

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 681.326

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛОГООТОГНУТОЙ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ В ЗОНЕ СРЕЗА ИЗГИБАЕМЫХ АРМОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*А.И. ГИЛЬ; канд. техн. наук Е.Д. ЛАЗОВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматривается важный для строительных конструкций вопрос внедрения стеклопластиковой арматуры. Представлены особенности совместной её работы и сцепления с бетоном. Затронуты проблемы использования композитной арматуры в изгибаемых элементах, включая комбинированное армирование, сделаны основные выводы по исследованиям в этой области разных авторов. Аргументированы предпосылки и перспективы применения стеклопластиковой арматуры с пологим отгибом в зоне среза изгибаемых армобетонных элементов. Разработана программа экспериментальных исследований предложенного армирования.

Ключевые слова: армирование, полого отогнутая стеклопластиковая арматура, сцепление с бетоном, предпосылки и перспективы применения.

Введение. В настоящее время в строительной практике и науке активно развивается направление, связанное с применением в бетонных элементах в качестве рабочей арматуры полимерных композитов (англ. *FRPC – fiber reinforced polymer composite*). Этот факт подчёркивается многочисленными работами в области исследования стеклопластиковой арматуры и её применения в армобетонных элементах [1; 2].

Впервые идею использования стеклянного волокна для армирования бетонных элементов сформулировал советский учёный А.К. Буров в 1941 году, что привлекло внимание многих учёных и исследователей в СССР и за рубежом [3]. Наибольший интерес к изучению композитной арматуры появился в середине XX века. Это было связано с расширением области применения железобетонных изделий в сооружениях, которые эксплуатируются в сильно агрессивных средах, где достаточно сложно обеспечить надёжную коррозионную защиту металлической арматуры. Вместе с этим появилась необходимость обеспечения диэлектрических и антимагнитных свойств некоторых конструкций и сооружений. Также немаловажно было учесть ограниченность запасов железных руд, необходимых для производства стали, потребность в которой возрастала.

Благоприятным фактором для внедрения композитных материалов в строительные конструкции стало ускоренное развитие химической промышленности. Соответствующие научные исследования были начаты в технически развитых странах (Германия, Нидерланды, СССР, Япония, США и др.) [4]. Однако в силу высокой стоимости композитной арматуры она не получила коммерческого распространения вплоть до конца 1970-х годов [5].

Возможность применения стеклопластиковой арматуры (СПА) в бетонных элементах обусловлена рядом достоинств по сравнению с металлической арматурой: СПА устойчива к некоторым химическим воздействиям, не подвержена коррозии; является диэлектриком; гораздо легче стальной арматуры; имеет широкий диапазон рабочих температур (от -70 до $+100$ °С); высокая прочность на растяжение, высокая выносливость. Однако массовое внедрение композитной арматуры затруднено из-за ряда факторов: низкий модуль упругости СПА может привести к хрупкой форме разрушения конструкции, что недопустимо по требованиям ТКП EN 1990 Basis of Structural Design; низкая огнестойкость; невозможность изготовления гнутых арматурных изделий в состоянии поставки; невозможность использования сжатой арматуры; высокая стоимость СПА [5; 2].

Следует отметить, что композитную арматуру нельзя рассматривать просто как конкурента металлу, так как сегодня возможно использование комбинированного армирования, что подтверждается обширными исследованиями в этой области [6; 1].

Основные современные направления в исследованиях работы СПА в армобетонных элементах – сцепление СПА различных производителей с бетоном; работа композитных стержней в изгибаемых элементах, включая комбинированное армирование. Особый интерес вызывает возможность применения стеклопластиковой арматуры с пологим отгибом в зоне среза армобетонных элементов, что в перспективе должно обеспечить повышенную прочность и трещиностойкость наклонных сечений.

