

## **КОМПОЗИТНАЯ АРМАТУРА КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Федосов С.В., академик РААСН, д.т.н., профессор  
Румянцева В.Е., советник РААСН, д.т.н., доцент  
Коновалова В.С., магистр химической технологии, аспирант  
Караваев И.В., аспирант  
*ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический  
университет»*

Надежное сцепление арматуры с бетоном, препятствующее сдвигу арматуры в бетоне, обеспечивает их совместную работу и определяется геометрическими параметрами профиля арматуры. Прочность сцепления арматуры с бетоном зависит, в основном, от механического зацепления за бетон неровностей на поверхности арматуры.

Металлическая арматура не имеет полного сцепления с бетоном по всей поверхности контакта ввиду образования пустот вокруг стержня при бетонировании. Это отрицательно сказывается на трещиностойкости поверхности. Бетон имеет щелочную среду, поэтому с момента контакта бетона со стержнем стальной арматуры начинаются избирательные процессы коррозии арматуры [1, 2]. Коррозия стальной арматуры является одним из главных факторов, влияющих на прочность железобетонных конструкций, и в целом на их несущую способность. Сегодня, несмотря на высокую степень коррозии стальной арматуры, примерно в 98% строительных конструкций из бетона используется металлическая арматура для армирования. Однако в настоящее время проводятся исследования в направлении поиска альтернативы стальной арматуре из высокопрочных композитных материалов, например, стекловолокна, углеродных, базальтовых или арамидных волокон.

В прошлом десятилетии были проведены различные теоретические и практические исследования по замещению стальной арматуры на композитную арматуру из пластиковых волокон, поскольку этот материал не подвергается коррозии, и его применение было бы экономически выгодно в течение всего срока службы сооружения. Рисунок 1 показывает, что форма стеклопластиковой арматуры, такая же как у катанного стального профиля, является более дорогостоящей, чем традиционные стальные секции. С другой стороны, при использовании композитной арматуры не возникало бы причин для восстановительных и ремонтных работ, являющихся причиной

коррозии, поскольку такая арматура не подвергается коррозии в тех условиях, в которых может находиться конструкция. Более того, композитная арматура очень легкая, так как плотность волокон составляет  $2,5 \text{ г/см}^3$ ; плотность стали – примерно  $7,8 \text{ г/см}^3$ , таким образом, композитная арматура в три раза легче, чем стальная.

Неметаллическая арматура выпускается в виде стержней со спиральным рельефом из стеклянных или базальтовых волокон, пропитанных химически стойким полимером. Рифленая поверхность арматуры создается посредством спиральной обмотки стержня жгутом в процессе его формирования или нанесением покрытия из песка. Арматура, изготовленная из стекловолокна, называется стеклопластиковой (АСП).

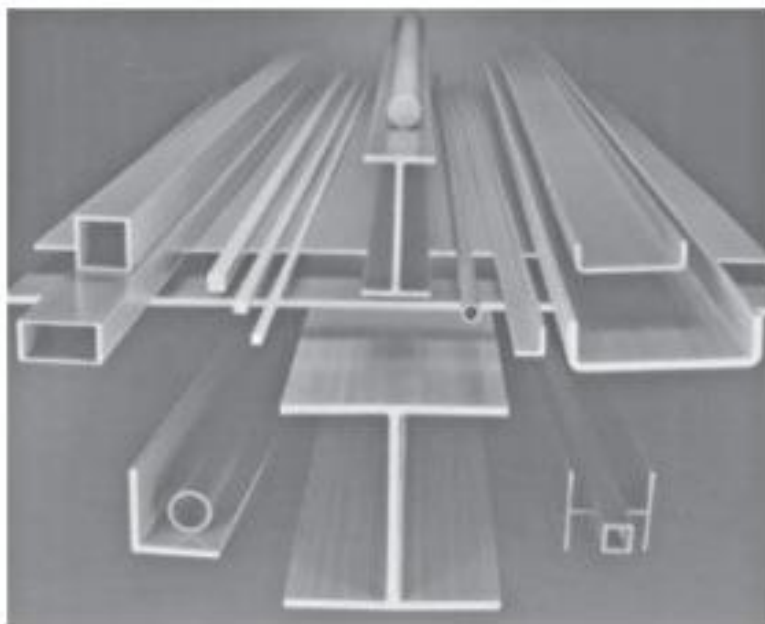


Рисунок 1. Секции конструкции из стеклопластиковой арматуры.

