

УДК 624.012.4

А.М. Горб, С.А. Пушкарёв

ООО «ПСК Конкрет Инжиниринг»

ПРИМЕНЕНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ В БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рост объёмов производства неметаллической композитной арматуры и настойчивые предложения различных фирм-производителей по её повсеместному использованию в качестве альтернативы металлической, обуславливают необходимость проведения объективного анализа и сравнения данных типов армирующих материалов. Следует отметить, что практическое применение композитной арматуры для армирования бетона всё ещё сдерживается недостаточной изученностью данного вопроса, отсутствием нормативной базы для проектирования и высокой её стоимостью.

Статья посвящена проблемам внедрения в практику строительства неметаллической композитной арматуры на примере изделий из стекло- и базальтопластиков.

Ключевые слова: Неметаллическая арматура, стеклопластиковая арматура, базальтопластиковая арматура, композитная арматура, композитобетонные конструкции, прочность при растяжении, модуль упругости, коррозионная стойкость.

Возможность эффективного армирования бетонных конструкций неметаллической арматурой давно интересовала инженерно-технических и научных работников. Идея использования стеклянного волокна для армирования бетонных конструкций, впервые сформулированная советским учёным А.К. Буровым в 1941 г., впоследствии привлекла внимание многих научных работников как в нашей стране [1-8], так и за рубежом [16, 17].

Создание композитной арматуры и композитобетонных конструкций является результатом исследований выполненных в разное время советскими учёными, в первую очередь, докторами технических наук, профессорами А.А. Гвоздевым, К.В. Михайловым, Н.А. Мощанским, О.Я. Бергом, И.Н. Ахвердовым, Ю.М. Ивановым, Н.П. Фроловым, докторами химических наук Г.Д. Андреевской, М.С. Аслановой, кандидатами технических наук Ю.М. Вильдавским, С.С. Жавридом, Ю.В. Кондратьевой, К.В. Зеленским, Б.В. Накашидзе, И.В. Подмостко, Ю.В. Дегтярём, кандидатом химических наук И.С. Скорыниной и др.

Существенный вклад в организацию исследований и опытно-промышленных работ внесли доктор технических наук, профессор С.С. Атаев и кандидаты технических наук Н.М. Мулин и И.И. Цыганков.

В последние годы достаточно большой объём работ по исследованию свойств композитной арматуры был выполнен в лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций (№13) НИИЖБа доктором технических наук Н.К. Розенталем и кандидатом технических наук В.Р. Фаликманом под руководством заведующей лабораторией, доктора технических наук, профессора В.Ф. Степановой.

Результаты выполненных исследований показали невозможность повсеместной замены стальной арматуры на композитную, она эффективна только при создании конструкций, в которых используются её специфические свойства, выгодно отличающие её от стальной. К таким свойствам относятся высокая коррозионная стойкость, электроизолирующая способность, радиопрозрачность и магнитоинертность. Поэтому, первоочередными являются научные исследования и практические работы, направленные на дальнейшее изучение свойств композитной арматуры и возможности её применения в конструкциях, где данные свойства являются определяющими.

Композитная арматура представляет собой гетерогенную систему, состоящую из ориентированного композитного материала и полимерного связующего. Основной композитной арматуры как изделия является материал, который формируется из композитного волокна (базальтового, стеклянного, арамидного, углеродного) и связующего - термореактивной синтетической смолы. Ввиду высокой стоимости, композитная арматура из углеродного и арамидного волокна распространения не получила, в связи с чем, далее в настоящей статье речь пойдёт об арматуре из базальтового и стеклянного волокна (ровинга).

Как было отмечено в статье О.Н. Лешкевича [7], композитная арматура в сравнении со стальной обладает рядом существенных недостатков, среди которых можно отметить следующие:

- низкие расчётные характеристики прочности при растяжении и сжатии;
- низкий модуль упругости;
- низкая огнестойкость;

- значительно отличающийся (практически в 6 раз) от бетона коэффициент линейного температурного расширения;
- невозможность изготовления гнутых арматурных изделий непосредственно на объекте строительства;
- нецелесообразность использования в качестве сжатой арматуры;
- высокая стоимость.

Несмотря на традиционно бытующее на протяжении предыдущих десятилетий мнение о наибольшей целесообразности применения композитной арматуры в конструкциях с предварительным напряжением, до настоящего времени реализованы лишь единичные подобные примеры и, как правило, в качестве экспериментальных образцов на объектах опытного строительства. Практика показала, что это было неверное позиционирование композитной арматуры по области применения, которое сдерживало её массовое внедрение. В результате строительная наука многие годы не занималась исследованиями в наиболее актуальных направлениях применения. В тоже время, получившая распространение стальная канатная арматура в оболочке, применяемая в первую очередь для изготовления постнапряжённых конструкций, имеет лучшие технико-экономические показатели, при этом весьма хорошо себя зарекомендовала в общемировой практике строительства. Наличие коррозионностойкой оболочки обеспечивает необходимую защиту стальной канатной арматуры. Таким образом, применение композитной арматуры в качестве напрягаемой, в том числе, по причине её неконкуренентоспособности, может носить исключительно единичный характер и в большинстве случаев необосновано.

Помимо технических препятствий для широкого применения композитной арматуры существуют дополнительные, в том числе организационные трудности, некоторые из которых приведены ниже.

