияет величина усилия, воспринимаемая бетоном над наклонной трещиной и величина усилий, воспринимаемых растянутой арматурой, пересекающей наклонную трещину. Метод М.С. Боришанского впоследствии многократно уточнялся и дополнялся другими отечественными исследователями и был включен в СНиП II-V.1-62 «Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования» [4].

А.С. Залесов и О.Ф. Ильин произвели серию исследований [5–7] и скорректировали формулу для определения предельной поперечной силы, предложенную М.С. Боришанским. Прочность бетона на сжатие при изгибе была заменена на прочность бетона при растяжении, которая зависит от прочности бетона на сжатие по степенному закону. Результаты этих исследований были включены в отечественные нормы проектирования СНиП II-21-75 «Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования» [8].

Последующие работы, выполненные в нашей стране А.С. Залесовым, О.Ф. Ильиным [9–13], И.А. Титовым [14], Э.Е. Сигаловым [15], С.Г. Шеиной [16, 17] и другими учеными [18–19], привели к совершенствованию теории расчета железобетонных элементов при действии поперечных сил, которая получила своё отражение в нормах 1984 г. – СНиП 2.03.01-84 «Бетонные и железобетонные конструкции» [20]. В нормах [20] был усовершенствован метод расчета элементов на действие поперечной силы по сжатой полосе между наклонными трещинами путем учета коэффициента поперечного армирования хомутами, нормальными к продольной оси элемента. Кроме того, в данный расчет был введен учет влияния вида бетона на прочность сжатой полосы.

Результаты исследований [12, 19] были включены в нормы проектирования [20] в части учета влияния продольных сжимающих сил на прочность наклонных сечений на действие поперечных сил. Было установлено, что в зависимости от относительного уровня продольного сжимающего усилия и его эксцентриситета изменяется форма разрушения элемента по наклонному сечению, а также величина предельной поперечной силы, воспринимаемой элементом. Методика учета сжимающих сил впоследствии уточнялась. В современные нормы проектирования СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные

конструкции. Основные положения» [21] на основе работ С.А. Зенина, Р.Ш. Шарипова, О.В. Кудинова [22] включен метод учета влияния сжимающих и растягивающих напряжений на прочность при расчете по полосе между наклонными сечениями и по наклонным сечениям для внецентренно сжатых и предварительно напряженных изгибаемых элементов.

В нормы 1984 г. [20] также были включены рекомендации по учету влияния на прочность элементов на действие поперечных сил сжатых свесов полок тавровых и двутавровых сечений на основании обобщения выводов, полученных в исследованиях Ч.Б. Игнатвичуса [23], У.В. Раускаса [24], М.С. Боришанского [1], Л. Барановского [25], А.С. Залесова [13] и других ученых, исследовавших этот вопрос. Было установлено, что наличие полки, расположенной в сжатой зоне элементов тавровых и двутавровых сечений, увеличивает прочность элемента по наклонному сечению. Исследования влияния формы поперечного сечения на прочность наклонных сечений также производили Т.А. Мухамедиев, С.А. Зенин [26, 27], П.П. Польской [28], Е.В. Клименко [29]. Следует отметить, что в современные нормы проектирования [21] учет влияния сжатых свесов полок тавровых сечений не включен, несмотря на значительный объем исследований по этой теме.

В работе Е.В. Клименко [29] исследовалась прочность наклонных сечений элементов таврового сечения при косом изгибе, обозначены и исследованы факторы, влияющие на прочность наклонных сечений. К данным факторам отнесены соотношение длин сторон прямоугольного сечения, наличие и количество поперечной арматуры, наличие и количество продольной растянутой арматуры, величина пролета среза, угол наклона силовой плоскости. В работе [29] разработан метод расчета наклонных сечений для тавровых и прямоугольных элементов при косом изгибе, учитывающий влияние всех обозначенных факторов. Разработанный алгоритм является развитием методики СНиП II-21-75 [8]. Труды Е.В. Клименко не были включены в нормы проектирования железобетонных конструкций. Методика, приведенная в [29], рассмотрена подробнее далее в статье.

В нормативные документы прошлых лет [30, 31] включены рекомендации по расчету наклонных сечений на действие поперечной силы для элементов с поперечной арматурой при двухосевом действии поперечной силы. Условие прочности записано в виде

$$\left[\frac{Q_x}{Q_{bw(x)}} \right]^2 + \left[\frac{Q_y}{Q_{bw(y)}} \right]^2 \leq 1, \quad (1)$$

где Q_x, Q_y – составляющие поперечной силы, действующие соответственно вдоль оси симметрии и X и в нормальной к ней оси Y в наиболее удаленном от опоры конце наклонного сечения;

$Q_{bw(x)}, Q_{bw(y)}$ – предельные поперечные силы, воспринимаемые наклонным сечением по бетону и по поперечной арматуре при действии их соответственно вдоль осей X и Y , и определяемые в соответствии с [30, 31].

Данная формула в литературе имеет название эллиптической кривой взаимодействия, что продемонстрировано на рис. 1.

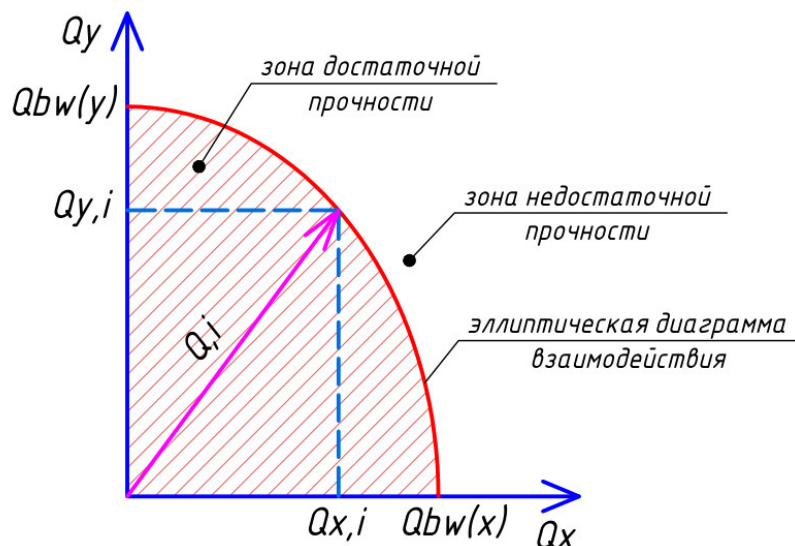


Рис. 1. Эллиптическая диаграмма взаимодействия несущей способности по поперечной силе при двухосевом нагружении

Данная методика расчета не была включена в следующие нормативные документы [32, 33].

А.С. Залесовым, А.А. Гвоздевым, Ю.А. Климовым, О.Ф. Ильиным, И.А. Титовым [9, 10, 12, 19] и другими исследователями была разработана усовершенствованная методика расчета железобетонных элементов при одноосевом действии поперечных сил на основе физических моделей наиболее характерных форм разрушения элементов с учетом напряженно-деформированного состояния сжатой зоны бетона. Исследователи предложили диско-связевую модель железобетонного элемента, состоящую из железобетонных блоков, соединенных между собой податливыми связями. На основании рассмотрения равновесия модели определяются продольные и поперечные усилия в бетоне над наклонной трещиной и под ней, продольные и поперечные усилия в продольной арматуре и продольные усилия в поперечной арматуре, а также силы зацепления по берегам наклонной трещины. В качестве расчетного критерия прочности бетона при плоском напряженном состоянии авторами принято условие прочности, предложенное А.А. Гвоздевым. Методика расчета диско-связевой модели железобетонного элемента на сегодняшний день не была включена в нормы проектирования [20, 21].

