

УДК 624.044:624.041.6

## СОВМЕСТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ СИЛЫ И ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА В ИССЛЕДОВАНИИ КЕРАМЗИТОЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

**А.И.Костюк**, *к.т.н., проф.*, **И.А.Столевич**, *к.т.н., доц.*,  
**О.И.Столевич**, *аспирант*

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры,  
г. Одесса*

**Введение.** Одной из наиболее важных проблем в теории расчета является сопротивление наклонных сечений железобетонных элементов совместному действию изгибающего момента и поперечных сил. Исследования в области совместного действия изгибающего момента и поперечной силы разделились на два направления:

1. Уточнение величины коэффициента, характеризующего относительное сопротивление срезу сжатой зоны бетона в формуле М.С. Боришанского для поперечной силы  $Q_b$ , для бетонов различных видов в зависимости от формы сечения, марки бетона, процента продольного армирования и других факторов.

2. Создание других методов расчёта, учитывающих тем или иным способом влияние различных факторов на прочность наклонных сечений.

**Постановка проблемы.** Сопротивление железобетонных элементов совместному действию изгибающих моментов и поперечных сил является одной из наиболее важной и не до конца разрешенной проблемой, как в теории железобетона, так и в реальном проектировании эффективных железобетонных конструкций. На многих научно-технических конференциях рекомендовано продолжить экспериментально-теоретические исследования по целому ряду направлений, где имеющихся данных недостаточно для оценки работы железобетонных элементов по наклонным сечениям. Также указывалось о необходимости сосредоточить внимание на разработке более современной расчетной модели исходя из анализа и обобщения различных предложений и вариантов. Для легких конструктивных бетонов эта проблема еще более актуальна.

**Основная часть.** Разрушение железобетонных балок по наклонной трещине обусловлено многими взаимозависимыми факторами. Многие

исследователи при испытании балок стремятся выявить основополагающий критерий прочности наклонного сечения и на этой основе предлагают свою методику его расчета.

Точность расчетов прочности наклонного сечения железобетонных балок на действие поперечной силы и изгибающего момента по методикам, в основе которых лежит теория прочности бетона, всецело зависит от достоверности принятых предпосылок, функционального выражения касательных и нормальных напряжений с учетом различных факторов, присущих работе железобетонных балок в пролете среза.

**Основные расчетные положения.** В работах Берга О.Я. Дорошкевича Л.О., Демчины Б.Г., Максимовича С.Б. показано, что разрушение элементов по наклонным сечениям может иметь одну из следующих форм, показанных рис. 1.

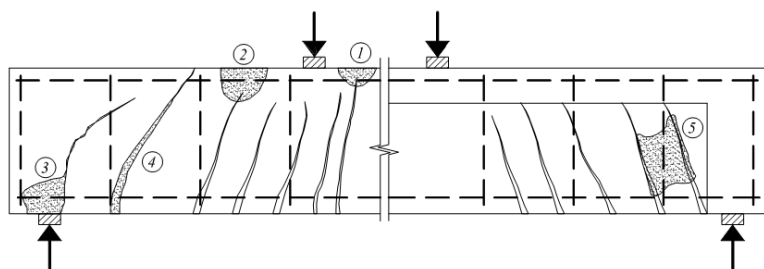


Рис 1. Формы разрушения железобетонной тавровой балки: 1 - изгибное разрушение в зоне действия максимальных изгибающих моментов; 2 - при срезе по сжатой зоне (форма I); 3 - то же по растянутой зоне (форма II); 4 - при срезе по диагональной трещине (форма III); 5 - по сжатой полосе между диагональными трещинами (форма IV)

**Форма I.** По наклонной трещине от преобладающего действия поперечной силы при достижении напряжениями в поперечной арматуре значений, равных пределу текучести от разрушения бетона над вершиной наклонной трещины (разрушение по сжатой зоне). В этом случае при развитии верхнего конца диагональной трещины сокращается высота сжатой зоны сечения и деформации наиболее сжатой грани бетона по наклонному сечению достигают предельных значений. Разрушение сжатой зоны бетона, при этом, может произойти как от его раздробления при минимальном проценте рабочего армирования, так и от среза при большом количестве рабочей арматуры.