1. Практически отсутствует нормативная документация по проектированию композитобетонных конструкций. Разработанные НИИЖБом в 1978 году «Рекомендации по расчёту конструкций со стеклопластиковой арматурой. Р-16-78» [13] распространяются «на проектирование *опытных* конструкций из бетонов со стеклопластиковой арматурой». Данные рекомендации применимы **только** при проектировании стеклопластобетонных конструкций со стеклопластиковой арматурой периодического профиля диаметром **6 мм** (СПА-6), выпускавшейся ранее по ТУ 7 БССР, носят рекомендательный характер и, кроме этого, нуждается в актуализации (документ был принят 36 лет назад).

Принятый 01.01.2014 г. межгосударственный стандарт ГОСТ 31938 [10] устанавливает общие технические условия на полимерную композитную арматуру (АКП), но, по определению, не содержит расчётных методик. В 2012 году «НИИЖБом» были разработаны «Технические рекомендации по применению неметал-

лической композитной арматуры периодического профиля в бетонных конструкциях» [14], где содержится указание, что при проектировании композитобетонных конструкций следует соблюдать требования «Рекомендаций ...» [13], где содержатся соответствующие ограничения.

2. Ввиду недостаточной изученности вопроса не существует ясного понимания по назначению нормативных и расчётных характеристик композитной арматуры. По крайней мере, недавно принятый межгосударственный стандарт ГОСТ 31938 [10] таких данных не содержит. Нормативные и расчётные характеристики арматуры изредка указываются различными производителями на основании индивидуальных соображений (в лучшем случае на основании данных испытаний в собственной или привлечённой, часто ангажированной лаборатории), либо, в подавляющем большинстве случаев, не указываются вовсе.

В основном, производителями композитной арматуры в качестве основной прочностной характеристики арматуры указывается некая величина под названием «прочность на разрыв», которая проектировщику ни о чём не говорит, является бесполезной величиной и не используется в расчётах (хотя производители оперируют именно данным значением, вводя потребителей в заблуждение);

Следует отметить, что даже ГОСТ 31938 [10] не содержит данных по нормативным и расчётным характеристиками композитной арматуры; единственными, вскользь упоминаемыми характеристиками, являются значения «предела прочности при сжатии, срезе и растяжении», что к реальным практическим расчётам не имеет никакого отношения.

Как было отмечено выше, для выполнения расчётов конструкций из (практически любых материалов) используются только три основные характеристики материала:

- нормативное значение сопротивление растяжению;
- расчётное значение сопротивление растяжению;
- модуль упругости.

Косвенно, значения данных величин были определены в рамках данной статьи авторами и представлены ниже.

Следует отметить, что прочностные и деформационные характеристики одной и той же композитной арматуры существенно разнятся у различных производителей и существенно отличаются от значений определённых ГОСТ 31938 [10], что неприемлемо и может служить поводом для спекуляций со стороны производителей.

3. Не стандартизированы методики расчёта минимального процента армирования;

4. Не изучен опыт эксплуатации конструкций с композитной арматурой. Особо следует отметить недостаточную изученность работы данной арматуры в сжатых элементах и в изгибаемых элементах с расположением арматуры в сжатой зоне сечения.

5. Немаловажным является факт отсутствия диссертационных работ по данной теме, а также публикаций в ВАКовских изданиях. Имеющиеся работы касаются, в основном, проблем коррозионной стойкости композитной арматуры.

6. Во многих случаях неверно позиционирование по области применения. Производители арматуры пытаются убедить инженеров - проектировщиков и строителей в возможности применения данной арматуры практически во всех строительных конструкциях, хотя, например, в ГОСТ 31384 [9] указано:

«п. 6.10. ...В средне- и сильноагрессивных средах для армирования рекомендуется применять неметаллическую композиционную арматуру, за исключением изгибаемых элементов...», к которым относятся перекрытия, различные изгибаемые балки, фундаменты, а также конструкции, лежащие на упругом основании, в том числе подстилающие слои полов.

Общеизвестно, что серьёзным недостатком композитной арматуры, затрудняющим её массовое внедрение в практику строительства, является низкое значение модуля упругости. Согласно данным п. 5.1.4., табл. 4 [10] модули упругости стеклокомпозитной (АСК) и базальтокомпозитной арматуры равны и составляют 50 ГПа. Следует отметить, что значение модуля упругости арматуры при сжатии нормативно не определено, тем самым корректно выполнить расчёты сжатых элементов и элементов с армированием сжатой зоны не представляется возможным. Кроме этого, предел прочности при сжатии композитной арматуры не превышает 300 МПа (для всех видов) [10], что существенно ниже, чем у стальной и, вследствие этого, её использование в этих случаях неприемлемо.

В четыре раза более низкий модуль упругости композитной арматуры в сравнении со стальной арматурой приводит к снижению предельной нагрузки изгибаемого элемента без предварительного напряжения растянутой арматуры не только по второй группе предельных состояний, но и по первой. Весьма значительная деформативность композитной арматуры фактически не позволяет производить большинство конструкций, которые традиционно выполняются из железобетона. Уравнения равновесия, действительные для сечений со стальной арматурой, не могут быть буквально использованы в сечениях с композитной арматурой, имеющей значительно более низкий модуль упругости и требуют уточнений. При больших деформациях растянутой зоны сечения изгибаемого элемента высота сжатой зоны уменьшается, при этом сама форма эпюры напряжений меняется, что приводит к уменьшению прочности элемента по сечению.

