

УДК 691.87:693.554

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АРМАТУРЫ ПРИОПОРНОЙ ЗОНЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*канд. техн. наук, доц. А.А. КОНДРАТЧИК, О.Г. ГАРАХ
(Брестский государственный технический университет)*

Рассмотрены факторы, участвующие в сопротивлении железобетонных балочных элементов действию перерезывающих сил, а именно роль продольной и поперечной арматуры. Приведены результаты исследований различных авторов по вопросу вклада армирования приопорной зоны в сопротивление разрушению. Показано, что одним из наиболее перспективных направлений повышения прочности наклонных сечений без увеличения расхода арматуры является ее преднапряжение.

Проведенные исследования элементов с обжатием бетона в одном, двух и трех направлениях, подтвердили возможность увеличения трещиностойкости и прочности наклонного сечения. Впервые в изгибаемых железобетонных элементах из напрягающего бетона было получено плоское и объемное напряженное состояние при преднапряжении арматуры комбинированным способом. Очевидно, что искусственное создание внутреннего напряженного состояния в приопорной зоне является наиболее перспективным направлением повышения эффективности армирования приопорной зоны.

Введение. Возрастание объемов применения железобетона в строительстве, в том числе и жилищном, определяет необходимость рационального применения материалов, в частности арматурной стали, так как ее стоимость в основном участвует в формировании итоговой цены строительной продукции. Вместе с тем речь не идет о пересмотре армирования, устанавливаемого по конструктивным требованиям исходя из опыта эксплуатации. Необоснованное снижение количества конструктивной арматуры может привести к некоторому снижению начальной стоимости продукции и гораздо большим потерям при дальнейшей эксплуатации конструкции. Вопрос ставится о системном осмыслении роли и места армирования приопорной зоны изгибаемых элементов с учетом накопленного опыта, современных материалов и технологий.

Расчетные модели в методе предельных состояний. Расчет необходимого количества арматуры, определение ее положения в конструктивном элементе производится, как правило, для некоторого стационарного состояния, определяемого в рамках метода частных коэффициентов безопасности как предельное состояние. Математические описания этого состояния (расчетные модели) при расчете прочности наклонных сечений представлены достаточно широко: от классической модели ферменной аналогии W Rittera – E. Mörsha, арочных аналогий и их сочетаний, метода сечений А.А. Гвоздева – М.С. Боришанского до деформационных моделей, позволяющих моделировать поведение элемента под нагрузкой вплоть до разрушения [1].

Построение расчетных моделей базируется на описании роли (вклада) того или иного фактора (или их комбинации) в общее сопротивление разрушению. К настоящему времени исследователи практически определились с количеством значимых параметров. В качестве базисных переменных расчетных моделей предельного состояния, описывающих сопротивление железобетонных элементов действию перерезывающих сил, принято рассматривать:

- прочностные и деформационные характеристики материалов (бетона, продольной, поперечной, отогнутой арматуры);
- геометрические характеристики конструктивного элемента (размеры сечения конструкции, пролет среза);
- эффекты от внешних воздействий (вид, способ и место приложения).

Вместе с тем продолжают интенсивные поиски описания механизма влияния этих параметров на конечный результат (например, значения прочности бетона на сжатие, растяжение, срез в условиях плоского напряженного состояния на участке, пересеченном наклонными трещинами).

Появление в конструктивном элементе наклонной трещины (трещин) фактически приводит к изменению не только его сплошности, но и к качественному изменению самого элемента – разделению на ряд блоков, совместная работа которых продолжается благодаря сжатой зоне бетона над вершиной наклонной трещины, бетонному массиву, разделенному трещинами, силам зацепления по их берегам и арматуре приопорного участка (поперечной, продольной и отогнутой) (рис. 1). Нет сомнений в том, что общее сопротивление элемента зависит как от каждого из них (например, нарушение анкеровки про-

дольной арматуры), так и от суммарного взаимодействия, где значимость каждого из них меняется в зависимости от конкретных условий.

В настоящей работе анализу подвергается только один фактор – армирование приопорной зоны, а именно роль продольной и поперечной арматуры и ее предварительного напряжения.