Вопросом учета влияния количества продольной растянутой арматуры на прочность

наклонных сечений на действие поперечных сил занимался А.С. Силантьев [34]. Им установлено, что предельная поперечная сила, воспринимаемая элементом без поперечного армирования, зависит от содержания продольной растянутой и сжатой арматуры, собственного момента сопротивления арматурных стержней и вида армирующего материала. Продольное армирование влияет на поперечную силу, воспринимаемую наклонным сечением через два механизма – через высоту сжатой зоны (косвенное влияние) и через собственное сопротивление срезу арматурных стержней (прямое влияние). Косвенное влияние через высоту сжатой зоны оказывается существенно более значимым, чем прямое. Разработана итерационная методика расчета наклонных сечений, основанная на сочетании нелинейной деформационной модели и теории прочности бетона Г.А. Гениева [35].

В нормах Европейского союза [36] различают случаи проектирования элементов с поперечной арматурой и без нее. Расчет конструкций без поперечного армирования производится по эмпирической зависимости, учитывающей цилиндрическую прочность бетона на сжатие через кубический корень, процент продольного растянутого армирования, сжимающие или растягивающие напряжения, вызванные действием продольных сил, влияние коэффициента масштаба

(size effect). Достоинством данной зависимости по отношению к отечественным нормам [21] можно назвать учет продольного армирования и коэффициента масштаба. К недостаткам следует отнести отсутствие учета влияния пролета среза на прочность элемента, а также отсутствие учета формы сечения элемента, отличной от прямоугольной. Методы расчета элементов на двухосевое действие поперечных сил в [36] также не введены.

Расчет конструкций с поперечной арматурой согласно [36] производится на основании ферменной аналогии (truss and tie model). За несущую способность элемента по поперечной силе принимается наименьшее из двух вычисляемых величин – несущая способность, определяемая только по поперечной арматуре, или несущая способность, определяемая по условию прочности сжатой наклонной полосы между хомутами. В общем случае расчет элементов с хомутами производится без учета работы бетона в наклонном сечении.

В нормах США [37] несущая способность элементов на действие поперечной силы определяется как сумма несущих способностей по бетону и по арматуре. Для элементов без поперечного армирования в определении предельной поперечной силы, воспринимаемой бетоном, учитывается влияние таких факторов, как коэффициент продольного армирования, размер поперечного сечения через коэффициент масштаба (size effect), величина сжимающих или растягивающих напряжений в сечении. При этом прочность бетона, входящая в формулу, определяется через квадратный корень из цилиндрической прочности бетона на сжатие. Для элементов с поперечной арматурой в определении поперечной силы, воспринимаемой бетоном, не учитывается коэффициент масштаба. Как и в случае с Европейскими нормами [36] достоинством метода, приведенного в [37], является учет эффекта масштаба и учет количества продольного армирования, а недостатком является отсутствие учета величины пролета среза и формы поперечного сечения, отличной от прямоугольной.

Согласно [37] поперечная сила, воспринимаемая поперечной арматурой в наклонном сечении, определяются аналогично методике, приведенной в отечественных нормах [21]. При этом величина пролета среза постоянна и равна рабочей высоте сечения.

Американские нормы [37] содержат рекомендации по расчету элементов на двухосевое действие поперечной силы, основанные на исследованиях Н. Umehara и J.O. Jirsa [38]. Испытания колонн, подверженных двухосевому действию

поперечной силы, показали, что предельная поперечная сила, воспринимаемая сечением, зависит от предельных поперечных сил, воспринимаемых элементом в направлениях главных осей, по эллиптической диаграмме взаимодействия. Однако для учета взаимодействия прочностей элемента по направлениям отдельных осей на действие поперечных сил в нормы [37] введены трехлинейные (не эллиптические) зависимости (2, 3, 4):

$$\frac{V_{u,x}}{\phi V_{n,x}} \leq 0,5 ; \quad (2)$$

$$\frac{V_{u,y}}{\phi V_{n,y}} \leq 0,5 ; \quad (3)$$

$$\frac{V_{u,x}}{\phi V_{n,x}} + \frac{V_{u,y}}{\phi V_{n,y}} \leq 1,5 . \quad (4)$$

Должно быть выполнено или условие (2), или условие (3). Если условия (2) и (3) одновременно не выполняются, должно быть выполнено условие (4). В формулах (2, 3, 4) используются следующие обозначения:

$V_{(u,x)}, V_{(u,y)}$ – поперечные силы, действующие в рассматриваемом нормальном поперечном сечении;

$V_{(n,x)}, V_{(n,y)}$ – предельные величины поперечных сил, воспринимаемых бетоном и арматурой элемента в направлении осей поперечного сечения X и Y согласно [37];

ϕ – коэффициент снижения прочности, предусмотренный [37].

Диаграмма взаимодействия, соответствующая условиям (2–4), приведена на рисунке 2. Сравнение диаграмм взаимодействия по условиям (2–4) и условию (1) приведено на рисунке 3.

В японских нормах проектирования [39] в случае двухосевого действия поперечных сил методика оценки прочности элемента аналогична [30, 31] – применяется метод диаграммы эллиптического взаимодействия:

$$\left(\frac{\gamma_i V_{dx}}{V_{yx}} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_i V_{dy}}{V_{yy}} \right)^2 \leq 1,0 , \quad (5)$$

где V_{dx}, V_{dy} – величина поперечной силы в рассматриваемом сечении в направлении главных осей поперечного сечения;

V_{yx}, V_{yy} – величина несущей способности по поперечной силе в направлении главных осей поперечного сечения элемента X и Y ;

γ_i – коэффициент надежности.

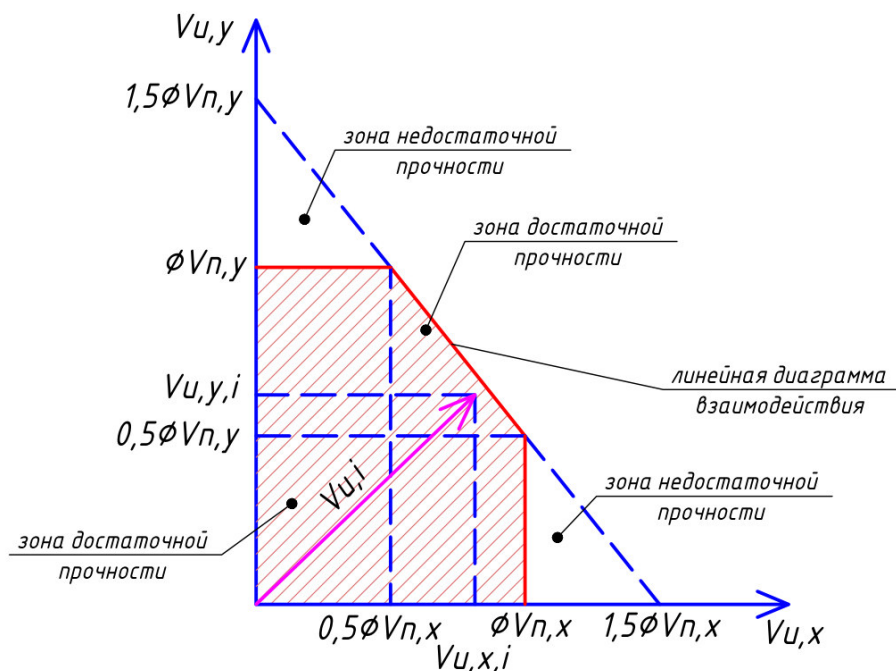


Рис. 2. Линейная диаграмма взаимодействия несущей способности по поперечной силе при двухосевом нагружении