Исследовательские работы по изучению напряжённо-деформированного состояния композитобетонных конструкций при действии различных усилий недостаточно изучена и должна быть продолжена с участием научно-технических работников исследовательских учреждений.

В зависимости от фактического процента армирования принято три возможных механизма разрушения изгибаемого композитобетонного элемента:

- при достижении предельных деформаций в сжатом бетоне;
- при одновременном достижении деформаций в сжатом бетоне и растянутой арматуре;
- при достижении предельных деформаций в растянутой арматуре.

Для трёх вышеперечисленных расчётных ситуаций имеются принципиально различные уравнения равновесия и выражения для определения напряжений в бетоне и арматуре, которые, в любом случае, справедливы только при величине процента армирования выше минимального. Вследствие низкого модуля упругости композитной арматуры при проценте армирования ниже определённого уровня вследствие незначительного уровня напряжений в арматуре, композитобетонная изгибаемая конструкция может разрушиться по бетону до достижения предельных усилий в арматуре. Такой характер разрушения невозможен в сечении со стальной арматурой. По этой причине высокие прочностные показатели композитной арматуры в подавляющем большинстве случаев остаются нереализованными. Учитывая данное обстоятельство, на стадии расчёта обязательным является контроль минимального процента армирования индивидуально для каждого расчётного случая, так как, в случае с композитной арматурой его величина не может иметь фиксированного значения, которая, к примеру, в американских нормах [16] является функцией расчётного сопротивления арматуры и геометрических параметров сечения. Таким образом, ошибки в оценке минимального процента армирования композитобетонной конструкции могут привести к разрушению сжатой зоны изгибаемого элемента на стадии образования трещин в растянутой зоне бетона даже при незначительных нагрузках.

Распространённое мнение об отсутствии необходимости контроля ширины раскрытия трещин в конструкциях армированных композитной арматурой входит в противоречие с существующими по данному направлению национальными нормами. К примеру, в соответствие с японскими нормами допускаемая ширина раскрытия трещин составляет 0,5 мм, в канадских нормах – 0,5 мм для конструкций, эксплуатируемых на открытом воздухе и 0,7 мм для конструкций внутри помещений. В соответствие с американским стандартом АСІ 318 [17] требования по ширине раскрытия трещин, как со стальной арматурой, так и композитной – идентичны. В отечественных нормах [13] содержится следующее указание: *«1.8. К трещиностойкости стеклопластбетонных конструкций предъявляются требования 1-й категории. Применение конструкций с трещинами требует специального обоснования»*.

Таким образом, учитывая требования [13] по трещиностойкости, конструкции, армированные композитной арматурой, следует рассчитывать без учёта

наличия трещин, то есть как неармированную бетонную конструкцию.

Серьёзной технологической проблемой является невозможность выполнения гнутых арматурных изделий из композитной арматуры, без которых сконструировать армирование конструкции во многих случаях невозможно. Фактически производитель работ должен комплектовать объект гнутыми арматурными изделиями по дополнительной договорённости с производителем самой арматуры или использовать стальную, что потенциально несёт в себе организационные сложности.

Весьма существенным недостатком композитобетонных конструкций в сравнении с аналогичными железобетонными является их меньшая огнестойкость. Во ВНИИПО были проведены испытания бетонных конструкций со стеклопластиковой арматурой на огнестойкость. При этом изучалось поведение арматуры в среде бетона в условиях пожара. Огнестойкость бетонных конструкций со стеклопластиковой арматурой определялась испытанием балок и плит на специальных огневых установках при стандартном температурном режиме, моделирующим условия пожара.

Предел огнестойкости армированных бетонных конструкций наступает, как правило, в результате потери несущей способности за счёт понижения предела прочности растянутой арматуры в процессе её нагревания до критической температуры, при которой сопротивление арматуры снижается до значений рабочих напряжений.

Все испытанные композитобетонные конструкции разрушались хрупко с разрывом арматуры при средней температуре в растянутой рабочей арматуре 100°C. Предел огнестойкости для серии образцов составил от 13 до 18 мин. Было предположено, что при нагреве свыше температуры 100°C, происходит активное парообразование влаги, находящейся в микротрещинах, расположенных на поверхности стеклянного волокна. При этом, мгновенно повышается давление и, как следствие, разрушается волокно, то есть, наступает резкий спад прочности арматуры и конструкция разрушается. Логично предположить, что предел огнестойкости может отличаться для различных производителей арматуры, а также зависеть от материала ровинга, однако очевидно, что композитную арматуру нельзя применять без специальных конструктивных мероприятий либо дополнительной огнезащиты.

В рекламных материалах предприятий-изготовителей композитной арматуры содержатся таблицы альтернативной замены стальной арматуры на композитную. **Данная замена абсолютно недопустима и должна быть исключена из рассмотрения, поскольку данные, представленные в таких таблицах являются необоснованными и ошибочными.**

Основным аргументом для такой замены «специалисты» по композитной арматуре считают предположение, что *«расчётное сопротивление разрыву стеклопластиковой арматуры превышает аналогичные пока-*

затели стальной арматуры в 3 раза». При этом, в качестве сравнения (вероятно для контраста) производитель, в большинстве случаев, приводит стальную арматуру класса АШ, которая в последнее время практически не применяется. Подавляющее большинство конструкций изготавливается из арматуры классов А500 и А600.

Следует отметить, что расчёт армированных бетонных конструкций (независимо от вида применяемой арматуры) должен производиться по предельным состояниям, включающим:

- предельные состояния первой группы (по полной непригодности к нормальной эксплуатации вследствие потери несущей способности);
- предельные состояния второй группы (по непригодности к нормальной эксплуатации вследствие образования или чрезмерного раскрытия трещин, появления недопустимых деформаций и др.).

