

Мазуренко Егор Михайлович,

студент, направление «Строительство», Инженерно-строительный институт;

Вичужанин Алексей Дмитриевич,

*студент, направление «Строительство», Инженерно-строительный институт,
ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,*

г. Санкт-Петербург, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ АРМАТУРЫ И АРМАТУРЫ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. На сегодняшний день железобетон является самым широко используемым материалом в строительстве. Многие производители предлагают снизить себестоимость этого материала за счет замены металлической арматуры на композитную. Однако встает вопрос об эффективности этой замены. В статье проведен сравнительный анализ традиционной металлической и композитной арматуры. На основе анализа отечественных и зарубежных публикаций были определены основные характеристики для сравнения. В ходе исследования этих характеристик выявлены достоинства и недостатки композитной арматуры в сравнении с металлической. Также в статье проведен экономический анализ эффективности замены металлической арматуры на композитную. Итогом исследования является определение перечня конструкций, в которых использование композитной арматуры является эффективным.

Введение

От примитивных пещер и других естественных укрытий, использовавшихся человеком в качестве жилья. Эти места не могут удовлетворить все потребности древних людей. Изменения климата и падение температуры заставляет людей строить свои собственные жилища. Здания становились все более сложными, выше и шире, чем когда-либо прежде. И требовать увеличения жесткости конструкций. Сочетание жесткости и сжатия бетона с натяжением арматуры открыло новую эру строительства. В современное время железобетон является наиболее популярным строительным материалом. Арматура изготавливается из отдельных стержней. Арматурные стержни могут иметь различную форму, чтобы улучшить контакт с бетоном. В середине XX века появилась наука о полимерах, которая связана с физикой и

химией. Исследование свойств полимеров оказывает большое влияние на строительство. Это позволило не только улучшить свойства существующих материалов, но и создать новые, такие как волокнисто-арматурная сталь. Замена старых строительных материалов современными с теми же характеристиками имеет важное значение, так как это приводит к значительной экономии средств. В частности, современные материалы позволяют не только сократить потребления дорогостоящего сырья, таких как сталь, но и облегчить производственный процесс и значительно снизить транспортные и затраты на установку благодаря своему лёгкому весу.

Обзор литературы

Армированное стекловолокно пластика изготовлено из стекла, базальта, углерода или арамидных волокон. Для того, чтобы обеспечить плотные связанные волокна, их пропитывают термореактивной или термопластической полимерными связующими. Шероховатость поверхности арматурного стержня обеспечивается поперечными или спиральными рёбрами. В случае металлической арматуры – ребра ручки на поверхности металлического прутка. В случае композитной арматуры – ребра, скрученные обмоткой стекла, базальта, углерода или арамидных волокон с полимерным покрытием. Обмотки могут быть односторонними или двунаправленными. Кроме того, для лучшей адгезии к конкретному осадению можно использовать песок [1-3].

Для сравнения композитной и металлической арматуры был выполнен обзор литературы. Международные источники обычно содержат комплексный анализ свойств металлической арматуры, основанный не только на экспериментальных данных, но и на многолетнем практическом опыте и наблюдениях за существующими конструкциями [4-6].

В последние десятилетия в США [7; 8], Европе [9; 10], Канаде [11-13], Японии [10] и Китае [10] металлическая арматура широко используется, и, таким образом, существует большое поле исследований материалов.

Первое исследование металлической арматуры было проведено в России в 1960-е годы, и с начала 2000-х годов данная арматура становится все более распространённой в нашей стране. Много российских изданий состоит из конструктивного описания свойств, областей применения и отличных качеств металлической арматуры [14-19].

Среди наиболее важных характеристик авторов FRP включают в себя следующие:

- временной предел прочности при растяжении;
- модуль;
- поведение нагрузки удлинение;
- плотность;
- диапазон температур;
- коррозионная стойкость к агрессивным средам;
- теплопроводность;
- электропроводность;
- магнетизм;
- долговечность;
- адгезия к бетону.

Цели исследования

Целью данного исследования является выработка рекомендаций по использованию армирования из металла. Следующие проблемы должны быть решены для этой цели:

- осуществлять сравнение арматурных характеристик;
- определить типы конструкций, в которых использование определённого вида является предпочтительным;
- определить условия применения;
- осуществлять экономический анализ применения армирования [20].