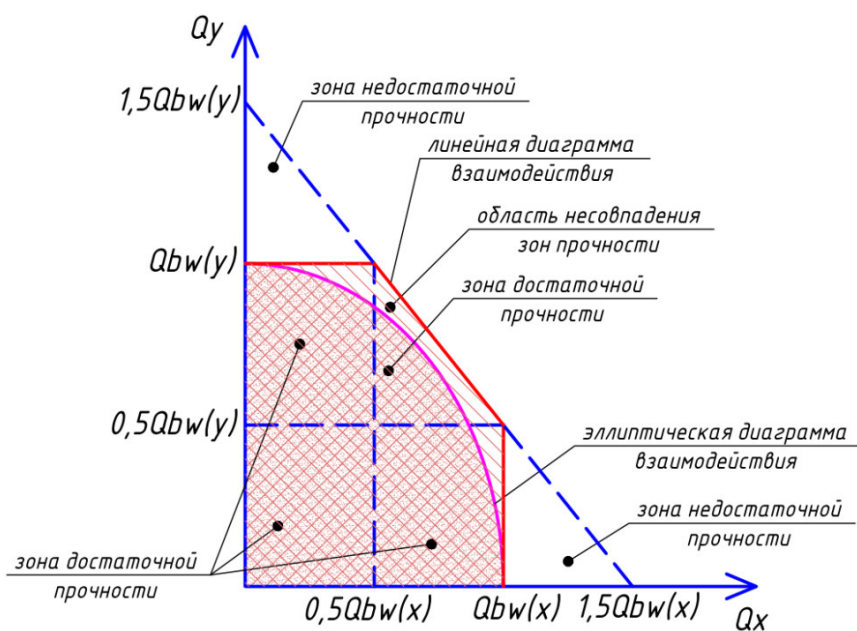


Рис. 3. Сравнение эллиптической и линейной диаграмм взаимодействия

Величина несущей способности по поперечной силе согласно [39] определяется как сумма несущих способностей по бетону и по арматуре. Несущая способность по бетону определяется без учета влияния пролета среза, но с учетом коэффициента масштаба, коэффициента продольного армирования, сжимающих или растягивающих усилий. Несущая способность по поперечной арматуре определяется аналогично [36, 37] на длине проекции наклонной трещины равной h_0 .

Оценка надежности методов расчета, приведенных в [37, 38] выполнена чилийскими уче-

ными Leonardo M. Massone и Agustín Correa в работе [40]. На основании обобщения экспериментальных данных сделан вывод о том, что эллиптические и трехлинейные диаграммы позволяют оценить несущую способность колонн при двухосевом действии поперечных сил с достаточной надежностью.

В работе тайских и японских ученых С. Hansarinyo, К. Maekawa и Т. Chaisomphob [41] произведены испытания серии железобетонных балок прямоугольного поперечного сечения под различным углом наклона силовой плоскости. Для испытуемых балок были построены теорети-

ческие эллиптические диаграммы взаимодействия в соответствии с [39]. Авторы сделали вывод, что несущая способность, полученная по результатам испытаний, расходится с теоретическими величинами, вычисленными по эллиптической зависимости, на $-3 \dots +14 \%$.

R. Thamrin [42] провел экспериментальные исследования шести балок без поперечного армирования, подверженных косому изгибу при относительных пролетах среза более 3 и пришел к выводу, что формула, описывающая несущую способность элементов без поперечной арматуры на действие поперечной силы при плоском изгибе, приведенная в [37], дает оценку несущей способности на 25–55 % ниже, чем величина несущей способности, полученная экспериментально.

A. Tinini [43] аналогично произвел испытания шести балок квадратного поперечного сечения, подверженных косому изгибу, и пришел к выводу, что для балок квадратного поперечного сечения диаграмма прочности при двухосевом действии поперечных сил описывается окружностью.

Факторы, влияющие на прочность наклонных сечений на действие поперечных сил при плоском и косом изгибе.

Пролет среза. Под пролетом среза для элемента, нагруженного сосредоточенными силами, понимается расстояние от сосредоточенной силы до опоры. Известно, что наименьшей несущей

способности наклонного сечения соответствует величина пролета среза от $2h_0$ до $3,5h_0$. В этом диапазоне происходит переход от разрушения по наклонному сечению к разрушению по нормальному сечению от изгиба. Согласно [21] наименьшая величина несущей способности соответствует относительному пролету среза равному $3h_0$. Для величин пролета среза более $3h_0$ несущая способность балок на действие поперечных сил по бетону практически не изменяется и остается минимальной и постоянной [18, 19].

Зарубежные нормы проектирования [36, 37, 39] не рассматривают влияние фактора пролета среза, принимая значение несущей способности по бетону минимальной, существенно упрощая инженерные расчеты и одновременно увеличивая резервы прочности конструкций.

Для расчета элементов при косом изгибе на действие поперечных сил в работе [29] предложено учитывать величину пролета среза при определении прочности по бетону Q_b аналогично принципу, предусмотренному в [21]:

$$Q_b = \frac{K (bh_0^2)_{\text{пр}} R_{bt}}{C}, \quad (6)$$

где R_{bt} – прочность бетона на растяжение;

C – длина проекции на продольную ось элемента следа плоскости среза на силовой плоскости (рис. 4);

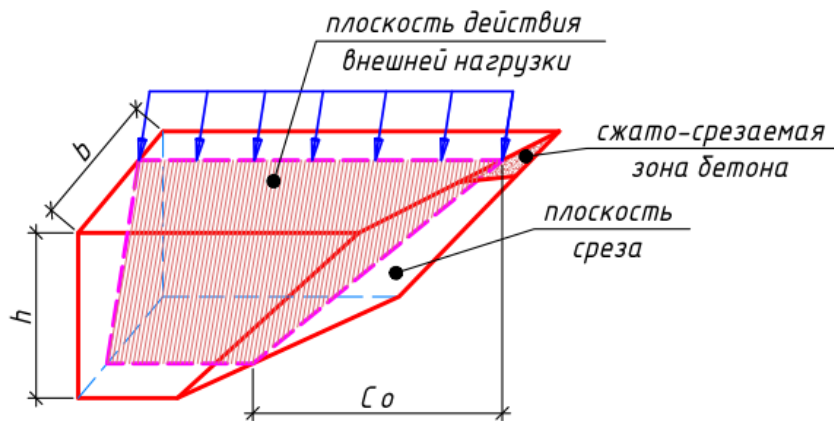


Рис. 4. Принцип определения величины пролета среза при расчете на двухосевое действие поперечных сил

K – эмпирический коэффициент, учитывающий влияние различных факторов, определяемый по выражению:

$$K = K_\alpha (1 + K_\beta^{h/b}); \quad (7)$$

K_α – коэффициент, учитывающий приведенный процент растянутого армирования при косом изгибе:

$$K_\alpha = \sqrt{0,5\mu_s^{\text{пр}}}, \quad (8)$$

где $\mu_s^{\text{пр}}$ – коэффициент продольного растянутого армирования, приведенный к углу наклона силовой плоскости, выраженный в процентах:

$$\mu_s^{\text{пр}} = \mu_s^x \cos \beta + \mu_s^y \sin \beta \quad (9)$$

и

$$\mu_s^{\text{пр}} \geq 0,8\%; \quad (10)$$

$K_{\beta}^{h/b}$ – коэффициент, учитывающий одновременно угол наклона силовой плоскости и соотношение сторон прямоугольного сечения:

$$K_{\beta}^{h/b} = \begin{cases} \left(7,9 - \frac{3,3h}{b}\right) \sin \beta & \text{при } 0 \leq \beta \leq 6^{\circ} \\ 0,79 - \frac{0,33h}{b} & \text{при } 6^{\circ} < \beta \leq 45^{\circ} \end{cases}, \quad (11)$$

$(bh_0^2)_{\text{пр}}$ – произведение ширины сечения на рабочую высоту, приведенное к углу наклона силовой плоскости

$$(bh_0^2)_{\text{пр}} = bh_0^2 \cos \beta + hb_0^2 \sin \beta. \quad (12)$$

В работе [29] рекомендуется в расчете величину пролета среза ограничивать величинами:

$$0,6h_0^{\text{пр}} \leq C \leq 2h_0^{\text{пр}}, \quad (13)$$

где $h_0^{\text{пр}}$ – приведенная рабочая высота сечения:

$$h_0^{\text{пр}} = h_0 \cos \beta + b_0 \sin \beta. \quad (14)$$

Угол наклона силовой плоскости β и соотношение сторон поперечного сечения h/b . Под углом наклона силовой плоскости β понимается угол между одной из главных осей прямоугольного поперечного сечения и плоскостью действия суммарного вектора поперечной силы (рис. 5). Данный параметр является важнейшим при оценке прочности элементов при косом изгибе.