При расчёте конструкции по первой группе предельных состояний в качестве основной характеристики арматуры принимается расчётное сопротивление арматуры растяжению, но никак не её сопротивление разрыву (большинство производителей композитной арматуры в своих рекламных материалах ссылаются именно на данную характеристику своей арматуры, которая к расчётам конструкций не имеет никакого отношения и, может представлять интерес только для исследователей материалов).

При анализе эффективности различных типов арматуры необходимо сравнивать расчётные сопротивления растяжению, а не разрыву.

Согласно нормативным данным [11] расчётные сопротивления растяжению стальной арматуры классов А500 и А600 составляют, соответственно, 435 МПа и 520 МПа.

В недавно принятом ГОСТе на композитную полимерную арматуру [10] необходимые расчётные данные отсутствуют, приведены только значения временного сопротивления растяжению (пределы прочности при растяжении), которые для стеклопластиковой и базальтопластиковой арматуры одинаковы и составляют 800 МПа. Следует отметить, что аналогичные показатели для арматуры классов А500 и А600 составляют 600 МПа и 740 МПа (с достаточными запасами).

Данные характеристики стальной арматуры гарантированы при нагреве арматуры до 450°C (немаловажным является факт, что при нагреве стеклопластиковой арматуры до температуры более 100°C происходит хрупкое разрушение конструкции).

Согласно табл. 3 ГОСТа 31938-2012 [10] происходит снижение прочности композитной арматуры на 25% при её выдержке в щелочной среде бетона. Таким образом, временное сопротивление растяжению композитной арматуры в бетонной конструкции следует принимать 600 МПа, что соответствует показателям стальной арматуры А500 и ниже (на 19%) чем для арматуры А600. Следовательно, композитная арматура по показа-

телю временного сопротивления растяжению не отличается от традиционно используемой стальной арматуры класса А500.

Как было отмечено выше, основной характеристикой арматуры при расчёте по прочности является расчётное сопротивление растяжению, которое, например, для арматуры класса А500 составляет 435 МПа, а для композитной арматуры современными нормами пока не определено. Однако, учитывая данные «Рекомендаций...» [13] расчётное сопротивление композитной арматуры растяжению может быть определено по формуле:

$$R_a = \frac{R_a''}{K_a} \quad (1)$$

где,

R_a'' - временное сопротивление растяжению композитной арматуры (для арматуры с учётом эксплуатации в щелочной среде цементного бетона $R_a'' = 600$ МПа);

K_a - коэффициент безопасности по арматуре, принимаемый (при расчёте конструкций по первой группе предельных состояний) равным 1,3.

Таким образом, учитывая требования [13] и принимая во внимание (1) получаем для композитной арматуры (при использовании её в качестве армирующего элемента цементобетонной конструкции) значение R_a равным:

$$R_a = \frac{R_a''}{K_a} = \frac{600}{1,3} = 462 \text{ МПа}$$

Согласно п. 2.6 [13] расчётные сопротивления арматуры для предельных состояний первой и второй групп определяются путём умножения на соответствующие условия работы m_a , учитывающий возможность неполного использования прочностных характеристик арматуры в связи с продолжительным действием напряжений, неравномерным распределением напряжений в сечении, условиями анкеровки, изменением свойств арматуры в зависимости от условий работы конструкции и т.п.

Для сечений с ненапрягаемой арматурой, а также для конструкций, твердеющей в нормальных условиях (без пропаривания в условиях повышенных температур), коэффициент m_a принимается равным 0,65 [13]. При воздействии на конструкцию в процессе эксплуатации воды, вводится дополнительный коэффициент условий работы $m_{a,k}$ равный 0,9 (п. 3, табл. 3) [13].

Следовательно, для выполнения расчётов большинства композитобетонных конструкций расчётное сопротивление растяжению композитной арматуры (R_f) следует принимать равным:

$$R_f = R_a \cdot m_a \cdot m_{a,k} = 462 \text{ МПа} \cdot 0,65 \cdot 0,9 = 270 \text{ МПа}$$

Таким образом, расчётное сопротивление композитной арматуры значительно ниже, чем стальной, по

крайней мере, в сравнении с традиционной арматурой А500, аналогичный показатель которой составляет 435 МПа.

Простое сравнение механических свойств различных видов арматур в конструкции позволяет констатировать, что расчётное сопротивление стальной арматуры класса А500 превосходит расчётное сопротивление композитной в 1,6 раза, а по сравнению с арматурой А600 композитная арматура «слабее» почти в 2 раза.

Не так давно на рассмотрение экспертов «Минрегионразвития» поступил проект свода правил, который «распространяется на проектирование конструкций из бетона зданий и сооружений различного назначения, армированных неметаллической композитной арматурой на основе углеродных, арамидных, базальтовых и стеклянных волокон» [15].

В этом документе (надо надеяться) обобщён опыт предыдущих исследований и предложена методика определения, в том числе, расчётного сопротивления арматуры растяжению.

Согласно п. 5.6.2. [15]: «Расчётное значение сопротивления растяжению (R_f) неметаллической композитной арматуры следует определять по формуле:

$$R_f = \frac{\gamma_{f1} \cdot \gamma_{f2} \cdot R_{f,n}}{\gamma_f} \quad (2)$$

где:

γ_f - коэффициент надёжности по материалу, принимаемый при расчёте по предельным состояниям второй группы равным 1,0, а при расчёте по предельным состояниям первой группы - равным 1,5.