**Форма II.** По наклонной трещине от преобладающего действия изгибающего момента при напряжениях в поперечной арматуре, равных пределу текучести в результате достижения предельных деформаций в растянутой продольной арматуре (разрушение по растянутой зоне). При нарушении анкеровки продольной арматуры или когда раскрытие наклонной трещины в нижней части сечения приводит к развитию значительных деформаций продольной арматуры при повороте образующихся частей балки относительно друг друга. В результате перераспределения усилий резко возрастает растягивающее усилие в продольной арматуре, пересеченной наклонной трещиной. При этом разрушение по растянутой зоне может являться результатом нарушения анкеровки (проскальзывания) продольной растянутой арматуры. В этом случае вдоль растянутой арматуры по направлению к опоре формируются продольные трещины. Иногда нарушение анкеровки рассматривается как специальный случай разрушения по растянутой зоне при раскалывании бетона. Вместе с тем, раскалывание является вторичным эффектом и связано с проскальзыванием арматуры относительно бетона, что определяет прогрессирующее нарушение сцепления.

**Форма III.** По наклонной трещине при напряжениях, в поперечной арматуре, равных пределу текучести, когда диагональная трещина доходит до верхней грани сечения и вызывает полное разделение балки на две или несколько частей без разрушения бетона от сжатия. Диагональная трещина в этом случае раскрывается, практически, мгновенно. Такую форму разрушения называют разрушением при диагональном растяжении.

**Форма IV.** Разрушение приопорного участка, обусловленное разрушением при сжатии бетонной полосы, заключенной между диагональными трещинами.

База экспериментальных данных позволила установить, что основной формой разрушения железобетонных элементов при действии поперечных сил является раздробление бетона сжатой зоны над наклонной трещиной. По такой схеме разрушаются свободно опёртые и неразрезные балки прямоугольного, таврового и двутаврового поперечного сечения из обычного и предварительно напряжённого железобетона, плиты покрытий (перекрытий), колонны при действии горизонтальных нагрузок, рамные, пространственные и многие другие конструкции. Применительно к этой форме разрушения разрабатывается большинство методов расчёта.

Поздние экспериментальные исследования показали, что методы ферменной аналогии и критической наклонной трещины не учитывают

реального напряженно-деформированного состояния элементов, весьма приближенно определяют усилия в бетоне, продольной и поперечной арматуре, не учитывают влияние многих факторов, вследствие чего расчетная несущая способность элемента значительно ниже опытной (иногда в 3...5 раз).

Расчёт по методу равновесия предельных усилий производится исходя из двух возможных форм разрушения элемента – по бетону сжатой зоны над наклонной трещиной до наступления текучести в продольной растянутой арматуре и в результате текучести продольной растянутой арматуры в месте её пересечения наклонной трещиной с последующим разрушением бетона над трещиной. Расчёт прочности сводится к выполнению двух условий:

Равновесие внешних и внутренних сил, действующих на отсечённую наклонной трещиной часть балки, и равновесия моментов относительно центра тяжести бетона сжатой зоны над наклонной трещиной. Данный метод расчёта получил широкое признание и был включён в СНиП II.В.1 – 62. Однако, кроме явных преимуществ, новый метод расчёта имел и существенные недостатки. Дальнейшие исследования в области совместного действия изгибающего момента и поперечной силы разделились на два направления:

1. Уточнение величины коэффициента, характеризующего относительное сопротивление срезу сжатой зоны бетона в формуле М.С. Боришанского для поперечной силы  $Q_b$ , для бетонов различных видов в зависимости от формы сечения, марки бетона, процента продольного армирования и других факторов.

2. Создание других методов расчёта, учитывающих тем или иным способом влияние различных факторов на прочность наклонных сечений.

Для определения несущей способности, трещиностойкости и деформативности железобетонных конструкций использовались различные по своим исходным предпосылкам расчетные модели железобетона, сформулированные зачастую на различной методологической основе.

Все их можно условно разделить на три группы. К первой из них относятся работы М.С. Боришанского, А.А. Гвоздева, А.С. Залесова, С.М. Крылова, А.М. Проценко, А.Р. Ржаницына, Г.К. Хайдукова, В.В. Шугаева и других учёных, которые занимались разработкой основных положений метода предельного равновесия. Развитию методов механики разрушения твёрдых тел посвящены исследования Ф.Х. Виттмана, Е.А. Гузеева, Ю.В. Зайцева, В.В. Панасюка, Е.Н. Пересыпкина, К.А. Пирадова, Л.П. Трапезникова,