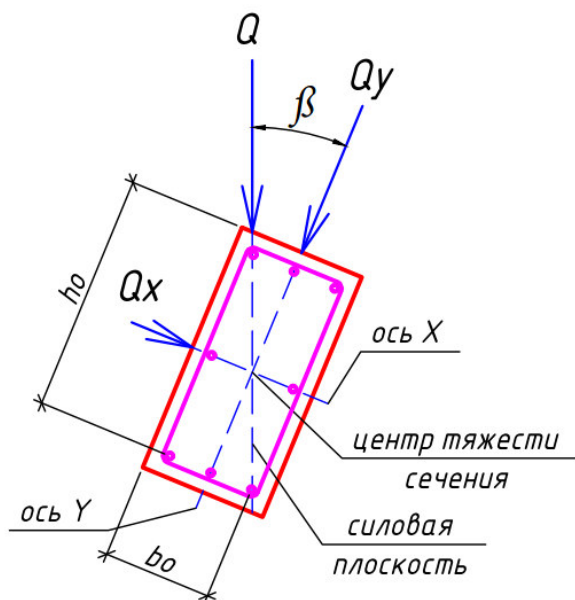


Рис. 5. Определение угла наклона силовой плоскости

При изменении угла наклона силовой плоскости и постоянном соотношении h/b меняется форма сжато-срезаемой зоны бетона в нормальных сечениях элемента – форма может быть треугольной или иметь форму трапеции. Изменяется также расположение этой зоны относительно

граней сечения. Данные изменения влияют на величины касательных и нормальных напряжений в сжато-срезаемой зоне и влияют на условия её прочности при плоском напряженном состоянии. Те же самые изменения происходят при постоянном угле β и при изменении соотношения длин сторон прямоугольного поперечного сечения h/b .

Предлагаемые методики расчета наклонных сечений при двухосевом действии поперечной силы должны учитывать угол β и соотношение сторон поперечного сечения h/b . Кроме того, расчетные зависимости должны перерождаться в зависимости, принятые для случая плоского изгиба при углах наклона силовой плоскости 0 и 90°.

В работе [29] угол наклона силовой плоскости введен в расчетные соотношения для определения прочности наклонного сечения при косом изгибе элемента по бетону и по арматуре через вычисление приведенного произведения рабочей высоты сечения на ширину сечения (формулы (12) и (14)) и при вычислении значений эмпирических коэффициентов (формулы (9) и (11)).

Несущая способность по поперечной арматуре, нормальной к продольной оси элемента. В действующих российских нормах [21] несущая способность поперечной арматуры, нормальной к продольной оси элемента, определяется через произведение площади этой арматуры A_{sw} на величину расчетного сопротивления R_{sw} и на коэффициент неравномерности распределения усилий между поперечными стержнями, принятый равным 0,75. Поперечная арматура учитывается на длине проекции наклонной трещины S_0 . Длина проекции наклонной трещины определяется из условия минимума несущей способности, соответствующего минимальному суммарному значению поперечных сил, воспринимаемых бетоном и поперечной арматурой.

В случае косоугольного изгиба возникают дополнительные задачи по определению длины проекции наклонной трещины, пересекающей поперечную арматуру, а также по определению расчетного количества поперечной арматуры, учитываемой в расчете, принимая во внимание угол наклона силовой плоскости.

В работе [29] предлагается величину поперечной силы, воспринимаемой хомутами, опре-

делять через интенсивность поперечного армирования, определенную для случая косоугольного изгиба отдельно по каждой из сторон сечения элемента и длину проекции наклонной трещины, спроецированную на плоскость приложения внешнего воздействия. Из предположения, что поверхность наклонной трещины при косом изгибе является плоской, делается вывод о том, что она проецируется на боковые грани балки в виде параллелограмма. Длина проекций наклонной трещины на нижней грани равна длине проекции наклонной трещины на верхней грани, а также длины проекций наклонных трещин на боковых гранях равны между собой – $C_0^B = C_0^H; C_0^{БЛ} = C_0^{БП}$ (рис. 6).

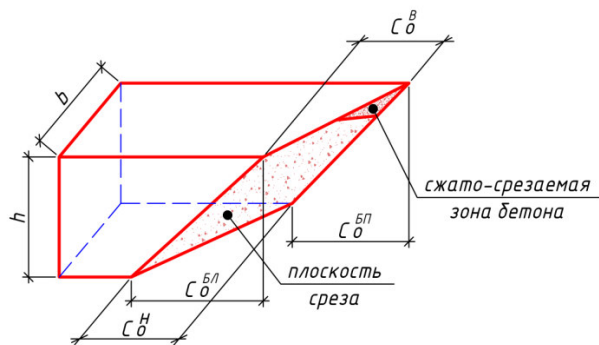


Рис. 6. Обозначение проекций локальных наклонных трещины на гранях элемента

Если обозначить $q^{БЛ}, q^{БП}, q^B, q^H$ – интенсивности поперечного армирования на боковой левой, боковой правой, верхней и нижней гранях поперечного сечения элемента, то несущая способность поперечной арматуры будет определяться

$$Q_{sw} = (q^B + q^H) C_0^B \sin \beta + (q^{БЛ} + q^{БП}) C_0^{БЛ} \cos \beta. \quad (15)$$

По результатам обработки экспериментальных данных были получены зависимости для определения $C_0^B = C_0^H$ и $C_0^{БЛ} = C_0^{БП}$:

$$C_0^{БП} = C_0 \left(1 - \frac{0,1h \sin \beta}{b} \right) \cos \beta \leq 2h_0; \quad (16)$$

$$C_0^B = C_0 \left(1 - \frac{0,1b \sin \beta}{h} \right) \sin \beta \leq 2b_0; \quad (17)$$

здесь C_0 – длина проекции на продольную ось элемента следа плоскости среза на силовой плоскости.

Рекомендуется длины проекций наклонных трещин на гранях сечения при определении значения Q_{sw} ограничить величинами $2h_0$ для боковых граней и $2b_0$ для верхней и нижней граней.