Применение стеклопластиковой арматуры в изгибаемых элементах. На сегодняшний день выполнять проектирование композитобетонных конструкций возможно только с использованием зарубежных норм проектирования и исключительно под арматуру конкретного производителя [2]. Ввиду отсутствия нормативных документов и стандартов, регламентирующих требования к качеству композитной арматуры, ее механическим свойствам и методам контроля, имеются существенные различия как в технологии изготовления арматуры, так и в геометрических параметрах образующегося при производстве периодического профиля [4]. Например, производится арматура с песчаной посыпкой поверхности или без неё. Очевидным будет тот факт, что при различных параметрах периодического профиля стеклопластиковая арматура различных производителей будет иметь и различные характеристики сцепления с бетоном. Следует отметить, что зацепление выступов периодического профиля или иных микронеровностей на поверхности арматуры с бетоном является решающим фактором, влияющим на совместную работу бетона и арматуры в железобетонном элементе. Стеклопластиковая арматура производится с нерегламентируемыми видами профилей, следовательно, арматурные стержни различных производителей имеют различное сцепление с бетоном, что подтверждается большим количеством исследований в этой области. Проанализировав некоторые работы по изучению особенностей совместной работы и сцеплению стеклопластиковой арматуры с бетоном, можно сделать следующие *общие выводы*:

- наилучшее сцепление с бетоном обеспечивает периодический профиль СПА, образованный навивкой спиральной оплётки стеклотканью;
- на прочность сцепления влияет класс бетона: наилучшее сцепление со стеклопластиковой арматурой у высокопрочных бетонов;
- на прочность сцепления влияет шаг навивки оплёточной нити, а также её угол наклона к оси стержня;
- у стеклопластиковой арматуры разных производителей будет разная прочность сцепления с бетоном, что необходимо учитывать при проектировании конструкций.

В настоящее время всё больше учёных занимаются вопросами работы композитной арматуры в изгибаемых элементах. Такие исследования можно разделить на две группы: бетонные элементы, армированные исключительно СПА [4], и элементы с комбинированным армированием [6; 1].

Анализ указанных научных работ позволил сделать следующие *общие выводы*:

- на начальных этапах исследований стеклопластиковую арматуру целесообразно использовать только с предварительным напряжением;
 - обосновано использование существующих методов расчёта железобетонных изгибаемых конструкций со стальной арматурой применительно к стеклопластиковой арматуре с уточнениями и дополнениями исходя из свойств применяемой стеклопластиковой арматуры. Экспериментальная прочность бетонных элементов с полностью стеклопластиковым армированием, значительно превышающая теоретическую, приводит к необходимости корректировки существующего расчётного аппарата по прочности по нормальным и наклонным сечениям;
 - показано целесообразное использование стеклопластиковой арматуры без предварительного напряжения – получена пластическая форма разрушения опытных образцов с комбинированным армированием, в отличие от хрупкого разрушения балок, армированных только стеклопластиковой арматурой;
 - низкий модуль упругости стеклопластиковой арматуры в самой значительной степени предопределяет её недостаточное использование и невозможность полной замены стальной арматуры.
- Стоит отметить некоторые вопросы в исследованиях, которым не уделяется должного внимания:
- отсутствуют исследования по поведению стеклопластиковой арматуры с отгибами и возможность увеличения прочности наклонных сечений путём установки предварительно напряжённой стеклопластиковой арматуры с пологим отгибом в зоне среза;
 - существуют определённые пробелы в исследовании прочности наклонных сечений бетонных элементов со стеклопластиковой арматурой.

Предпосылки применения полого отогнутой стеклопластиковой арматуры в зоне среза армобетонных элементов. Как отмечалось выше, в настоящее время отсутствуют исследования по изучению работы полого отогнутой стеклопластиковой арматуры в зоне среза. Поэтому для определения возможности использования такого вида армирования в изгибаемых армобетонных конструкциях необходимо рассмотрение особенностей применения металлической арматуры с пологим отгибом в зоне среза; кроме того, необходимы расчёты прочности наклонных сечений с таким армированием.

Как известно из практики [7; 8], для повышения трещиностойкости железобетонных элементов используется предварительное напряжение продольной арматуры, расположенной в растянутой зоне конструкции. Данный метод существенно повышает трещиностойкость нормальных сечений, но практически не оказывает влияния на трещиностойкость и прочность наклонных сечений. Наиболее

целесообразным для повышения трещиностойкости таких сечений является обжатие бетона в вертикальном направлении.