Сравнительный анализ

Таблица 1 – Виды волоконно-армированного пластика

№	Название	Сокращение	Тип волокна
1	Стекловолокно	GRP	Волокна формируют из сплава неорганического стекла
2	Базальтовое армирование	BRP	Волокна формируют из расплава базальта и габбро диабазы
3	Карбоновое армирование	CRP	Волокна формируют из 90% карбона
4	Арамидное армирование	ARP	Волокна формируют из 85% арамида и бензолных колец
5	Комбинированно-армированный пластик	CFRP	Волокна формируют из смесей или сплавов нужных материалов

Таблица 2 – Сравнительный анализ армирования металлом, стеклопластиком и базальтом

Характеристика	Металл	Стекло	Базальт
Предел прочности, МПа	360	600-1200	700-1300
Модуль эластичности, МПа	200000	45000	60000
Удлинение, %	25	2,2	2,5
Плотность, т/м ³	7,85	1,9	2,0
Диапазон рабочих температур, Цельс.	-60 – +650	-60 – +650	-260 – +982
Магнетизм	Магнитный	Немагнитный	Немагнитный
Долгосрочность	40 лет	80 лет	100 лет
Электропроводность	Проводит	Диэлектрик	Диэлектрик
Расстояния между волокнами, мм	6-80	4-20 (Россия) 4-40 (другие)	4-20 (Россия) 4-40 (другие)

Металлическая арматура имеет значительно более высокий модуль упругости и относительного удлинения, чем композитная арматурных стержней. Малая плотность и значительно более низкая теплопроводность, по сравнению с металлической арматурой, могут быть определены как преимущества волокнистой арматуры. Также GRP и BRP сопротивление щелочной среде бетона удваивает свою жизнь по сравнению со сталью. Кроме того, композитная арматура является немагнитной и диэлектрической, что делает её очень полезной при строительстве таких объектов, как помещения для магнитно-резонансной томографии в больницах, которые используют радиочастотную идентификацию клиентов. Благодаря композиту, арматурные

стержни могут быть изготовлены любой длины и формы, они могут быть эффективно использованы при строительстве сложных архитектурных форм, для которых использование металлической арматуры часто невозможно. В то же время, использование композитной арматуры в предварительно напряженном бетоне связано со значительными трудностями. Для того, чтобы её зафиксировать, требуется дополнительное крепление. Для сравнения технико-экономических характеристик был проведен расчёт композитной арматуры экономической эффективности. Такие характеристики, как вес и стоимость на метр бара были выбраны в качестве основы для расчета. Вес 1 метра металлической арматуры определяется в соответствии с ГОСТ 5781-82. Вес 1 метра композитной арматуры определяется по данным производителей. Стоимость метра арматуры 1 определяется как среднее значение рыночных цен.

Таблица 3 – Сравнение видов волокон по массе

Металлическая		Стекловолокно		Базальтовая	
Тип	Вес 1 метра, кг	Тип	Вес 1 метра, кг	Тип	Вес 1 метра, кг
6А-III	0,222	GRP-4	0,026	BRP-4	0,026
8А-III	0,395	GRP-6	0,040	BRP-6	0,040
10А-III	0,617	GRP-8	0,072	BRP-8	0,072
12А-III	0,888	GRP-8	0,072	BRP-8	0,072
14А-III	1,210	GRP-10	0,110	BRP-10	0,110
16А-III	1,580	GRP-12	0,184	BRP-12	0,184

* NA-III: N - диаметр арматурного стержня, мм; А-III - класс арматуры по ГОСТ 5781-82 * (Предел текучести $\sigma_{т}$ 390 Н / мм²) ** GRP- N, BRP- N: N - диаметр арматуры, мм.

В таблице 3 показано, что GRP (стекловолокно) и BRP (базальтовое волокно) имеют одинаковую массу на метр. В то же время, в зависимости от типа, они 9-12 раз легче стальной арматуры.

Таблица 4 – Сравнение армирования металла и стеклянного армирования

Металл		Стекло		Разница (Δ ,%)
Тип	Цена (Руб/метр)	Тип	Цена (Руб/метр)	
6А-III	7,00	GRP-4	7,00	0
8А-III	12,00	GRP-6	9,50	20,8
10А-III	17,21	GRP-8	14,50	15,7
12А-III	23,89	GRP-8	14,50	39,3

14А-III	32,56	GRP-10	22,00	32,4
16А-III	42,67	GRP-12	30,00	29,7
Среднее				23,0

Таблица 5 – Сравнение армирования металла и базальтового армирования

Металл		Базальт		Разница (Δ,%)
Тип	Цена (Руб/метр)	Тип	Цена (Руб/метр)	
6А-III	7,00	BRP-4	8,91	-27,3
8А-III	12,00	BRP-6	15,12	-26,0
10А-III	17,21	BRP-8	23,31	-35,4
12А-III	23,89	BRP-8	23,31	2,4
14А-III	32,56	BRP-10	35,91	-10,3
16А-III	42,67	BRP-12	47,88	-12,2
Среднее				-18,1