Зависимость для определения поперечной силы, воспринимаемой хомутами при косом изгибе, преобразуется к виду

$$Q_{sw} = AC_0; \quad (18)$$

$$A = (q^{БЛ} + q^{БП}) \left(1 - \frac{0,1h \sin \beta}{b} \right) \cos^2 \beta + (q^B + q^H) \left(1 - \frac{0,1b \sin \beta}{h} \right) \sin^2 \beta. \quad (19)$$

Исходя из условия минимума суммарной несущей способности по бетону и по арматуре величину C_0 рекомендуется определять по формуле

$$C_0 = \sqrt{\frac{K (bh_0^2)_{пр} R_{bt}}{A}}. \quad (20)$$

Количество продольного растянутого армирования, нагельный эффект в продольной арматуре. Учет влияния процента продольного растянутого армирования на прочность наклонных сечений элементов при действии поперечных сил включен в зарубежные нормы проектирования [36, 37, 39]. Несмотря на значительный объем отечественных исследований по данному вопросу, учет влияния продольного растянутого армирования не включен в отечественные нормы проектирования [21]. В работе [19] отмечено, что в большей степени влияние количества продольной растянутой арматуры проявляется в элемен-

тах без поперечного армирования. С увеличением процента продольного армирования от 1 до 4 % несущая способность элементов без поперечной арматуры повышается на 30–50 %, а с поперечной арматурой в зависимости от количества хомутов на 20–35 %. С уменьшением относительной длины пролета среза влияние продольной арматуры падает. При форме разрушения по сжатой наклонной полосе между наклонными трещинами или между грузом и опорой продольная арматура не оказывает значительное влияние на несущую способность. В работе [34] указано, что действующая методика расчета по прочности наклонных сечений для элементов без поперечной арматуры в случае малых процентов продольного армирования переоценивает несущую способность на 30 %, а в случае нормально армированных элементов и элементов, находящихся на границе переармирования, недооценивает ее в 1,5–2 раза.

Рост прочности наклонного сечения непропорционален увеличению количества продольной растянутой арматуры. Во всех проанализированных работах прочность элементов на действие поперечных сил ставится в зависимости от процента армирования в степени меньше единицы (как правило, применяется степень 1/2 или 1/3).

Продольное растянутое армирование влияет на предельную поперечную силу в наклонном сечении через два механизма – через высоту сжатой зоны бетона и через собственное сопротивление срезу арматурных стержней (нагельный эффект). С увеличением высоты сжатой зоны бетона повышается абсолютная величина предельной поперечной силы, воспринимаемой бетоном при плоском напряженном состоянии (одновременном действии нормальных сжимающих и касательных напряжений). Влияние нагельного эффекта существенно менее значимо, чем влияние фактора относительной высоты сжатой зоны бетона [34].

В работе [29] учет продольного растянутого армирования для элементов, подверженных двухосевому действию поперечных сил учитывается коэффициентом K_a (см. формулу (8)).

Силы зацепления по берегам наклонной трещины. Силы зацепления, наряду с нагельным эффектом и сопротивлением срезу сжатой зоны бетона, являются одной из трех фундаментальных составляющих прочности наклонных сечений на действие поперечных сил для элементов без поперечного армирования (Yuguang Yang [44]). Точное экспериментальное определение величин сил зацепления затруднено.

В действующих российских нормах проектирования [21] величина сил зацепления наряду с величиной нагельного эффекта учитывается косвенным путем через значения эмпирических коэффициентов, входящих в формулы метода М.С. Боришанского. В явном виде силы зацепления не определяются.

В работе [29] учет сил зацепления и нагельного эффекта при двухосевом действии поперечных сил также производится при помощи эмпирических коэффициентов, входящих в формулу (6).

Эффект масштаба (size effect). В зарубежных нормах проектирования включен учет влияния эффекта масштаба (size effect) при расчете элементов на действие поперечных сил. По результатам экспериментов, обзор которых приведен в работе [44], установлено, что при масштабированном увеличении размеров сечения железобетонного элемента его относительная к размеру поперечного сечения прочность на действие поперечных сил снижается. Снижение прочности

элемента на действие поперечных сил в расчетах учитывается при помощи эмпирических коэффициентов:

– $K = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$ – согласно европейским нормам [36];

– $\lambda = \sqrt{\frac{2}{1 + 0,004d}} \leq 1$ – согласно американским нормам [37];

– $\beta = \sqrt[4]{\frac{1000}{d}} \leq 1,5$ – согласно японским нормам [39];

где d – высота поперечного сечения элемента в мм.

Задача внедрения учета эффекта масштаба в отечественные нормы проектирования является актуальной как для случая плоского изгиба, так и для случая косоугольного изгиба.

Влияние продольных сил. Фактор влияния продольных сил на прочность наклонных сечений при действии поперечных сил учитывается всеми рассмотренными отечественными и зарубежными нормами проектирования [21, 36, 37, 39].

В многочисленных исследованиях делается вывод, что растягивающие продольные силы в целом уменьшают прочность наклонных сечений на действие поперечных сил, а сжимающие усилия в зависимости от их величины и эксцентриситета приложения могут как увеличивать прочность наклонных сечений, так и уменьшать их.

Учет влияния продольных сил производится при помощи эмпирических коэффициентов, полученных на основе обработки опытных данных.

Выводы и рекомендации

1. В действующие отечественные нормы проектирования [21] не включены рекомендации по расчету элементов на двухосевое действие поперечных сил, несмотря на произведенные советскими и российскими учеными исследования [26, 29].

2. Нормы и рекомендации [30, 37, 39] предлагают оценивать прочность элементов при двухосевом действии продольных сил по диаграммам взаимодействия, предварительно оценивая прочность отдельно по главным осям сечения. Причем в [30, 39] применяются эллиптические диаграммы взаимодействия, а в [37] применяется трехлинейная диаграмма.

3. В работе [29] указано, что эллиптическая диаграмма взаимодействия не подтверждается результатами опытов. Однако в работах [41, 40, 38] напротив делается вывод о том, что эллиптическая диаграмма дает надежную оценку несущей способности. Требуется дополнительная

оценка возможности применения эллиптической и линейной диаграмм в отношении методик, приведенных в действующих отечественных нормах проектирования [21]. Для этого требуется произвести анализ данных об отечественных и зарубежных испытаниях элементов на косоугольный изгиб, проведенных в последние десятилетия.

4. При сравнении результатов исследований, выполненных отечественными [29, 26, 34] и зарубежными исследователями [38, 41, 44], а также зарубежных норм проектирования [36, 37, 39] с действующими отечественными нормами проектирования [21] выявлено, что методики расчета наклонных сечений железобетонных элементов на действие поперечных сил, приведенные в [21], не учитывают ряд важных факторов, влияющих на несущую способность по бетону: учет количества растянутого продольного армирования, учет эффекта масштаба (size effect), учет сжатых свесов полков тавровых сечений, учет двухосевого действия поперечных сил. Данный факт делает тему разработки методики расчета наклонных сечений железобетонных элементов на двухосевое действие поперечных сил, адаптацию и включение этой методики в нормы проектирования актуальной.

5. Недостатком всех рассмотренных методов расчета, приведенных в нормах проектирования, является значительное количество эмпирических коэффициентов, не имеющих прозрачного физического смысла. Возникновение эмпирических коэффициентов связано со сложностями одновременного учета всех факторов, влияющих на прочность конструкции в стадии разрушения. При этом методики, подразумевающие избавление от части эмпирических коэффициентов за счет раздельного учета факторов, влияющих на прочность [34, 19] сложны для инженерных расчетов.

6. В статье приведены основные факторы, влияющие на прочность наклонных сечений на действие поперечных сил при плоском и косоугольном изгибе, а также основные положения по расчету конструкций на двухосевое действие поперечных сил по методике, разработанной Е.В. Клименко [29]. Следует отметить, что методика [29] обладает инженерной простотой, развивает и дополняет основную методику расчета для случая плоского изгиба [21], а также учитывает некоторые факторы, влияющие на прочность наклонных сечений, которые основная методика не учитывает. Требуются дополнительные теоретические и экспериментальные исследования для адаптации методики Е.В. Клименко под действующие нормы проектирования, а также проверка и уточнение данной методики на данных об испытаниях элементов на плоский и косоугольный

проведенных в последние десятилетия. В частности, требуются дополнительные исследования в части оценки влияния пролета среза на прочность элементов при косоугольном изгибе (в работе [29] исследовались образцы с постоянным относительным пролетом среза равным 2,5). Также требуются дополнительные исследования в отношении влияния сжимающих напряжений на прочность наклонных сечений при двухосевом действии поперечных сил, что особенно актуально для колонн многоэтажных зданий.