Композитная арматура экологична, не выделяет вредных и токсичных веществ. Она является нержавеющей материалом первой группы химической стойкости, тогда как стальная арматура корродирует с выделением продуктов коррозии в виде ржавчины [3].

Прочность на разрыв у композитной арматуры в 3 раза выше прочности стальной арматуры класса А-III.

В таблице 1 представлены некоторые физико-механические свойства композитной и стальной арматуры.

Таблица 1

Сравнительные характеристики композитной и стальной арматуры

Показатель	Единица измерения	АСП	Стальная арматура класса А-III ГОСТ 5781-82 [4]
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	1900	7700 – 7900
Модуль упругости	МПа	45000	200000
Временное сопротивление при растяжении	МПа	600 – 1200 (с увеличением диаметра уменьшается)	360
Теплопроводность	Вт/(м*К)	Нетеплопроводна (0,48)	47 – 52
Электропроводность	См/м	Неэлектропроводна - диэлектрик	7 690 000
Относительное удлинение	%	2,2	Не менее 14
Коэффициент линейного расширения	$\alpha \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	9 – 12	13 – 15

Вокруг применения композитной арматуры разгорается немало споров, в которых оппонирующие стороны приводят убедительные доводы “за” и “против” ее использования, а также описывают положительные и отрицательные качества композитной арматуры. В связи с этим необходимо предоставить разъяснения путем сравнения основных характеристик стальной и композитной (стеклопластиковой, базальтопластиковой, углепластиковой) арматуры:

- *Расчетное сопротивление разрыву стеклопластиковой арматуры превышает расчетное сопротивление разрыва стальной арматуры класса А III в 3 раза [3].*

Логично сравнивать предел текучести стальной арматуры и предел прочности на разрыв композитной, поскольку композитная арматура не имеет предела текучести, а стальная – имеет. При этом необходимо учитывать коэффициенты запаса, значений которых в нормативной литературе не представлено. Этот вопрос еще предстоит решить.

- *Расчетное сопротивление сжатию [5].*

Возможность использования композитной арматуры в сжатых элементах не описана в имеющихся научных исследованиях, расчетное сопротивление сжатию не указано. Однако не представляет особого труда вывести закономерности и факторы, влияющие на прочность композитной арматуры в ходе испытаний и статистической обработки данных.

- *Работа при кратковременном приложении нагрузки, длительном, при периодическом приложении, динамическом [5].*

В литературе не представлено испытаний и описаний для композитной арматуры под нагрузкой разных видов, нет показателей усталости, нет данных о подверженности деформации при разных нагрузках.

- *Эмпиричность законов железобетона [6].*

Все формулы для расчета железобетона выведены эмпирическим путем, т.е. заливают конкретный элемент, испытывают до разрушения, а затем выводят расчетные формулы, таким образом, что бы они описывали работу данного элемента наиболее близко к фактическим замерам в процессе опыта. И так с огромным количеством конструкций, марок сталей, марок бетона. При получении сведений о деформациях или разрушениях конструкций в процессе эксплуатации формулы модернизировали.

Следовательно, для композитной арматуры необходимо провести все те же исследования, которые проводили в СССР в течение 70 лет со стальной арматурой. Тогда была значительная испытательная база для выведения формул на основе испытаний и написания норм для этого материала.

- *Композитная арматура не имеет площадки текучести, наблюдается прямая линия упруго-линейной зависимости до разрушения.*

Т.е. при достижении определенной нагрузки она не приобретает свойство сильного удлинения как стальная, а просто ломается. Это серьезный недостаток пластика, который производители описывают как положительный момент, являющийся на самом деле сильно отрицательным. Пластичность стали определяется ее относительным

удлинением при разрыве в процентах. Она способствует возникновению пластических шарниров в статически неопределимых конструкциях, учет которых ведет к экономии и упрощению армирования. [7].