γ_{f1} - коэффициент, учитывающий условия эксплуатации конструкции с неметаллической композитной арматурой, принимаемой по табл. 5.2. [15].

Таблица 5.2. [15]

| Условия эксплуатации конструкции | Вид неметаллической композитной арматуры | |
|----------------------------------|--|-------|
| | АНК-С | АНК-Б |
| Во внутренних помещениях | 0,8 | 0,9 |
| На открытом воздухе | 0,7 | 0,8 |

γ_{f2} - коэффициент, учитывающий длительность действия нагрузки, принимаемый по табл. 5.3 [15]:

Таблица 5.3. [15]

| Вид нагрузки | Вид неметаллической композитной арматуры | |
|-----------------|--|-------|
| | АНК-С | АНК-Б |
| Кратковременная | 1 | 1 |
| Длительная | 0,3 | 0,4 |

$R_{f,n}$ - нормативные значения прочностных характеристик арматуры, принимаемые по табл. 5.1 [15]:

Таблица 5.1. [15]

| Наименование показателя | Ед. изм. | АНК-С | АНК-Б |
|--|----------|-------|-------|
| Предел прочности при растяжении, $R_{f,n}$ | МПа | 800 | 900 |

Вариантов условий эксплуатации конструкций и видов нагрузок по длительности действия множество, однако, в рамках данной статьи, предположим следующую ситуацию:

Конструкция эксплуатируется внутри помещения при длительном нагружении, в конструкции используется стеклопластиковая арматура.

Подставляя в формулу (2) численные значения имеем:

$$R_f = \frac{\gamma_{f1} \cdot \gamma_{f2} \cdot R_{f,n}}{\gamma_f} = \frac{0,8 \cdot 0,3 \cdot 800}{1,5} = 128 \text{ МПа}$$

Предположим использование в качестве арматуры базальтопластиковых стержней типа АНК-Б, в этом случае:

$$R_f = \frac{\gamma_{f1} \cdot \gamma_{f2} \cdot R_{f,n}}{\gamma_f} = \frac{0,9 \cdot 0,4 \cdot 900}{1,5} = 216 \text{ МПа}$$

Выполненные расчёты показывают абсолютную абсурдность замены стальных арматурных стержней на композитные, по крайней мере, исходя из сравнительных расчётных прочностных показателей композитной и стальной арматуры.

В качестве выводов, представим полученные данные в табличной форме:

| Наименование показателя | Вид композитной арматуры | | Стальная арматура | |
|---|--------------------------|-------|-------------------|-------|
| | АНК-С | АНК-Б | А 500 | А 600 |
| Расчётное сопротивление растяжению, МПа | 128 | 216 | 435 | 520 |

Таким образом, сравнивая расчётные характеристики композитной и стальной арматуры, можно сделать очевидные выводы, показывающие неоспоримые преимущества стальной арматуры по сравнению с композитной и именно данный факт обусловил широкое распространение железобетона в строительстве.

Способность арматуры сопротивляться растягивающим усилиям весьма существенно влияет на несущую способность армированной бетонной конструкции, однако, помимо этого, необходимо учитывать и другие факторы, к которым относятся прочностные и деформативные характеристики бетона, а также геометрические характеристики сечения. Разнообразные условия эксплуатации и назначения конструкций обуславливают

необходимость учитывать при проектировании дополнительные конструктивные требования.

Как было указано выше, предприятия-изготовители композитной арматуры в своих рекламных материалах приводят недостоверные таблицы замены стальной арматуры на композитную, ничем не обосновывая её данные, вводя потребителей в заблуждение. Авторами статьи были проведены соответствующие (сравнительные) прочностные расчёты, результаты которых приведены ниже.

Расчёты были проведены только для первой группы предельных состояний, что вполне достаточно для отражения сути. Для примера приведём результаты расчётов прямоугольного сечения шириной 1 м высотой 200 мм. При выполнении расчётов был принят бетон класса В25.

В качестве расчётного было принято значение изгибающего момента равного 26,63 кН*м/м, что соответствует, например:

- моменту, возникающему в расчётном сечении конструкции промышленных полов при действии сосредоточенной нагрузки 150 кН, равномерно распределённой по следу размером 200*200 мм (что соответствует значениям нагрузок в складских помещениях, оборудованных 6-ти ярусными сборными стеллажами при нагрузке на стойку 7,5 тн);
- моменту, возникающему в расчётном сечении плиты перекрытия пролётом 4 метра при действии равномерно распределённой нагрузки 1,1 тн*м;
- моменту, возникающему в расчётном сечении плиты перекрытия пролётом 4 метра при действии сосредоточенной нагрузки 1,9 тн;

Результаты расчётов (площадь сечения растянутой арматуры):

- при применении арматуры А500С: **397 мм²**;
- при применении арматуры АНК-С: **1351 мм²**;
- при применении арматуры АНК-Б: **800 мм²**.

Таким образом, результаты расчётов показывают, что при замене стальной арматуры на композитную необходимо увеличить площадь сечения стержней:

- стеклопластиковой арматуры (АНК-С): в **3,4 раза**;
- базальтопластиковой арматуры (АНК-Б): в **2 раза**.