7. Актуальной является задача проведения исследований и включение учета влияния эффекта масштаба (size effect) в действующие нормы проектирования, как для случая плоского изгиба, так и для случая косоугольного изгиба.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боришанский М.С. Новые данные о сопротивлении изгибаемых элементов действию поперечных сил // Вопросы современного железобетонного строительства. М.: Госстройиздат, 1952. С. 136–152.
2. Боришанский М.С. Расчет отогнутых стержней и хомутов в изгибаемых железобетонных элементах по стадии разрушения. М., Л.: Стройиздат, 1946. 79 с.
3. Kani G.N.J. The Riddle of Shear Failure and Its Solution // ACI Journal. 1964. № 61(28). С. 441–467.
4. СНиП II-V.1-62* Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования. М.: Стройиздат, 1970. 102 с.
5. Залесов А.С., Ильин О.Ф. Несущая способность элементов при действии поперечных сил // Бетон и железобетон. 1973. №6. С. 19–21.
6. Ильин О.Ф. Исследование железобетонных балок из высокопрочного бетона при действии поперечных сил : дисс. ... канд. техн. наук. М. (НИИЖБ), 1973. 117 с.
7. Ильин О.Ф. Образование наклонных трещин // Исследования по бетону и железобетонным конструкциям : материалы конференции молодых специалистов. М. : Стройиздат, 1974. С. 32–41.
8. СНиП II-21-75 Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования. М.: Стройиздат, 1976. 89 с.
9. Залесов А.С. Новый метод расчета прочности железобетонных элементов по наклонным сечениям // Расчет и конструирование железобетонных конструкций : труды института. Вып. 39. М.: НИИЖБ, 1977. С. 16–28.
10. Залесов А.С. Сопротивление железобетонных элементов при действии поперечных сил. Теория и новые методы расчета прочности : дисс. ... докт. техн. наук. М.: НИИЖБ, 1979. 345 с.

11. Залесов А.С., Ильин О.Ф. Работа элементов на действие поперечных сил при изгибе // Сборные железобетонные конструкции из высокопрочного бетона. М.: Стройиздат, 1976. С. 116–142.
12. Залесов А.С., Ильин О.Ф., Титов И.А. Опыт построения новой теории прочности балок в зоне действия поперечных сил // Новое о прочности железобетона. 1977. С. 115–130.
13. Залесов А.С., Ильин О.Ф. Трещиностойкость наклонных сечений железобетонных элементов // Предельные состояния элементов железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1976. С. 56–68.
14. Залесов А.С., Титов И.А. Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов в зоне действия поперечных сил // Строительные конструкции и теория сооружений. Минск: БПИ, 1977. Вып. 2. С. 42–47.
15. Залесов А.С., Сигалов Э.Е., Тунгушбаев И. Т. Прочность тавровых элементов по наклонным сечениям // Исследование сейсмостойкости сооружений и конструкций. Алма-Ата, 1977. Вып. 9. С. 18–24.
16. Залесов А.С., Маилян Р.Л., Шеина С.Г. Прочность элементов при поперечном изгибе с продольными сжимающими силами высокого уровня // Бетон и железобетон. 1984. №3. С. 34–35.
17. Шеина С.Г. Прочность и трещиностойкость наклонных сечений железобетонных элементов при совместном действии продольных сжимающих и поперечных сил : дисс. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 1984. С. 159–168.
18. Залесов А.С., Никитин И.К., Лемыш Л.Л., Кодыш Э.Н. Расчет железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям : производственное издание. М. : Стройиздат, 1988. 320 с.
19. Залесов А.С., Климов Ю.А. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил. Киев : Будивельник, 1989. 104 с.
20. СНиП 2.03.01-84* Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. М. : ЦИТП, 1989. 80 с.
21. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения (с Изменениями № 1, 2). М. : ФАУ ФЦСС. 2021. 154 с.
22. Зенин С.А., Шарипов Р.Ш., Кудинов О.В. Влияние сжимающих напряжений на прочность наклонных сечений внецентренно сжатых железобетонных элементов // Бетон и железобетон. 2021. № 1(603). С. 44–52.
23. Игнатовичус Ч.Б. Исследование прочности железобетонных прямоугольных и тавровых балок по наклонному сечению : дисс. ... канд. техн. наук. Вильнюс, 1973 (ВИСИ). 198 с.
24. Раукас У.В. Исследование работы железобетонных балок прямоугольного сечения на изгиб с поперечной силой : дисс. ... канд. техн. наук. Свердловск, 1955. 262 с.
25. Барановский Л. Влияние формы сечения на несущую способность изгибаемых элементов при действии поперечных сил. Варшава : Институт строительной техники. 1970. 261 с.
26. Мухамедиев Т.А., Зенин С.А. О расчете прочности наклонных сечений железобетонных элементов с различной формой поперечного сечения // Строительные материалы. 2022. № 8. С. 70-74. DOI 10.31659/0585-430X-2022-805-8-70-74.
27. Мухамедиев Т.А., Зенин С.А., Жарких А.С. Оценка надежности метода расчета прочности наклонных сечений железобетонных элементов с различной формой поперечного сечения // Вестник НИЦ Строительство. 2022. № 2(33). С. 139–149. DOI 10.37538/2224-9494-2022-2(33)-139-149.
28. Польской П.П. Прочность и трещиностойкость наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов при различных видах бетона и формах сечения : дисс. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 1998. 262 с.
29. Клименко Е.В. Прочность наклонного сечения косоизгибаемых железобетонных тавровых элементов : дисс. ... канд. техн. наук. Полтава, 1984. 227 с.
30. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01-84). М. : Центр. ин-т типового проектирования, 1989. 192 с.
31. Руководство по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона (без предварительного напряжения). М.: Стройиздат, 1978. 320 с.
32. Пособие к СП 63.13330. Расчет железобетонных конструкций без предварительно напряженной арматуры. М.: ФАУ ФЦС, 2015. 283 с.
33. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения арматуры (к СП 52-101-2003). М. : ОАО «ЦНИИ-Промзданий», 2005. 214 с.
34. Силантьев А.С. Соппротивление изгибаемых железобетонных элементов по наклонным сечениям с учетом влияния продольного армирования : дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2012. 257 с.
35. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1974. 316 с.

36. EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. 2004. 225 с.

37. ACI 318M-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary / American Concrete Institute, 2019. DOI: 10.14359/51716937

38. Umehara H., Jirsa J.O. Short Rectangular RC Columns Under Bidirectional Loadings // Journal of Structural Engineering. 1984. Vol. 110. № 3. Pp. 605–618. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:3(605)

39. JSCE: Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures – 2007 / Japan Society of Civil Engineers. 2010. 469 с.

40. Massone L.M., Correa A. Behavior of reinforced concrete columns under biaxial shear forces based on ACI 318 // Engineering Structures. 2020. Vol. 219. 110731. DOI:10.1016/j.engstruct.2020.110731.

41. Hansapinyo C., Maekawa K., Chaisomphob T. Behavior of reinforced concrete beams subjected to biaxial shear // Doboku Gakkai Ronbunshu. 2003. Vol. 725. Pp. 321–331. DOI:10.2208/jscej.2003.725_321.