К значительному повышению трещиностойкости сечений в зоне среза при существенном снижении количества поперечного армирования приопорных зон, а в ряде случаев проектирование конструкций без поперечного армирования влечет за собой перевод (отгиб) части продольной арматуры из нижней зоны в пролёте в верхнюю на опорах. Это, в свою очередь, создаёт благоприятные условия для экономии бетона и сокращения веса конструкций за счёт придания им целесообразных форм, возникает возможность применения конструкций с ломаным нижним поясом и без уголщения ширины сечения у опор. Несмотря на рациональность и целесообразность применения железобетонных элементов с полого отогнутой предварительно напряжённой стержневой арматурой в зоне среза, сопротивление таких элементов действию изгибающего момента с поперечным армированием изучено недостаточно [7; 8].

Исследованиями работы полого отогнутой металлической арматуры в зоне среза в своё время занимались учёные В.А. Бушков [9], К.В. Сахновский [10], обширные исследования проводились под руководством В.В. Михайлова [11], О.А. Рочняка [12], В.Н. Малиновского [13] и других. Из анализа проведенных исследований можно сделать следующие *общие выводы*:

- на примере балки [9], у которой на участке с наибольшими поперечными силами среза отогнутая арматура была часто и равномерно расположена и достаточно надёжно заанкерена в бетоне, можно убедиться, что такое армирование хорошо обеспечивает работу балки на срез и позволяет повышать нагрузку вплоть до размеров, когда балка разрушается от действия изгибающего момента, а не от поперечных сил среза. Отогнутые стержни повышают сопротивляемость балки поперечному срезу. Опыты показали, что балки, армированные полого отогнутыми стержнями, имеют в 2,6 раза большую сопротивляемость поперечному срезу, чем балки с арматурой из одних только прямых стержней. В случае если стержни арматуры на концах снабжены крюками, последние оказывают значительное сопротивление выдёргиванию стержней арматуры из бетона, препятствуя тем самым развитию наклонных трещин в балке. Прежде всего, это указывает на необходимость обеспечивать надёжное сцепление арматуры с бетоном либо предусматривать конструкцию анкеров для недопущения внезапной потери несущей способности при проскальзывании арматуры в бетоне;

- нормальный наклон отогнутых стержней к оси балки считается равным 45° , так как при этом угле направление отгиба совпадает с направлением главных растягивающих напряжений;

- отгиб стержней должен быть плавным, радиус закругления не менее $10\varnothing$ арматуры отгиба;

- расчёт наклонных сечений с отгибами, по данным экспериментальных данных [12], не может быть выполнен как для элементов без поперечной арматуры, так как существующий расчёт более чем в 2 раза занижает несущую способность наклонных сечений. Значима разработка предложений по оценке сопротивления балок с пологой отогнутой арматурой, проходящей по всему пролёту среза, действию изгиба и поперечной силой. Исследовались балки с пологим отгибом стержневой арматуры. На основании полученных данных об образовании и распределении магистральных трещин разработаны методы расчёта приопорных зон балок с пологой отогнутой арматурой и незначительным количеством поперечных стержней, по условию $q_{sw} < q_{sw, min}$. Особенность сопротивления балок с пологими отгибами стержневой арматуры под углом 12° , идущими по всему пролёту среза, как показали исследования, в том, что пологие отгибы, не предотвращая образование наклонных трещин в средней половине пролёта, замедляют их развитие;

- наиболее важная стадия напряженно-деформированного состояния для расчётов конструкций с пологоотогнутой арматурой – интенсивное включение в работу отгибов после образования наклонных трещин;

- пологий отгиб в стержнях исключает возможность разрушения изгибаемого элемента одновременно с образованием наклонной магистральной трещины;

- наличие пологих отгибов у конструкции позволяет отнести её к классу элементов, имеющих поперечное армирование, и выполнять оценку несущей способности наклонных сечений по поперечной силе по общей зависимости.

В настоящее время в большинстве международных норм по проектированию железобетонных элементов отгибы продольной растянутой арматуры отнесены к одному из видов поперечного армирования и в расчётах учитываются лишь как составляющие проекционных сил, сопротивляющихся срезу, а расчёт элементов конструкций, требующих по расчёту поперечную арматуру, основывается на методе ферменной модели. Так, в немецких нормах DIN-1045-1.12.1998 в случае армирования элементов отгибами, наклоненными под углом α , расчёт производят из условия:

$$V_{sd} \leq V_{Rd, sy} = (1,2 + \cot \alpha) \sin \alpha \frac{A_{sw,2}}{S_{w,2}} f_{yw,2} \cdot z + V_{crd}, \quad (1)$$

где $V_{Rd,sv}$ – расчётная поперечная сила, воспринимаемая поперечной арматурой; $A_{sv,2}$ – площадь поперечного армирования; $f_{yw,2}$ – расчётное значение предела текучести для поперечной арматуры; z – плечо внутренней пары сил для элемента с постоянной высотой, соответствующее изгибающему моменту в рассматриваемом элементе.