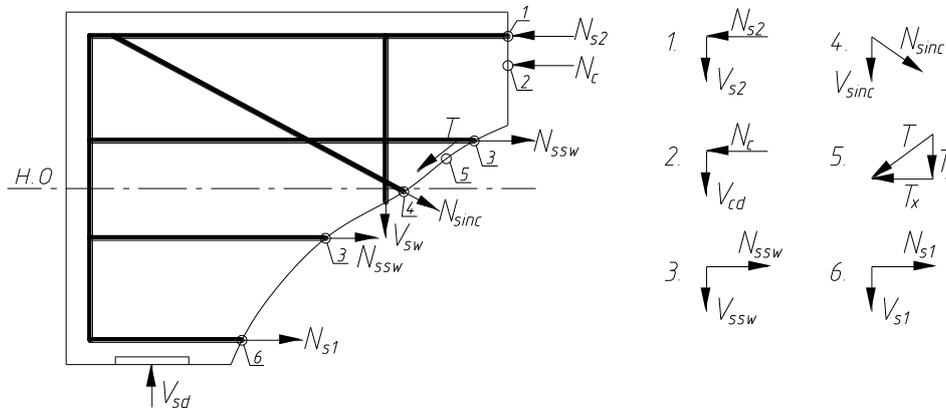


Рис. 1. Схема внутренних усилий при наступлении предельного состояния в наклонном сечении

Роль продольной арматуры в сопротивлении конструктивного элемента действию перерезывающих сил. Арматура, располагаемая параллельно продольной оси, как правило, определяется расчетом прочности нормального сечения и концентрируется в нижней и верхней зонах сечения. Подтверждение об ее участии в восприятии изгибающего момента и поперечной силы на приопорном участке получено многими исследователями, а вот механизм и количественная оценка ее участия (от 5 до 40 %) до сих пор вызывает споры [1 – 3]. Следует отметить, что нормы СНБ 5.03.01 [4] вслед за EC2 [5] требуют проверки прочности продольной арматуры в наклонном сечении.

Р.Д. Алиев и Г.М. Мамедов [6], исследуя балки без хомутов ($a/d = 2,5$), установили, что увеличение содержания продольной арматуры в нижней зоне (от 1,17 до 1,92 %) приводит к росту прочности наклонного сечения на 20 %; изменение содержания продольной арматуры в тех же балках в верхней зоне (от 0 до 1,92 %) – на 60 % (в балках с хомутами изменение ρ_l в тех же пределах практически не отразилось на прочности).

Ю.М. Борисов [7], варьируя содержанием поперечной арматуры ($\rho_{sw} = 0; 0,66 \%; 1,10 \%$), пролетом среза ($a/d = 1,0; 1,5; 2,5; 3,0$) и классом продольной арматуры (А-V и А-III) при ее одинаковом содержании, установил, что у элементов с продольной арматурой класса А-V прочность наклонного сечения выше, а разница в расхождении предельных нагрузок растет при увеличении пролета среза. Примечательно, что и И.И. Фридман [8], исследуя элементы, армированные стеклопластиковой арматурой, отмечает ее низкую эффективность для восприятия поперечной силы (0,1...8,1 %). Следовательно, не только количество, но и изгибная жесткость арматуры имеет значение.

Исследуя распределение деформаций по длине продольной арматуры, все исследователи отмечают, что до появления наклонных трещин оно соответствует эпюре моментов, а после появления трещин (как в балках без хомутов, так и в балках с хомутами) выделяются два участка (у опоры и в сечении пересечения трещиной), где деформации растут быстрее, приближаясь к предельным. Признаком поперечного изгиба продольной арматуры является появление продольных трещин, начинающихся у косых трещин.

Весьма обстоятельный анализ взаимодействия факторов, определяющих сопротивление разрушению по наклонному сечению, выполнен В.М. Баташевым [9]. Он получил, что при расположении продольной арматуры в нескольких плоскостях (вплоть до нейтральной оси), распределение деформаций в стержнях по наклонному сечению близко к линейному, благодаря совместному действию нормальных и касательных напряжений. Установлено, что с изменением пролета среза роль арматуры изменяется следующим образом:

- в растянутой зоне – незначительно;
- в сжатой зоне – снижается;
- поперечной – возрастает.

На рисунке 2 показано изменение соотношения составляющих предельной поперечной силы, воспринимаемой изгибаемым элементом [1].