42. Thamrin R., Haris S., Dedi E., Dalmantias E. Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams with Square Cross Section Subjected to Biaxial Bending // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 713. 012029. DOI:10.1088/1757-899X/713/1/012029.

43. Tinini A. Biaxial shear in RC square beams: Experimental, numerical and analytical program // Engineering Structures. 2016. Vol. 126. Pp. 469–480. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.07.056.

44. Yang Y. Shear Behaviour of Reinforced Concrete Members without Shear Reinforcement : doctoral thesis. Delft, 2014. 370 с. DOI:10.4233/uuid:ac776cf0-4412-4079-968f-9eacb67e8846.

Информация об авторах

Шипулин Станислав Андреевич, аспирант кафедры строительных конструкций и механики грунтов. E-mail: sa_shipulin@mail.ru. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

Беляева Зоя Владимировна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительных конструкций и механики грунтов. E-mail: z.v.believa@urfu.ru. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

Миронова Людмила Ивановна, кандидат технических наук, доктор педагогических наук, профессор кафедры гидравлики. E-mail: mirmila@mail.ru. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

Поступила 29.06.2023 г.

© Шипулин С.А., Беляева З.В., Миронова Л.И., 2023

***Shipulin S.A., Beliaeva Z.V., Mironova L.I.**

Ural Federal University

*E-mail: sa_shipulin@mail.ru

DESIGN OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS INCLINED SECTIONS SUBJECTED TO BIAXIAL ACTION OF SHEAR FORCES

Abstract. In the current standards for the design of reinforced concrete structures no methods for calculating inclined sections with a biaxial action of shear forces are presented. At the same time, a significant part of reinforced concrete structures is subjected to the action of shear forces in two planes. The relevance of the article is determined by the lack of standard methods for calculating of reinforced concrete elements inclined sections for the biaxial action of shear, which forces designers to use simplifications in calculations. The article reviews the Russian and foreign literature on the theory of design of reinforced concrete elements for the action of transverse forces and analyzes the design methods proposed in the current Russian and foreign design standards, as well as in the standards of past years. In the analysis of methods for calculating reinforced concrete elements for the action of transverse forces, consideration is given in various methods for calculating the factors that affect the strength of inclined sections on the action of transverse forces in normal and biaxial bending in two planes, such as the shear span, the angle of inclination of the force plane, the amount of longitudinal tensile reinforcement, the influence of longitudinal forces, size-effect.

The main directions for further research of the issue are identified and recommendations are given that

summarize domestic and foreign experience.

Keywords: *inclined section, biaxial bend, shear force, reinforced concrete structures, shear span, interlock force, dowel action.*

REFERENCES

1. Borishanskiy M.S. New data on the resistance of bending elements to the action of transverse forces [Novyye dannyye o soprotivlenii izgibayemykh elementov deystviyu poperechnykh sil]. Voprosy sovremennogo zhelezobetonogo stroitel'stva. Moscow, TsNIPS. 1952. Pp. 136–152. (rus)
2. Borishanskiy M.S. Calculation of Bent Bars and Clamps in Bent Reinforced Concrete Elements by Fracture Stage [Raschet otognutykh sterzhney i khomutov v izgibayemykh zhelezobetonnykh elementakh po stadii razrusheniya]. Moscow, Leningrad: Stroyizdat, 1946. 79 p. (rus)
3. Kani G.N.J. The Riddle of Shear Failure and Its Solution. ACI Journal. 1964. Vol. 61(28). Pp. 441–467.
4. SNiP II-B.1-62* Concrete and reinforced concrete structures. Design standards. Moscow: Stroyizdat, 1970. 102 p. (rus)
5. Zalesov A.S., Il'in O.F. Bearing capacity of elements under the action of transverse forces [Nesushchaya sposobnost' elementov pri deystvii poperechnykh sil]. Beton i zhelezobeton. 1973. No. 6. Pp. 19–21. (rus)
6. Il'in O.F. Research of reinforced concrete beams from high-strength concrete under the action of transverse forces [Issledovaniye zhelezobetonnykh balok iz vysokoprochnogo betona pri deystvii poperechnykh sil]: dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow, 1973. 117 p. (rus)
7. Il'in O.F. Formation of inclined cracks [Obrazovaniye naklonnykh treshchin] Issledovaniya po betonu i zhelezobetonnykh konstruktsiyam. Moscow: Stroyizdat, 1974. Pp. 32–41. (rus)
8. SNiP II-21-75 Concrete and reinforced concrete structures. Design standards. Moscow: Stroyizdat, 1976. 89 p. (rus)
9. Zalesov A.S. New Method for Calculating the Strength of Reinforced Concrete Members by Inclined Sections [Novyy metod rascheta prochnosti zhelezobetonnykh elementov po naklonnym secheniyam]. Raschet i konstruirovaniye zhelezobetonnykh konstruktsiy. Moscow, 1977. Vol. 39. Pp. 16–28. (rus)
10. Zalesov A.S. Resistance of reinforced concrete elements under the action of transverse forces. Theory and new methods for calculating strength [Soprotivleniye zhelezobetonnykh elementov pri deystvii poperechnykh sil. Teoriya i novyye metody rascheta prochnosti] : dissertation for the degree of doctor of technical sciences. Moscow, 1979. 345 p. (rus)
11. Zalesov A.S., Ilyin O.F. The work of elements on the action of transverse forces in bending [Rabota elementov na deystviye poperechnykh sil pri izgibe]. Sbornyye zhelezobetonnyye konstruktsii iz vysokoprochnogo betona. Moscow: Stroyizdat, 1976. Pp. 116–142 (rus)
12. Zalesov A.S., Ilyin O.F., Titov I.A. Experience in constructing a new theory of strength of beams in the area of action of transverse forces [Opyt postroyeniya novoy teorii prochnosti balok v zone deystviya poperechnykh sil]. Novoye o prochnosti zhelezobetona. 1977. Pp. 115–130. (rus)
13. Zalesov A.S., Ilyin O.F. Crack resistance of inclined sections of reinforced concrete elements [Treshchinostoykost' naklonnykh secheniy zhelezobetonnykh elementov]. Predel'nyye sostoyaniya elementov zhelezobetonnykh konstruktsiy. Moscow: Stroyizdat, 1976. Pp. 56–68. (rus)
14. Zalesov A.S., Titov I.A. Study of the stress-strain state of reinforced concrete elements in the area of action of transverse forces [Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnykh elementov v zone deystviya poperechnykh sil]. Stroitel'nyye konstruktsii i teoriya sooruzheniy. Minsk: BPI, 1977. Vol. 2. Pp. 42–47. (rus)
15. Zalesov A.S., Sigalov E.E., Tungushbaev I.T. Strength of tee elements along inclined sections [Prochnost' tavrovykh elementov po naklonnym secheniyam]. Issledovaniye seymstoykosti sooruzheniy i konstruktsiy. Alma-Ata, 1977. Vol. 9. Pp. 18–24. (rus)
16. Zalesov A.S., Mailyan R.L., Sheina S.G. Strength of elements in transverse bending with high-level longitudinal compressive forces [Prochnost' elementov pri poperechnom izgibe s prodol'nymi szhimayushchimi silami vysokogo urovnya]. Beton i zhelezobeton. 1984. №3. Pp. 34–35. (rus)
17. Sheina S.G. Strength and crack resistance of inclined sections of reinforced concrete elements under the combined action of longitudinal compressive and transverse forces [Prochnost' i treshchinostoykost' naklonnykh secheniy zhelezobetonnykh elementov pri sovmestnom deystvii prodol'nykh szhimayushchikh i poperechnykh sil]: dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Rostov-on-Don, 1984. Pp. 15–168. (rus)
18. Zalesov A.S., Nikitin I.K., Lemysh L.L., Kodysh E.N. Calculation of reinforced concrete structures for strength, crack resistance and deformation [Raschet zhelezobetonnykh konstruktsiy po prochnosti, treshchinostoykosti i deformatsiyam]. Moscow: Stroyizdat, 1988. 320 p. (rus)