То есть, при шаге армирования 200 мм диаметры стержней должны быть не менее:

- металлической арматуры А500С: **10 мм**;
- стеклопластиковой арматуры (АНК-С): **18 мм**;
- базальтопластиковой арматуры (АНК-Б): **14 мм**.

На сегодняшний день производителями налажен выпуск композитной арматуры диаметрами 5, 8 и 10мм, при этом, согласно «Техническим рекомендациям ТР 13-1-04» (разработанным «НИИЖБ им. А.А. Гвоздева»), расчётные диаметры стержней композитной арматуры отличаются от номинальных весьма существенно (см. п.3.1., табл. 1). Так, например расчётный диаметр

профиля № 8 составляет 5,8 мм, а профиля № 10 – 8 мм.

Таким образом, при технической необходимости применения композитной арматуры взамен металлической необходимо учитывать факт несоответствия номера профиля композитной арматуры её расчётному диаметру, который в отличие от металлической существенно различается.

Рассмотрим вариант замены стальной арматуры на композитную с учётом фактического (расчётного) диаметра композитного стержня 8мм (профиль №10).

Простые арифметические расчёты показывают, что при использовании профиля №10 (расчётный диаметр стержней 8 мм), шаг армирования составляет:

- при использовании арматуры АНК-С: 37 мм;
- при использовании арматуры АНК-Б: 62 мм.

Производители композитной арматуры часто расценивают свою продукцию в руб/м/пог.

Ниже приведена соответствующая сравнительная таблица:

| Параметр | Тип арматуры | | |
|-------------------------------------|--------------|-------|-------|
| | A500C | АНК-С | АНК-Б |
| Номинальный диам. (мм) | 10 | 10 | 10 |
| Расчётный диам. (мм) | 10 | 8 | 8 |
| Шаг армирования (мм) | 200 | 37 | 62 |
| Длина стержней (м/м ²) | 10 | 54 | 32,23 |
| Удельная стоимость (р/м.п) | 15 | 20 | 20 |
| Стоимость всего (р/м ²) | 150 | 1081 | 645 |

Как видно из вышеприведённой таблицы композитная арматура существенно уступает (с экономической точки зрения) стальной. Так, применение стеклопластиковой арматуры в 7 раз увеличивает стоимость затрат на армирование, а базальтопластиковой не менее чем в четыре раза.

Дополнительно следует отметить, что композитная арматура, в отличие от стальной, является разномодульным материалом, то есть, модуль упругости при растяжении отличается от модуля упругости при сжатии. Например, для стеклопластиковой арматуры модуль упругости при растяжении составляет 50 ГПа, а при сжатии – 30 ГПа [8], то есть равен модулю упругости бетона. Данный факт исключает (вследствие бесполезности) использование данной арматуры в элементах, работающих на сжатие, и в сжатой зоне изгибаемых элементов.

Как было отмечено выше, итоговое назначение параметров армированной бетонной конструкции производится на основе анализа, помимо прочего, работы и удовлетворения требований по второй группе предельных состояний. При этом, является общеизвестным фактом, что расчёт изгибаемых элементов по первой группе предельных состояний является предварительным, на основании которого назначаются начальные параметры конструкции, окончательным является рас-

чёт по второй группе предельных состояний, в том числе, по образованию и ширине раскрытия трещин.

Как известно, ширина раскрытия трещин в армированном бетонном элементе, в общем случае, определяется исходя из уравнений теории упругости, основным из которых является закон Гука о пропорциональности деформаций действующим напряжениям.

Значительно более низкий модуль упругости композитной арматуры по сравнению со стальной, обуславливает более высокую деформативность элемента в первом случае.

Расчёт ширины раскрытия трещин производится по формуле:

$$a_{cr} = \frac{\sigma_s l_c}{E_s} \quad (3)$$

где,

σ_s - величина действующих напряжений в растянутой арматуре, определяемая по формуле:

$$\sigma_s = \frac{m_d}{A_s (h_0 - \frac{x}{3})} \quad (4)$$

E_s - модуль упругости арматуры;

l_c - расстояние между трещинами;

m_d - действующий изгибающий момент;

A_s - площадь сечения растянутой арматуры;

h_0 - рабочая высота сечения;

x - высота сжатой зоны бетона.

Как видно из формулы (3), чем меньше значение модуля упругости, тем больше ширина раскрытия трещин. Таким образом, при использовании, например, стеклопластиковой арматуры, имеющей модуль упругости $E_s = 50$ ГПа, ширина раскрытия трещин будет в 4 (!) раза больше, чем при использовании стальной арматуры ($E_s = 200$ ГПа), при одинаковом, в обоих случаях значениях действующего изгибающего момента.

Низкий модуль упругости композитной арматуры по сравнению со стальной ограничивает её применение в строительстве ещё и потому, что композитная арматура, установленная из условия прочности на растяжение, не успеет полностью включиться в работу к моменту возникновения недопустимых деформаций (прогибов и трещин).

Существенным недостатком стеклопластиковой арматуры, при использовании её в конструкциях, является отличный от бетона коэффициент линейной температурной деформации, напротив, данные коэффициенты бетона и стальной арматуры практически совпадают, что и обусловило применение железобетона в различных климатических условиях и при различных температурных воздействиях. Согласно имеющимся данным [8], коэффициент линейной температурной деформации стеклопластиковой арматуры составляет $0,58 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, что практически в шесть (!) раз выше, чем у бетона ($0,1 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Данное обстоятельство сужает область применения композитной арматуры до конструкций эксплуатируемых в стабильных темпера-

турных условиях, что является практически нереальным (даже внутри отапливаемых помещений всегда имеются сезонные температурные колебания, а процесс строительства может охватывать весь годовой цикл температур).