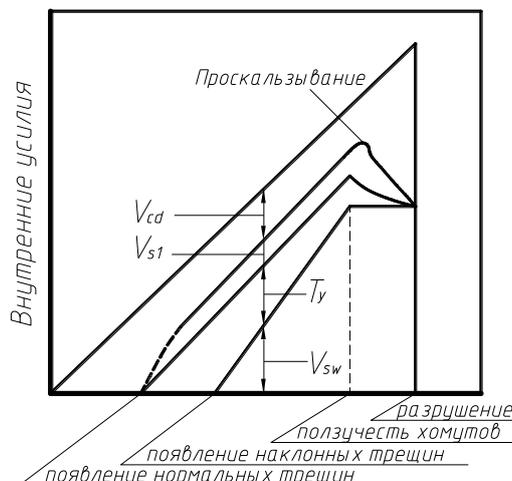


Рис. 2. Соотношение внутренних усилий в наклонном сечении (по данным MacGregor) [1]

Вклад поперечной арматуры в сопротивление конструктивного элемента действию перерезывающих сил. Отсутствие поперечной арматуры в балках приводит к разрушению элемента либо одновременно с появлением наклонной трещины, либо после небольшого увеличения нагрузки [10]. Появление наклонной трещины – результат достижения бетоном критерия прочности в условиях плоского напряженного состояния «сжатие – растяжение», а ее развитие – концентрация этих напряжений в обеих вершинах трещины, продвижению которых нет преграды. Следовательно, повысить прочность наклонного сечения можно или исключив появление наклонной трещины (повысить сопротивление бетона растяжению), или остановив (ограничив) ее развитие.

Увеличение класса бетона по прочности неадекватно затратам, так как прочность на растяжение растет медленнее, чем прочность на сжатие (увеличение гарантированной прочности f_{code}^G с 15 до 60 МПа, т.е. в 4 раза, соответствует росту прочности на растяжение f_{ctk} в 2,6 раза, т.е. с 1,1 до 2,9 МПа).

Для повышения вязкости разрушения бетона R.N. Swamy и H.M. Bahia [11] усилили бетон стальной фиброй. При изменении объемного содержания фибры с 0...0,4 % прочность наклонного сечения балок без хомутов увеличивалась на 30 %, а с 0...0,8 % – на 80 %. На величину усилия, при котором регистрировали появление наклонной трещины, армирование фиброй практически не сказалось, но развитие трещин замедлялось, раскрытие уменьшалось. Очевидно, что важен не сам факт влияния на наклонную трещину, а его последствия: меньше развитие – больше высота сжатой зоны бетона, меньше ширина раскрытия – больше влияние сил зацепления по берегам трещины.

С целью ограничения длины наклонной трещины И.Н. Старишко [12] установил на ее пути (вдоль линии действия главных растягивающих напряжений) пластину из кровельной стали толщиной 0,5 мм. При этом получено, что в результате ограничения длины наклонной трещины прочность наклонного сечения повысилась на 20 %.

Принятый в расчетных моделях принцип уравнивания внешней поперечной силы внутренними усилиями на вертикальной оси априори указывает на эффективность ортогонального расположения арматуры, где она должна полностью использовать свои свойства.

Все исследователи отмечают, что установка поперечной арматуры увеличивает прочность наклонного сечения. Так, А.Э. Поликутин и Ю.М. Борисов [7] утверждают, что наблюдается почти линейный рост прочности наклонных сечений при изменении содержания поперечной арматуры ($\rho_{sw} = 0; 0,66 \%; 1,10 \%$) для разных пролетов среза ($a/d = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0$). П.И. Васильев и О.А. Рочняк [13], проведя обстоятельный анализ результатов большого количества исследований, пришли к выводу, что повысить прочность наклонного сечения можно не увеличивая содержания поперечной арматуры, а только изменяя плотность ее расположения, т.е. уменьшая диаметр и шаг вертикальных стержней. При этом установлено, что траекториальное (под наклоном) армирование (косые хомуты, поперечные стержни, отгибы) обеспечивает большее сопротивление поперечной силе при меньшем расходе арматуры. Г.И. Бердичевский [14] конкретизирует этот эффект: наклонные хомуты сразу включаются в работу, а вертикальные –

после пересечения их наклонной трещиной; наклонные трещины развиваются медленнее, а их раскрытие меньше, что сказывается благоприятно на конечном результате, т.е. на прочности.

Следует отметить, что наличие поперечного армирования сказывается и на общем характере работы элемента под нагрузкой. В.В. Макаров и А.А. Морозов [15] указывают на причину появления второй наклонной трещины (по которой и происходит разрушение) благодаря силам сцепления между бетоном и поперечной арматурой. Р.О. Красновский [16] считает, что наличие и интенсивность поперечного армирования определяет статическую схему работы элемента в предельном состоянии, а в работе [7] четко формулируется цель постановки поперечного армирования – снижение величины раскрытия наклонных трещин и недопущение вращения частей элемента, разделенного трещиной.