М.М. Холмянского, Е.Н. Щербакова и других. Третья группа довольно многочисленных в последние годы исследований связана с разработкой и совершенствованием деформационных расчётных моделей сечений, главным инструментом которых являются диаграммы состояния бетона и арматуры, определяющие работу материалов как в области упругого, так и неупругого деформирования вплоть до их разрушения. Созданием и развитием этих моделей применительно к железобетону в разное время занимались Т.Н. Азизов, В.Н. Байков, Е.М. Бабич, А.Н. Бамбура, А.Я. Барашиков, В.Я. Бачинский, В.М. Бондаренко, С.В. Бондаренко, А.А. Гвоздев, Г.А. Гениев, А.Б. Голышев, В.А. Гришин, А.В. Гришин, Ю.П. Гуша, А.И. Давиденко, В.С. Дорофеев, А.В. Забегаев, А.С. Залесов, Ю.Л. Изотов, О.Ф. Ильин, Н.И. Карпенко, В.Н. Киссюк, Е.В. Клименко, С.Ф. Клованич, Л.Р. Маилян, Р.Л. Маилян, В.И. Мурашев, Т.А. Мухамедиев, Я.М. Немировский, Т.М. Пецольд, Р.С. Санжаровский, Г.А. Тюпин, И.А. Узун, Е.А. Чистяков, Э.Г. Чихладзе, Ю.А. Школа, А.Ф. Яременко и другие.

**Расчет железобетонных элементов на основе модели стержневой системы «Ферменной аналогии» новых европейских норм.** При расчётах на срез предполагается, что плечо внутренней пары сил составляет  $z$ . Зона среза имеет высоту, равную  $z$  и ширину  $b_w$ . Величина  $z$  устанавливается без учёта влияния отогнутых продольных стержней (рис.2.).

Напряжения в бетонных подкосах должны удовлетворять условию:

$$\sigma_c \leq \nu \cdot f_{cd}.$$

Величина коэффициента  $\nu$  определяется по формуле:

$$\nu = 0,7 - \frac{f_{ck}}{200} \geq 0,5. \quad (1)$$

Угол наклона бетонных подкосов ограничивается значениями

$$1,0 < \cot \theta > 2,0.$$

Для элементов с вертикальной поперечной арматурой значения  $V_{Rd2}$  и  $V_{Rd3}$  определяются по формулам:

$$V_{Rd2} = b_w \cdot z \cdot \frac{\nu \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta}; \quad (2)$$

$$V_{Rd3} = \frac{A_{sw}}{S} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta, \quad (3)$$

при условии, что

$$\frac{A_{sw} \cdot f_{ywd}}{b_w \cdot S} \leq 0,5 \cdot \nu \cdot f_{cd}. \quad (4)$$

Для элементов с наклонным армированием на срез значения  $V_{Rd2}$  и  $V_{Rd3}$  рассчитываются по формулам:

$$V_{Rd2} = b_w \cdot z \cdot v \cdot f_{cd} \cdot \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \alpha}; \quad (5)$$

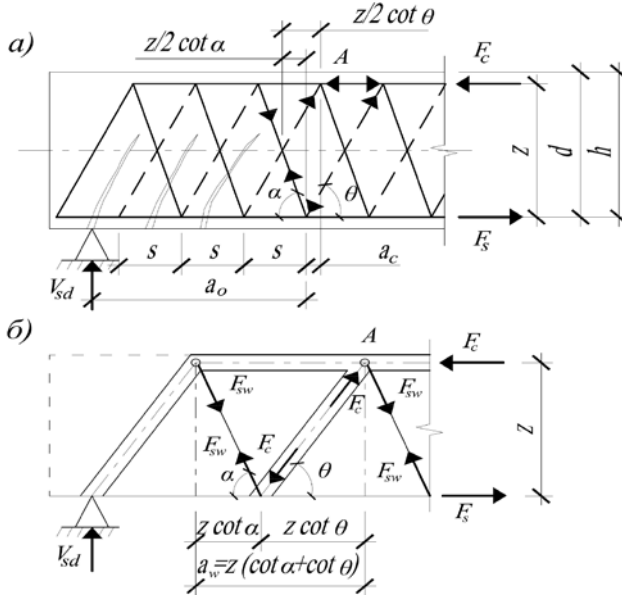


Рис. 2. К расчету прочности наклонных сечений по методу ферменной аналогии: а) идеализированная ферма; б) заменяющая ферма с подкосами, расположенными на участке длиной  $a_w$ .

$$V_{Rd3} = \frac{A_{sw}}{S} \cdot z \cdot f_{ywd} (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha, \quad (6)$$

при условии, что

$$\frac{A_{sw}}{b_w \cdot S} \leq \frac{0,5 \cdot f_{cd} \cdot \sin \alpha}{1 - \cos \alpha}. \quad (7)$$

В случае совместного применения вертикальных поперечных стержней и отгибов можно принять  $\cot \theta = 1,5$ .