Перераспределение усилий в статически неопределимых конструкциях из-за образования пластических шарниров стали учитывать не так уж давно. До этого расчеты производили без учета пластики, что делало расчеты проще и создавало инженерам меньше проблем. Отсутствие пластики в композитной арматуре нельзя назвать ни плюсом, ни минусом. Это одно из свойств материала, которое нужно учитывать и использовать.

- *Модуль упругости.*

У стеклопластика (~ 43000 МПа) в 3 – 4 раза меньше стали (200000 МПа), так что без предварительного напряжения композитная арматура в плите, установленная из условия прочности на растяжение, не успевает включиться в работу (пока арматура натянется для восприятия нагрузки, плита прогнется и бетон с нее уже, условно говоря, обсыплется). Применение композитной арматуры только из условия упругости требует увеличения сечения композитной арматуры относительно стальной как минимум в 3 – 4 раза. Однако нельзя однозначно сказать, что это окажет необходимое действие, нужна программа натурных испытаний.

С другой стороны, у бетона В25 начальный модуль упругости 20000 – 30000 МПа, т.е. меньше, чем у стеклопластика. Значит применение композитной арматуры вполне возможно, просто следует учитывать особенности. А арматура из углеволокна, например, имеет прочность 2,5 – 3,5 ГПа и модуль упругости 200 – 450 ГПа (т.е. прочность в 10 раз выше стали, а модуль упругости даже выше, чем у стали).

- *Композитная арматура обладает высокой коррозионной стойкостью к воздействию агрессивных сред (кислоты, щелочи, соли, сернистые газы, аммиачная вода и т.д.).*

Это положительное качество, но бетон вполне способен защитить арматуру от воздействия агрессивных сред. Но вне зависимости от вида используемой арматуры, требуется применять бетон достаточной плотности, т.е. химически стойкий, чтобы он сам не разрушался от действия агрессивной среды.

- *Удельный вес композитной арматуры в 4 раза меньше, чем у стальной (снижение нагрузки на фундамент).*

Тяжелый (конструктивный) бетон имеет плотность примерно  $2400\text{кг/м}^3$ , железобетон –  $2500\text{кг/м}^3$ . Разница 4%, что достаточно мало для строительных железобетонных конструкций.

Но если рассматривать вес арматуры не в составе конструкции, а в качестве строительного материала, доставка которого стоит иногда немалых денег. В отдаленные регионы завоз тонны груза стоит зачастую в разы больше, чем сам груз. В данном случае разница в весе в 4 раза будет значительной.

- *Коэффициенты теплового расширения композитной арматуры и бетона практически совпадают (что снижает трещинообразование в конструкциях).*

Тепловое расширение железобетонных конструкций принимается по характеристике бетона и борьба с данными напряжениями ведется путем рассечения зданий на температурно-усадочные блоки. Стальная арматура позволяет увеличивать величину этих блоков, т.к. сдерживает расширение бетона. А поскольку композитная арматура расширяется так же, как бетон, то сдерживать общее расширение конструкции не сможет. Величину температурно-усадочного блока не получится увеличить путем дополнительного армирования композитной арматурой.

- *Теплопроводность пластиковая арматура в 100 раз меньше, чем у стали (отсутствие «мостиков холода» в конструкциях).*

Мостики холода идут по бетону, т.к. это камень. А тип уложенной внутри бетона арматуры не имеет особого значения.

- *Пластиковая арматура не теряет свойства при низких температурах. Температура эксплуатации от  $-70\text{C}$  до  $+100\text{C}$ .*

При отрицательных температурах прочность стали возрастает, ударная вязкость падает и сталь становится более хрупкой. В соответствии с действующими нормами проектирования стальных конструкций повышение их надежности против хрупкого разрушения достигается в основном выбором марки стали с гарантией ударной вязкости при пониженной температуре, а также специальными мероприятиями на стадиях конструирования и изготовления. Преимуществ композитной арматуры при отрицательных температурах не установлено.

- *Композитная арматура радиопрозрачна (арматура не создает экранирующего эффекта) [3].*

Перечень строительных материалов, эффективно экранирующих электромагнитные поля широкого диапазона частот, ограничен. Так, исследования показывают, что такие строительные

материалы как кирпич, бетон, шлакоблоки и другие в той или иной степени ослабляют электромагнитную энергию. Поэтому влияние композитной арматуры не имеет особого значения.