Практически все исследователи отмечают, что в стержнях поперечной арматуры в предельной стадии напряжения достигают предельных значений. С одной стороны, это свидетельствует об их полном использовании, т.е. об эффективности, а с другой – возможно и о нерациональном использовании. Акцентируется внимание на достижении предельного состояния только поперечной арматурой, при этом влияние продольной арматуры, сил зацепления, прочности бетона сжатой зоны в анализе не участвует. Какие уровни напряжений присущи им в данный момент (см. рис. 2)? Очевидно, что оптимальной ситуация будет тогда, когда все составляющие сопротивления конструкции исчерпают свои возможности практически одновременно.

Влияние предварительного напряжения арматуры на прочность наклонных сечений. Создавая искусственно в арматуре любой ориентации напряжения, инженер всегда преследует одну цель – добиться, используя силы сцепления арматуры с бетоном, обратного эффекта – получения напряжений сжатия в бетоне. В настоящее время эта проблема технологически и технически разрешима (механический, электротермический способы, метод непрерывной навивки и т.д.), но требует дополнительных затрат на оборудование. На практике хорошо освоена технология искусственного создания напряжений в линейных стержнях продольной рабочей арматуры при изготовлении сборных изделий.

Исследованию влияния искусственно создаваемого напряженного состояния посредством преднапряжения арматуры на работу наклонных сечений посвящены обширные исследования В.В. Михайлова, М.С. Боришанского, Г.И. Бердичевского, А.А. Гвоздева, А.С. Залесова, С.А. Дмитриева, Ю.В. Дмитриева, Ю.А. Климова. Установлено, что обжатие бетона в одной, двух и трех плоскостях не только качественно, но и количественно влияет на работу приопорного участка.

А.С. Залесов и И.Н. Старишко [17] отмечают увеличение прочности наклонных сечений изгибаемых элементов при преднапряжении продольной арматуры: в 3 раза при $\rho_{sw} = 0$; в 2 раза при $\rho_{sw} = 0,19\%$; в 1,2 раза при $\rho_{sw} = 0,38\%$. Однако эта тенденция не бесконечна и имеет свои закономерности (рис. 3).

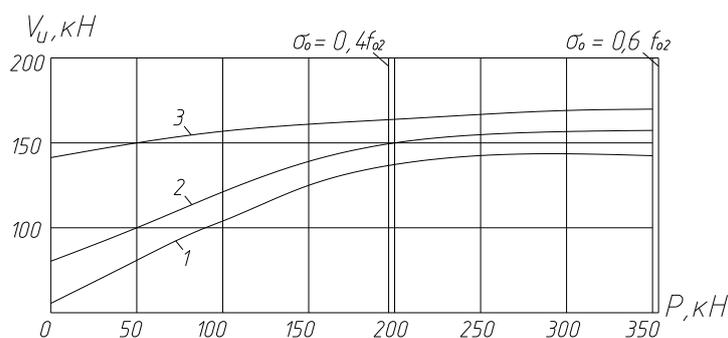


Рис. 3. Зависимость несущей способности преднапряженных элементов по наклонным сечениям от усилия предварительного обжатия для условий опытов, приведенных в работе [17]:

1 – $\rho_{sw} = 0$; 2 – $\rho_{sw} = 0,19\%$; 3 – $\rho_{sw} = 0,38\%$

Обжатие бетона в двух плоскостях [14] привело к более позднему появлению и менее интенсивному развитию и раскрытию наклонных трещин.

Исследования элементов с обжатием бетона в одном, двух и трех направлениях, выполненные автором под руководством Г.И. Бердичевского и В.Д. Будюка [18], подтвердили возможность увеличения трещиностойкости и прочности наклонного сечения. Впервые в изгибаемых железобетонных элементах из напрягающего бетона было получено плоское и объемное напряженное состояние при преднапряжении арматуры комбинированным способом, т.е. за счет энергии расширения материала (физико-химический способ), и механическим способом. Очевидно, что искусственное создание внутреннего

напряженного состояния в приопорной зоне является наиболее перспективным направлением повышения эффективности армирования приопорной зоны.

Выводы

1. Эффективность использования армирования в приопорной зоне может быть увеличена при предварительном напряжении всей арматуры независимо от ее ориентации. Для этих целей рекомендуется использовать физико-химический и комбинированный способы преднапряжения арматуры.