Производители композитной арматуры среди её преимуществ в сравнении со стальной отмечают следующие:

- Высокая коррозионная стойкость;
- Низкий удельный вес;
- Низкая теплопроводность;
- Неограниченная длина стержней;
- Отсутствие сварочных работ;
- Долговечность.

Данные «преимущества» являются не более чем маркетинговым ходом продавцов композитной арматуры с целью повышения объёмов продаж.

Рассмотрим детально каждое из этих преимуществ.

Высокая коррозионная стойкость.

При воздействии на железобетонную конструкцию некоторых агрессивных сред бетон сам способен защитить стальную арматуру от данных агрессивных сред. Но даже в случаях применения композитной арматуры, всё равно необходимо применять специальный химически стойкий бетон достаточной плотности и водонепроницаемости во избежание его коррозии, а иногда применяя вторичную защиту с покрытием или облицовкой бетонных поверхностей химически стойкими материалами.

Низкий удельный вес.

Производители композитной арматуры в качестве преимущества заявляют о значительно более низком её удельном весе по сравнению со стальной. Содержание арматуры в железобетоне, в основном, исчисляется десятками долями процентов, поэтому удельный вес арматуры не имеет большого значения, в связи с чем удельный вес бетона принимается равным 2400 кг/м.куб (суммарный вес бетона и стальной арматуры учитывается только в густоармированных конструкциях в содержании арматуры свыше 3%, что довольно редко встречается). Таким образом, влияние удельного веса арматуры на вес всей конструкции ничтожно и, при сборе нагрузок, не учитывается.

Низкая теплопроводность.

При внешнем нагреве (или охлаждении) тепло передаётся через всю поверхность конструкции, поэтому, учитывая незначительное содержание арматуры в бетоне, её повышенная (по сравнению с бетоном) теплопроводность не учитывается, то есть сопротивление теплопередаче не зависит от наличия или отсутствия арматуры в конструкции. При необходимости, в конструкциях применяются дополнительные теплоизолирующие слои на основании теплотехнических расчётов.

Неограниченная длина стержней.

Судя по предложениям производителей, длина стержней обычно ограничена и составляет 6 - 12 м при

диаметре стержней свыше 10 мм, которые в бобины уже не скрутить. Но этот фактор не сильно важен в строительстве, так как длинные стержни не удобно кантовать, да и потребность в стержнях длиной более 12 м (стандарт для стальной арматуры) в подавляющем большинстве случаев отсутствует.

Отсутствие сварочных работ.

Это минус. В отдельных случаях невозможно соединить отдельные стержни без сварки, что в условиях насыщенности арматурой элемента бывает крайне необходимо. Кроме этого, нет возможности выполнить закладную деталь или нарастить выпуски.

В рекламных и технических материалах производителей ничего не говорится о возможностях и методах загиба композитных стержней, что необходимо при армировании большинства конструкций. Производители рекомендуют в таких случаях использовать стальную арматуру, что может вызвать технические и организационные сложности. Нет конструктивных требований по загибам, минимальным радиусам, радиусам для нормальной анкеровки арматуры балки при заведении её в колонну или в капитель и пр.

Долговечность.

Производители утверждают, что долговечность композитной арматуры составляет не менее 80 лет. Опыт эксплуатации железобетонных конструкций доказал, что со временем стальная арматура не меняет своих свойств, а по композитной арматуре долговечность только прогнозируется, так как фактические данные, основанные на результатах соответствующих испытаний, отсутствуют.

Общеизвестно, что формулы для расчёта железобетона выведены эмпирическим путём (к эмпирическим методам познания относятся наблюдение, описание, измерение и эксперимент), то есть, вначале изготавливают серию образцов, испытывают, а затем выводят расчётные формулы таким образом, чтобы они описывали работу конструкции наиболее близко к реальной. И так с огромным количеством марок сталей, классов и видов бетонов. При получении натуральных данных о каких либо деформациях или разрушениях в процессе эксплуатации построенных конструкций, имеющиеся формулы изменяли, уточняли или применяли другие расчётные модели.

Таким образом, для композитной арматуры необходимо провести всё те же исследования, что и для железобетона которые проводились в СССР в течение 70 лет и проводятся уже в России по сей день. Сейчас практически ничего не сохранилось, поэтому некоторые недобросовестные производители и пытаются всячески ввести в заблуждение потребителей вместо выведения формул на основе испытаний и написания норм для этого материала.

Следует отметить, что на сегодняшний день единственным техническим документом, позволяющим относительно корректно выполнить расчёты композитобетонных конструкций является «Рекомендации по

расчёту конструкций со стеклопластиковой арматурой» [13], на который, кстати, ссылаются все производители композитной арматуры. Однако, область применения данных «Рекомендаций...» ограничена условиями, указанными в «Предисловии» и в «Общих положениях» данных рекомендаций, которые приведены ниже.

Данные рекомендации разработаны для круглой стеклопластиковой арматуры периодического профиля **диаметром до 6 мм** и распространяются на проектирование **опытных конструкций** из бетонов со **стеклопластиковой** арматурой.

Принимая во внимание небольшой опыт применения стеклопластиковой арматуры, **каждый** тип стеклопластбетонных конструкций должен подвергаться испытаниям с целью определения несущей способности и пригодности к нормальной эксплуатации.