- *Композитная арматура является диэлектриком.*

Это может быть полезным в помещениях, где требуется экранирование от распространения электромагнитных волн, чтобы установленные высокочувствительные приборы не давали сбой.

- *Длина композитного арматурного стержня не ограничена (оборудование позволяет обеспечить любую мерную длину по требованиям проекта).*

Судя по предложениям производителей, длина обычно ограничивается 6, 12 м для пластика толще 12 мм, который в бобины скрутить не представляется возможным. Но этот фактор не сильно важен в строительстве, т.к. длинные стержни неудобно кантовать, да и нет особой надобности в длине стержня более 12 м (стандарт для стальной арматуры).

- *При укладке композитной арматуры отсутствуют сварочные работы.*

Затруднительно соединить пруты пластиковой арматуры без перехлеста или какой-нибудь муфты, что в условиях насыщенности арматурой элемента бывает крайне необходимо. Также отсутствует возможность выполнить закладную деталь, нарастить арматурные выпуски.

- *Загибы арматуры на опорах и хомутах [5].*

Так же ничего не говорится о возможности и методах загиба стержней из композитных материалов (скорость, спецустройства, потребность в энергии, потеря прочностных характеристик при загибе), что необходимо при армировании большинства конструкций. Нет конструктивных требований по загибам, минимальным радиусам, радиусам для нормальной анкеровки верхней арматуры балки при заведении ее в крайнюю колонну и пр. Предполагается, что композитная арматура при изгибе возвращается в исходное прямолинейное положение и гнутые элементы выполняются только на заводе под заказ.

- *Трещиностойкость [8].*

Стеклопластик имеет значительно более низкий модуль упругости, что приводит к повышенному трещинообразованию при выполнении требований по прочности на растяжение (низкая трещиностойкость).

- *Прогнозируемая долговечность пластиковой арматуры не менее 80 лет.*

Стальная арматура со временем не меняет своих свойств, а по пластиковой арматуре долговечность только прогнозируется, поскольку фактических данных об этом нет.

- *Огнестойкость конструкций [9].*

С учетом высоких требований по огнестойкости конструкций в РФ, использование пластиковой арматуры в несущих конструкциях практически не возможно. При интенсивном разогреве рабочей арматуры до 100°C происходит активное выделение пара из смежных со стержнем микротрещин бетона. При этом мгновенно повышается давление на поверхности арматуры, что приводит к разрушению волокна. Температура плавления пластиковой арматуры порядка 130 – 200°C, тогда как стальная арматура не теряет своих свойств при нагреве до 600°C и после падения температуры.

- *ГОСТы.*

Для композитной арматуры нет ГОСТа или другой нормативной документации, не существует единых требований на уровне государственных или международных стандартов к механическим свойствам, методам контроля и правила приемки композитной арматуры.

Единственным упоминанием в действующих ТНПА являются пп. 6.10 и 8.13 ГОСТ 31384-2008 "Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии" [10]:

– "п. 6.10 В среднеагрессивных и сильноагрессивных средах для армирования конструкций без предварительного напряжения рекомендуется применять неметаллическую композиционную арматуру, за исключением изгибаемых элементов";

– "п. 8.13 В конструкциях, подвергающихся электрокоррозии, допускается заменять стальную арматуру на неметаллическую (базальтопластиковую, стеклопластиковую и др.) при соответствующем обосновании".

- *Анкеровка.*

Длина анкеровки и перехлеста для пластиковой арматуры не определена. Сцепление стали с бетоном обусловлено склеиванием арматуры с бетоном, трением, зацеплением за периодичность профиля, у пластика нет адгезии, нет трения, есть сцепление с профилем, но в неметаллических стержнях АСП и АБП на поверхность стержня просто приклеивается канатик по спирали.



Отмечено, что вес композитной арматуры очень низкий и ее сопротивление намного больше, чем сопротивление стали, поэтому ее сложнее использовать для добавления этажей к существующим зданиям. Сейчас секции из композитной арматуры используются, чтобы заменить обычную стальную сетку, поручни и лестницы в конструкциях морских прибрежных платформ в нефтяной промышленности. Эти стержни усовершенствованы и произведены из композитных материалов и являются альтернативой стальным стержням. Рисунок 2 показывает, что на производстве используется определенный способ, при котором на поверхности образуются выступы, способствующие сцеплению между стержнем и бетоном. В настоящее время производство и использование осуществляются в небольшом масштабе, поскольку они находятся на экспериментальной стадии на рынке. Многие исследования [8, 11] посвящены изучению поведения таких стержней во времени. Как результат ограниченного производства, стоимость композитной арматуры очень высока; с другой стороны, ремонт и восстановление практически не требуются. Более того, значение собственной массы конструкции будет снижаться, что будет уменьшать ее стоимость.