В случае если установлены отгибы под углом, предельная поперечная сила, воспринимаемая сжатыми бетонными подкосами, определяется по следующей формуле:

$$V_{Rd,max} = b_w \cdot z \cdot v' \cdot f_{cd} \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta}, \quad (2)$$

где b_w – наименьшая ширина сечения между растянутым и сжатым поясами; v' – коэффициент уменьшения предела прочности на сжатие для бетона с трещинами среза; f_{cd} – расчетное значение предела прочности бетона при осевом сжатии; θ – угол наклона бетона подкосов при достижении в них сжимающих напряжений $\sigma_{cd} = v' \cdot f_{cd}$, определяемый по формуле:

$$\cot \theta = \frac{1,2}{1 - \frac{0,072 b_w \cdot z \cdot v' \cdot f_{cd}}{V_{Sd}}}. \quad (3)$$

В действующих нормах Республики Беларусь ТКП EN 1992-1-1-2009 для элементов с наклонной поперечной арматурой сопротивление срезу является наименьшим значением из вычисленных по формулам (4) и (5), которые практически идентичны формулам (1) и (2) из немецких норм DIN-1045-1.12.1998:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sv}}{S} \cdot z \cdot f_{ywd} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha, \quad (4)$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta}, \quad (5)$$

где α_{cw} – коэффициент, учитывающий уровень напряжения в сжатом поясе.

Также стоит отметить, что по ТКП EN 1992-1-1-2009 для элементов с наклонными (отогнутыми) напрягающими элементами в растянутом поясе необходимо устанавливать продольную арматуру, воспринимающую продольное растягивающее усилие от действия поперечной силы.

Ряд положительных моментов, полученных из вышеизложенных исследований, даёт возможность предположить, что использование композитной арматуры с пологим отгибом в зоне среза является возможным. Однако для обоснования целесообразности применения такой арматуры необходимо проведение обширных научных исследований в этой области.

Предполагаемая программа экспериментально-теоретических исследований. Для определения несущей способности наклонных сечений изгибаемых армобетонных элементов с предварительно напряженной полого отогнутой стеклопластиковой арматурой в зоне среза планируется решить следующие задачи:

- получить новые экспериментальные данные по прочности и трещиностойкости наклонных сечений изгибаемых элементов с пологим отгибом СПА в зоне среза;
- разработать методику расчёта прочности наклонных сечений изгибаемых элементов, основанную на диаграммах деформирования бетона и СПА, учитывающую напряженно-деформированное состояние элемента;
- изучить влияние различных факторов на напряженно-деформированное состояние элементов, армированных стеклопластиковой арматурой с пологим отгибом в зоне среза.

Для проведения экспериментальных исследований предполагается изготовить опытные образцы балок с предварительно напряженной СПА в зоне среза, а также эталонные образцы с обычным армированием для сопоставления результатов.

Экспериментальные балки будут испытаны по однопролетной балочной схеме с шарнирным опиранием. Конструкцию планируется нагружать при помощи гидравлического пресса и системы траверс, распределяющей нагрузку от пресса на 2 составляющие. В экспериментальных исследованиях балок на каждом этапе нагружения будут проводиться измерения: относительных деформаций основной и полого отогнутой арматуры; ширины раскрытия наклонных трещин; прогиба в середине пролета; относительных деформаций бетона на боковых гранях зоны среза элементов по направлениям главных сжимающих и растягивающих напряжений.

Заключение. По результатам выполненных исследований можно сделать вывод о том, что применение предварительно напряженной стеклопластиковой арматуры с пологим отгибом в зоне среза изгибаемых армобетонных элементов является перспективным направлением, однако требует качественных экспериментальных и теоретических исследований. Для обработки будущих результатов выбран метод сопоставления прочности и трещиностойкости наклонных сечений эталонных образцов с экспериментальными данными опытных образцов.