Массовое применение стеклопластбетонных конструкций может быть рекомендовано **только** после их апробации в реальных эксплуатационных условиях на объектах экспериментального строительства и разработки соответствующих норм.

Стеклопластиковая арматура обладает высокой химической стойкостью, однако прочность такой арматуры **снижается** при длительном воздействии некоторых агрессивных сред. Синтетическое связующее, объединяющее пучок непрерывных стеклянных волокон в единое целое только лишь **ослабляет** воздействие на стекловолокно внешней среды, в том числе щелочной среды бетона.

Учитывая высокую стоимость стеклопластиковой арматуры (по сравнению со стальной), применение стеклопластбетонных конструкций **должно в каждом конкретном случае** технически и экономически обосновываться.

Вследствие низкого модуля упругости их применяют в качестве арматуры с предварительным напряжением. Применение стеклопластиковой арматуры для ненапряжённых каркасов, сеток и хомутов в большинстве случаев нецелесообразно и их использование **должно быть специально обосновано**.

К трещиностойкости стеклопластбетонных конструкций должны предъявляться требования 1-й категории (без трещин). Применение конструкций с трещинами требует специального обоснования.

Величины напряжений в стеклопластиковой арматуре не должны превышать расчётные сопротивления, определяемые для всех фаз изготовления и работы стеклопластбетонных конструкций.

Заключение.

1. Внедрению неметаллической композитной арматуры в строительную практику должны предшествовать дополнительные исследования, результатом которых должно явиться принятие соответствующих нормативных документов (СНиПов, СП и т.п.), а также соответствующих пособий и рекомендаций по проектированию. На сегодняшний день нормативная база по проектированию композитбетонных конструкций отсутствует

ет.

2. Анализ имеющихся данных показал, что прочностные свойства композитной арматуры существенно уступают традиционно применяемой стальной. Расчётные сопротивления стело- и базальтопластиковой арматуры более чем в 2 раза ниже чем у стальной, а по деформационным характеристикам - в 4 раза.

3. Низкая огнестойкость конструкций армированных композитной арматурой ограничивает её применение в большинстве несущих и ограждающих конструкциях зданий и сооружений.

4. Значительно отличный (в шесть раз) по сравнению с бетоном коэффициент линейного температурного расширения композитной арматуры ограничивает применение композитобетона в условиях переменных температур, в том числе, конструкций, эксплуатирующихся на открытом воздухе, в неотапливаемых помещениях и в горячих цехах.

5. Для расширения области применения композитной арматуры в строительстве необходимо выполнить следующие мероприятия:

- разработать соответствующие стандарты (СНиПы, СП, пособия, рекомендации и т.п.), регламентирующие правила расчёта и конструирования композитобетонных конструкций;
- разработать типовые решения, обеспечивающие требуемый уровень огнестойкости композитобетонных конструкций;
- стандартизировать гнутые изделия, разработать правила их изготовления и приёмки;
- исследовать поведение композитобетонных конструкций в условиях переменных температур, а также при действии динамических, вибрационных и импульсных воздействий;
- выполнить исследования напряжённо - деформируемого состояния элементов, армированных композитной арматурой, в том числе, работающих на сжатие и изгиб.

6. До реализации данных мероприятий возможность применения композитной арматуры в конструкциях должна быть ограничена её использованием (при соответствующем технико-экономическом обосновании) в качестве конструктивной и распределительной.

Литература.

1. Андреевская Г.Д. Высокопрочные ориентированные стеклопластики. М., 1966.
2. Ахвердов И.Н. Круглая стеклопластиковая арматура для армобетонных напорных труб. Бетон и железобетон, 1965, №9.
3. Буров А.К., Андреевская Г.Д. Синтетические волокнистые анизотропные структуры. М., 1952.
4. Вильдавский Ю.М. Исследование физико-механических свойств стеклопластиковой арматуры железобетонных конструкций. М., 1972.
5. Жаврид С.С. Исследование противокоррозионной стойкости стеклопластиковой арматуры для бетонных

конструкций. Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Минск, 1968.

6. Жаврид С.С., Башлаков П.Е. Применение стеклопластиковой арматуры в бетонных конструкциях при воздействии кислых агрессивных сред и солей. Строительство и архитектура Белоруссии, 1972, №1.

7. Лешкевич О.Н. Перспективы применения композитной арматуры. Материалы третьего международного симпозиума. Минск, 2011.

8. Фролов Н.П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции. М., 1980.

9. ГОСТ 31384-2008. Защита строительных конструкций от коррозии. 2012.

10. ГОСТ 31938-2012. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия. 2014.

11. ГОСТ Р 52544-2006 Прокат арматурный свариваемый периодического профиля классов А500С и В500С для армирования железобетонных конструкций. 2012.

12. СП 28.13330.2012. Защита строительных конструкций от коррозии. 2012.

13. Рекомендации по расчёту конструкций со стеклопластиковой арматурой. М., 1978.

14. Технические рекомендации по применению неметаллической композитной арматуры периодического профиля в бетонных конструкциях. М., 2012.

15. Проект Свода Правил. Конструкции из бетона с композитной неметаллической арматурой. Правила проектирования.

16. ACI 440.1R-06. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. American Concrete Institute, 2006.

17. ACI 318-08. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute, 2008.

Авторы

Горб Александр Михайлович
Исполнительный директор.

Пушкарёв Сергей Александрович
Ведущий специалист

(Май, 2014)