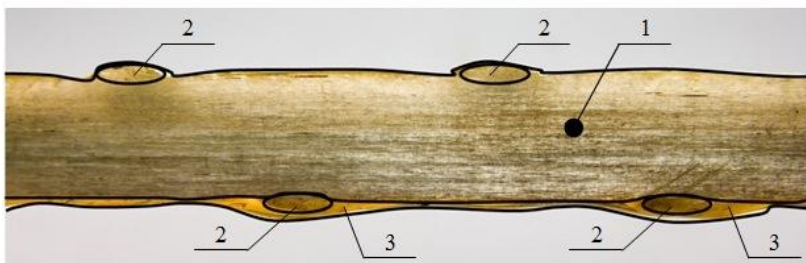


Рисунок 2. Продольный срез АСП:

1 – основное тело, 2 – профиль, 3 – подтеки эпоксидной смолы.

Некоторые сооружения в Канаде, такие как конструкции в портах или пристани, были упрочнены посредством использования стержней из волокон пластика. Эти конструкции состоят из толстых стен сборного железобетона, сконструированного с максимальным пределом прочности  $450 \text{ кг/см}^2$ . Они подвергались изменению температур от  $35$  до  $-35^\circ\text{C}$  [12]. Мосты в Квебеке, Онтарио и Острове Ванкувер в Канаде, для которых используется соль, чтобы растворить лед, были построены с применением такого вида арматуры. Были

проведены тесты на всех этих сооружениях посредством отбора проб; армированный бетон был исследован на рентгеновском аппарате. Конструкции достигали возраста от 5 до 8 лет. Исследования показали [11], что различные факторы, включающие сухие и влажные циклы, не оказывают влияния на композитную арматуру.

Снимки, полученные на электронном микроскопе, показали сильные связи между стержнями, изготовленными из стеклопластика и бетоном. Максимальный предел прочности составил примерно 5975 кг/см<sup>2</sup> и максимальная сила связи – 118 кг/см<sup>2</sup>; модуль упругости был примерно в пять раз меньше, чем модуль упругости стали [8, 12]. Чтобы побороть такие проблемы, которые могут происходить при сползании, рекомендуется, чтобы напряжение при растяжении было не менее 20% от максимального предела прочности на растяжение.

### Список литературы:

1. Алексеев С.Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне. Госстройиздат, 1962. 186 с.
2. Артамонов В.С. Защита железобетона от коррозии. СИ.М., 1967, 128 с.
3. Волчок Д. Что такое композитная арматура? / Журнал "Кирпич" №5 (5), 2012 г. с. 6 - 11.
4. ГОСТ 5781 – 82. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия.
5. Лешкевич О.Н. Перспективы использования композитной арматуры. Материалы 3-го международного симпозиума "Проблемы современного бетона и железобетона", 2011 г., 4 с.
6. Попов Н.Н. Железобетонные и каменные конструкции. М.: Высш. шк., 1996г. — 255с.
7. Линович Л.Е. Расчет и конструирование частей гражданских зданий. Киев, "Будівельник", 1972, стр. 644.
8. Cairns, J.. Design of concrete structures using fusion-bonded epoxy-coated reinforcement. *Proceedings of the Institute of Civil Engineering Structures and Buildings* 4(2), 1992: pp. 93–102.
9. Фролов Н.П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции. - М.: Стройиздат, 1980. 104 с.
10. ГОСТ 31384 – 2008 "Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии".

11. Gustafson, D. P., and T. L. Neff.. Epoxy-coated rebar, handled with care. *Concrete Construction* 39(4), 1994: pp. 356–369.
12. Mohamed El-Reedy. Steel-reinforced concrete structures: assessment and repair of corrosion. Taylor & Francis Group, 2008. 218 p.