19. Zalesov A.S., Klimov Yu.A. Strength of reinforced concrete structures under the action of transverse forces [Prochnost' zhelezobetonnykh konstruktsiy pri deystvii poperechnykh sil]. Kyiv: Budivelnyk, 1989. 104 p. (rus)
20. SNiP 2.03.01-84* Concrete and reinforced concrete structures. Moscow, 1989. 80 p. (rus)
21. SP 63.13330.2018 Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions (with Amendments No. 1, 2). Moscow, FAA FCSS. 2021. 154 p. (rus)
22. Zenin S.A., Sharipov R.Sh., Kudinov O.V. Influence of Compressive Stresses on the Strength of Inclined Sections of Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Elements [Vliyaniye szhimayushchikh napryazheniy na prochnost' naklonnykh secheniy vnentsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov]. Beton i zhelezobeton. 2021. No. 1(603). Pp. 44–52. (rus)
23. Ignatavichus Ch.B. Investigation of the strength of reinforced concrete rectangular and tee beams along an inclined section [Issledovaniye prochnosti zhelezobetonnykh pryamougol'nykh i tavroykh balok po naklonnomu secheniyu] : dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Vilnius, 1973. 198 p. (rus)
24. Raukas U.V. Study of the work of reinforced concrete beams of non-rectangular section in bending with a transverse force [Issledovanie raboty zhelezobetonnykh balok nepryamougol'nogo secheniya na izgib s poperechnoy siloj] : dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Sverdlovsk, 1955. 262 p. (rus)
25. Baranovsky L. Influence of the section shape on the bearing capacity of bending elements under the action of transverse forces [Vliyaniye formy secheniya na nesushchuyu sposobnost' izgibayemykh elementov pri deystvii poperechnykh sil]. Warsaw, 1970. 261 p. (rus)
26. Mukhamediev T.A., Zenin S.A. On the calculation of the strength of inclined sections of reinforced concrete elements with different cross-sectional shapes [O raschete prochnosti naklonnykh secheniy zhelezobetonnykh elementov s razlichnoy formoy poperechnogo secheniya]. CONSTRUCTION MATERIALS. 2022. No. 8. Pp. 7–74. DOI:10.31659/0585-430X-2022-805-8-70-74. (rus)
27. Mukhamediev T.A., Zenin S.A., Zharkikh A.S. Reliability assessment of the method for calculating the strength of inclined sections of reinforced concrete elements with different cross-sectional shapes [Otsenka nadezhnosti metoda rascheta prochnosti naklonnykh secheniy zhelezobetonnykh elementov s razlichnoy formoy poperechnogo secheniya]. Vestnik NITS Stroitel'stvo. 2022. No. 2(33). Pp. 139–149. DOI 10.37538/2224-9494-2022-2(33)-139-149. (rus)
28. Polskoy P.P. Strength and crack resistance of inclined sections of bent reinforced concrete elements for various types of concrete and section shapes [Prochnost' i treshchinostoykost' naklonnykh secheniy izgibayemykh zhelezobetonnykh elementov pri razlichnykh vidakh betona i formakh secheniya] : dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Rostov-on-Don, 1998. 262 p. (rus)
29. Klimenko E.V. Strength of the inclined section of oblique reinforced concrete tee elements [Prochnost' naklonnogo secheniya kosoizgibayemykh zhelezobetonnykh tavroykh elementov] : dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Poltava, 1984. 227 p. (rus)
30. Manual for the design of concrete and reinforced concrete structures made of heavy lightweight concrete without prestressing reinforcement (to SNiP 2.03.01-84). Moscow: Central Institute for Standard Design, 1989. 192 p. (rus)
31. Guidelines for the design of concrete and reinforced concrete structures made of heavy concrete (without prestressing). Moscow: Stroyizdat, 1978. 320 p. (rus)
32. Manual for the design to SP 63.13330. Calculation of reinforced concrete structures without prestressed reinforcement. Moscow: FAA FCS, 2015. 283 p. (rus)
33. Manual for the design of concrete and reinforced concrete structures made of heavy concrete without prestressing reinforcement (to SP 52-101-2003). Moscow: Central Research Institute of Industrial Buildings, 2005. 214 p. (rus)
34. Silantiev A.S. Resistance of bending reinforced concrete elements along inclined sections, taking into account the influence of longitudinal reinforcement [Soprotivleniye izgibayemykh zhelezobetonnykh elementov po naklonnym secheniyam s uchetom vliyaniya prodol'nogo armirovaniya] : dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow, 2012. 257 p. (rus)
35. Geniev G.A., Kissyuk V.N., Tyupin G.A. Theory of plasticity of concrete and reinforced concrete [Theory of plasticity of concrete and reinforced concrete]. Moscow: Stroyizdat, 1974. 316 p. (rus)
36. EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. 2004. 225 p.
37. ACI 318M-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary / American Concrete Institute, 2019. DOI: 10.14359/51716937
38. Umehara H., Jirsa J.O. Short Rectangular RC Columns Under Bidirectional Loadings. Journal of Structural Engineering. 1984. Vol. 110.

No. 3. Pp. 605–618. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:3(605)

39. JSCE: Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures – 2007. 2010. 469 p.

40. Massone L.M., Correa A. Behavior of reinforced concrete columns under biaxial shear forces based on ACI 318. *Engineering Structures*. 2020. Vol. 219. 110731. DOI:10.1016/j.engstruct.2020.110731.

41. Hansapinyo C., Maekawa K., Chaisomphob T. Behavior of reinforced concrete beams subjected to biaxial shear. *Doboku Gakkai Ronbunshu*. 2003. Vol. 725. Pp. 321–331. DOI:10.2208/jscej.2003.725_321.

42. Thamrin R., Haris S., Dedi E., Dalmantias E. Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams with Square Cross Section Subjected to Biaxial Bending. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 713. 012029. DOI:10.1088/1757-899X/713/1/012029.

43. Tinini A. Biaxial shear in RC square beams: Experimental, numerical and analytical program. *Engineering Structures*. 2016. Vol. 126. Pp. 469–480. DOI:10.1016/j.engstruct.2016.07.056.

44. Yang Y. Shear Behaviour of Reinforced Concrete Members without Shear Reinforcement. 2014. DOI: 10.4233/uuid:ac776cf0-4412-4079-968f-9eacb67e8846.

Information about the authors

Shipulin, Stanislav A. Postgraduate student. E-mail: sa_shipulin@mail.ru. Ural Federal University. Russia, 620002, Ekaterinburg, Mira str., 19.

Beliaeva, Zoia V. PhD. E-mail: z.v.beliaeva@urfu.ru. Ural Federal University. Russia, 620002, Ekaterinburg, Mira str., 19.

Mironova, Ludmila I. PhD. E-mail: mirmila@mail.ru. Ural Federal University. Russia, 620002, Ekaterinburg, Mira str., 19.

Received 29.06.2023

Для цитирования:

Шипулин С.А., Беляева З.В., Миронова Л.И. Расчет железобетонных элементов по прочности наклонных сечений при двухосевом действии поперечных сил // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 8. С. 16–30. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-8-16-30

For citation:

Shipulin S.A., Beliaeva Z.V., Mironova L.I. Design of reinforced concrete elements inclined sections subjected to biaxial action of shear forces. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023. No. 8. Pp. 16–30. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-8-16-30