2. Практическая возможность преднапряжения физико-химическим способом всей арматуры приопорного участка указывает на необходимость экспериментальной проверки работы преднапряженной продольной арматуры, распределенной по высоте сечения, преднапряженных замкнутых хомутов, преднапряженных сеток косвенного армирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тур, В.В. Расчет железобетонных конструкций при действии перерезывающих сил / В.В. Тур, А.А. Кондратчик: Монография. – Брест: БГТУ, 2000. – 400 с.
2. Кондратчик, А.А. Учет нагельного эффекта при расчете железобетонных элементов без поперечного армирования по упрощенной версии MCFT / А.А. Кондратчик, Н.Н. Зубрицкий // Вестн. БГТУ. Строительство и архитектура. – 2003. – № 1 (13).
3. Кондратчик, А.А. Особенности оценки нагельного эффекта и сил зацепления в железобетонных элементах без поперечного армирования / А.А. Кондратчик, Н.Н. Зубрицкий // Вестн. БГТУ. Строительство и архитектура. – 2006. – № 1 (37).
4. Конструкции бетонные и железобетонные: СНБ 5.03.01-02. – Минск: Стройтехнорм, 2002. – 274 с.
5. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1: General Rules and Rules for Building, Commission of the European Communities.
6. Мамедов, Г.М. Учет продольной арматуры и преднапряжения в оценке прочности наклонных сечений / Г.М. Мамедов, Р.Д. Алиев // Бетон и железобетон. – 1984. – № 3. – С. 32 – 33.
7. Борисов, Ю.М. Прочность наклонных сечений изгибаемых армокаудоновых элементов / Ю.М. Борисов, А.Э. Поликутин // Бетон и железобетон. – 2004. – № 1. – С. 15 – 19.
8. Фридман, И.И. О роли продольной арматуры стеклопластбетонных балок в восприятии поперечных сил / И.И. Фридман // Строительные конструкции: сб. науч. тр. – Минск: ИСиА, 1979. – С. 50 – 54.
9. Баташев, В.М. Прочность, трещиностойкость и деформации железобетонных элементов с многорядным армированием / В.М. Баташев. – Киев: Будівельник, 1978. – 120 с.
10. Пуцялис, П.Ю. Минимальное расчетное поперечное армирование железобетонных элементов / П.Ю. Пуцялис // Прочность бетона и железобетона. Железобетонные конструкции № 10: науч. тр. высш. учеб. заведений Литовской ССР. – Вильнюс, 1980. – С. 37 – 46.
11. Swamy, R.N. The effectiveness of steel fibers as shear reinforcement / R.N. Swamy, H.M. Bahira // Concrete international Design and construction. – 1985. – Vol. 7, № 8. – P. 35 – 40.
12. Старишко, И.Н. Влияние наклонных пластин на прочность приопорных участков изгибаемых балок / И.Н. Старишко // Бетон и железобетон. – 1993. – № 7. – С. 4 – 6.
13. Васильев, П.И. О рациональной конструкции поперечного армирования изгибаемых железобетонных элементов / П.И. Васильев, О.А. Рочняк // Совершенствование методов расчета и исследование новых типов железобетонных конструкций: межвуз. темат. сб. тр. ЛИСИ. – Л.: ЛИСИ, 1979. – С. 5 – 10.
14. Бердический, Г.И. Прочность по наклонным сечениям предварительно напряженных железобетонных стропильных балок с двусосным обжатием / Г.И. Бердический, Ю.В. Дмитриев, Н.Н. Коробейников // Предварительно напряженные железобетонные конструкции производственных зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1969. – С. 40 – 51.
15. Морозов, А.Н. Расчет прочности армированных газобетонных балок по наклонным сечениям / А.Н. Морозов, В.В. Макаричев // Бетон и железобетон. – 1989. – № 9. – С. 15 – 16.
16. Красновский, Р.О. О методике испытания железобетонных балок на действие поперечных сил / Р.О. Красновский // Методика лабораторных исследований деформаций и прочности бетона, арматуры и железобетонных конструкций. – М.: НИИЖБ, 1962. – С. 160 – 173.
17. Залесов, А.С. Влияние преднапряжения на прочность элементов по наклонным сечениям / А.С. Залесов, И.Н. Старишко // Бетон и железобетон. – 1987. – № 8. – С. 24 – 25.
18. Бердический, Г.И. Трещиностойкость и прочность самонапряженных элементов по наклонному сечению / Г.И. Бердический, В.Д. Будюк, А.А. Кондратчик // Бетон и железобетон. – 1982. – № 5. – С. 22 – 24.

Поступила 07.05.2007