Конечная цель проводимых исследований – определение целесообразности использования предполагаемого армирования. В случае получения возможных (ожидаемых) положительных результатов

в дальнейшем планируется разработка программы с большим объемом испытаний для элементов, армированных полого отогнутой стеклопластиковой арматуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тур, В.В. Экспериментальные исследования изгибаемых бетонных элементов с комбинированным армированием стальными и стеклопластиковыми стержнями / В.В. Тур, В.В. Малыха // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 8. – С. 58–65.
2. Лешкевич, О.Н. Перспективы применения композитной арматуры [Электронный ресурс] / О.Н. Лешкевич // Проблемы современного бетона и железобетона : третий междунар. симп., Белгород, 9–11 нояб. 2011 г. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/664098>. – Дата доступа: 26.03.2015.
3. Буров, А.К. Синтетические волокнистые анизотропные структуры / А.К. Буров, Г.Д. Андриевская. – М., 1952.
4. Фролов, Н.П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции / Н.П. Фролов. – М. : Стройиздат, 1980. – 104 с.
5. Василенко, А.И. Применения неметаллической арматуры в Республике Беларусь / А.И. Василенко // Наука – 2012 : сб. науч. ст. : в 2 ч. Ч. 2 / ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол. : Г.М. Третьяков (отв. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2012. – С. 125–127.
6. Польской, П.П. Композитные материалы – как основа эффективности в строительстве и реконструкции зданий и сооружений / П.П. Польской, Д.Р. Маилян // Инженерный вестн. Дона : электрон. журнал. – Ростов н/Д, 2012. – № 4.
7. Малиновский, В.Н. Сопротивление предварительно напряжённых железобетонных балок из высокопрочного бетона с отогнутой стержневой арматурой при изгибе с поперечной силой : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / В.Н. Малиновский. – Л., 1988.
8. Шалобыта, Н.Н. Сопротивление срезу железобетонных балок с пологим отгибом части продольной предварительно напряженной арматуры [Электронный ресурс] / Н.Н. Шалобыта, В.Н. Малиновский, Т.П. Шалобыта. – Брест : БрГТУ, 2010. – Режим доступа: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/6560/1/57.pdf>. – Дата доступа: 07.04.2015.
9. Бушков, В.А. Железобетонные конструкции / В.А. Бушков : в 2-х ч. – М. : Гос. изд. строительной лит., 1941. – Ч. 2 : Расчёт и конструирование элементов железобетонных сооружений.
10. Сахновский, К.В. Железобетонные конструкции / К.В. Сахновский. – 8-е изд. перераб.; М. : Госстройиздат, 1959.
11. Михайлов, В.В. Предварительно напряженные железобетонные конструкции с проволоочной и прядевой арматурой. Технология изготовления / В.В. Михайлов, А.А. Фоломеев. – М. : Стройиздат, 1971.
12. Рочняк, О.А. Сопротивление поперечному изгибу железобетонных элементов с продольной и отогнутой арматурой (при наличии и отсутствии сцепления с бетоном) : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / О.А. Рочняк. – М. : НИИЖБ, 1994.
13. Малиновский, В.Н. Напряженно-деформируемое состояние железобетонных балок с отогнутой предварительно напряжённой арматурой / В.Н. Малиновский, О.А. Рочняк // Иссл. по стр. механике и стр. констр. : техн. сб. тр. – Челябинск : Политехн. ин-т, 1983. – С. 81–84.

Поступила 15.12.2015

PERSPECTIVE OF APPLICATION FIBER REINFORCED POLYMER WITH AN ACCLIVOUS BEND IN ZONE CUT BENDING CONCRETE ELEMENTS

A. HIL, Y. LAZOUSKI

In this paper, we consider the important issue of introducing a fiberglass reinforcement for building structures. The features of teamwork and cohesion with concrete are presented. The issues of the use of composite reinforcement in flexural members, including the combined reinforcement are considered; the main findings of studies conducted by different authors are shown. We present conditions and prospects of a fiberglass reinforcement with an acclivous bend in zone cut bending concrete elements. The program of experimental studies of the proposed reinforcement is developed.

Keywords: *reinforcement, bent hollow fiberglass reinforcement, adhesion on concrete, prerequisites and application prospects.*