Расчётное растягивающее усилие в продольной арматуре рассчитывается по формуле:

$$F_s = \frac{|M_{sd}|}{z} + 0,5 |V_{sd}| \cdot (\cot \theta + \cot \alpha), \quad (8)$$

где  $|M_{sd}|$  и  $|V_{sd}|$  – расчётные значения изгибающего момента и поперечной силы в продольной арматуре от внешней нагрузки.

На промежуточных опорах продольное армирование должно быть определено исходя из величины  $F_s$ .

## **Выводы**

1. Физический смысл сопротивления балок совместному действию поперечных сил и изгибающего момента наилучшим образом описывают теории, основанные на деформационных методах расчета железобетонных конструкций.

2. Теоретические модели прочности бетона над наклонной трещиной пока еще имеют достаточно условный характер для такого материала, как бетон. Экспериментальные данные в значительной степени зависят от условий опыта, поэтому в них наблюдается большой разброс.

3. Установлено, что использование высокопрочных бетонов для повышения несущей способности железобетонных элементов по наклонным сечениям нецелесообразно.

4. Изучение вопроса о величине поперечной силы, воспринимаемой бетоном, осложняется еще тем, что высота зоны над наклонной трещиной зависит от количества продольной арматуры, которая в свою очередь оказывает влияние на прочность наклонного сечения.

5. Деформационный метод расчета позволяет с единых позиций прогнозировать трещиностойкость, деформативность и прочность нормальных сечений железобетонных конструкций. В тоже время деформационный метод расчета наклонных сечений нуждается в уточнении и доработке.

## **Summary**

The problems of accounting in the calculation of reinforced concrete elements of the joint action of transverse force and bending moment are reviewed.

## *Литература*

1. Алиев Р.Д. Расчет прочности элементов по наклонным сечениям / Р.Д. Алиев // Бетон и железобетон. – 1993. - № 9. – С. 22-25.

2. Ашкинадзе К.Г. Практический метод расчёта прочности железобетонных стен и балок по наклонным сечениям / К.Г. Ашкинадзе // Бетон и железобетон. – 1992. – №5. – С. 15-17.

3. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона / О.Я. Берг. – М.: Госстройиздат, 1961. – 96 с.

4. Блещик Н.П. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования / Н.П. Блещик, Д.Д. Жуков, Д.Н. Лозовский, В.Г. Козачек, А.А. Кондратчик, Т.М. Пецольд, Д.П. Подобед, Н.А. Рак, В.В. Тур, И.М. Шуберт: Под ред. Т.М. Пецольда, В.В. Тура. – Брест, БГТУ, 2003-380с.

5. Гвоздев А.А. К расчёту прочности наклонных сечений железобетонных элементов / А.А. Гвоздев, А.С. Залесов // Бетон и железобетон. – 1978. – №11. – С. 38-39.

6. ДСТУ Б.В.2.6.-7-95 (ГОСТ 8829-94). Конструкції будинків і споруд. Конструкції і виробі бетонні і залізобетонні. Методи випробування навантаженням і оцінка міцності, жорсткості і тріщиностійкості. – К.: Вид-во стандартів, 1995. – 86 с.

7. Залесов А.С. Метод расчёта прочности железобетонных элементов при совместном действии изгибающих моментов и поперечных сил с учётом условий деформирования / А.С. Залесов, А.В. Петросян // Совершенствование методов расчёта статически неопределимых железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1987. – С. 50-56.

8. Залесов А.С. Несущая способность железобетонных элементов при действии поперечных сил / А.С. Залесов, О.Ф. Ильин // Бетон и железобетон. – 1973. – №6. – С. 19-20

9. Залесов А.С. Прочность наклонных сечений / А.С. Залесов // В кн.: Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1978. – С. 76-94.

10. Митрофанов В.П. Напряженно – деформированное состояние прочность и трещинообразование железобетонных элементов при поперечном изгибе / В.П. Митрофанов – М.: Стройиздат, 1982. – 42 с.

Митрофанов В.П. Общая теория расчета прочности железобетонных элементов по наклонным и нормальным трещинам / В.П.

Митрофанов, В.А. Котляров - Строительство и архитектура. 1990. № 9. - С.3-9.