Таблица 6 – Сравнение стеклянного и базальтового армирования

Стекло		Базальт		Разница (Δ,%)
Тип	Цена (Руб/метр)	Тип	Цена (Руб/метр)	
GRP-4	7,00	BRP-4	8,91	1,3
GRP-6	9,50	BRP-6	15,12	1,6
GRP-8	14,50	BRP-8	23,31	1,6
GRP-8	14,50	BRP-8	23,31	1,6
GRP-10	22,00	BRP-10	35,91	1,6
GRP-12	30,00	BRP-12	47,88	1,6
Среднее				1,55

На основе анализа расчётных данных таблиц 4-6 приходим к выводу, что 1 м стекловолокна в среднем дешевле, чем металлической арматуры на 23%, в то время как армирование базальтом является дороже, чем металлической арматуры на 18,1%. Также стекловолокно дешевле, чем базальтовое армирование в 1,55 раза. Более высокие затраты, определяемые большей долговечностью при армировании базальтом (20 лет дольше, чем стекловолокно) и большой диапазон рабочих температур.

Выводы

Преимущества и недостатки композитного армирования.

Исследования показали следующие преимущества композита:

- высокая жёсткость;
- низкий удельный вес;

- низкая теплопроводность;
- высокая коррозионная стойкость в агрессивной среде;
- шире металлической арматуры диапазон рабочих температур;
- возможность изготовления слитков любой длины и формы по запросу;
- долговечность в 2-3 раза выше, чем для металлической арматуры;
- низкая стоимость по сравнению с металлической арматурой;
- возможность включать оптические датчики в армирующие волокна, что

позволяет осуществлять дистанционный контроль структур.

Недостатки:

- низкий модуль упругости по сравнению с металлической арматурой;
- отсутствие возможности структурных складок во время армирования работ. Тем не менее, это компенсируется способностью принимать изгиб волокна арматуры непосредственно в процессе производственного процесса в соответствии с конкретным проектом;
- неудобно использовать в предварительно напряженном бетоне;
- высокая стоимость по сравнению с металлической арматурой.

Рекомендации по применению композитных материалов

В результате проведенных исследований использование композитов можно рекомендовать:

- для армирования бетонных конструкций и смешанного армирования бетона;
- в железобетонных конструкциях, пострадавших от агрессивной среды, агрессивных для стальной арматуры (хлористых солей, высокой концентрацией агрессивных газов и т.д.);
- в элементах дорожного строительства, которые подвергаются воздействию агрессивных противогололёдных средств;
- при ремонте железобетонных конструкций, повреждённых воздействием агрессивных сред;

- в случаях, когда не имеем возможности обеспечить нормативные требования к толщине защитного слоя (тонкостенных конструкций различного назначения, таких как панели структур защиты от шума, заборов, архитектурное проектирование и для других целей);

- для армирования кирпичной кладки, особенно в зимнее время, когда ускорители отверждения и антифризы добавляют в ступке (хлориды, которые вызывают коррозию стальной арматуры);

- при проектировании мостов, так как они наиболее восприимчивы к коррозии (поддержка необходима из-за постоянного контакта с водой, а верхняя часть плиты – из-за применения антиобледенительных агентов);

- для магнитно-резонансной томографии в больницах;

- в строительных конструкциях сложной формы, где трудно использовать подкрепление металла;

- в конструкциях, требующих их внутреннего мониторинга состояния.

В общем случае для строительных конструкций рекомендуется использовать металлическую арматуру. В связи с тем, что она имеет более высокий модуль упругости и эластичности, то, что в экстренном случае обеспечивает более длительный период обрушения конструкций. А это, в свою очередь, позволяет людям безопасно покинуть опасную зону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ACI Committee 440. State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. American Concrete Institute. Detroit, Michigan, 1996. – 68p.*

2. *Crawford J.E., Malvar L.J. Morrill K.B., Ferritto J.M. Composite Retrofits to Increase the Blast Resistance of Reinforced Concrete Buildings. P-01-13. Tenth International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, May 2001. – Pp. 22.*

3. *Бескорвайная О.Н., Бычков Д.С., Гаевская З.А. Быстромонтируемые здания из легкого наномодифицированного бетона // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 1(16). – С. 61-71.*

4. *Renstrom R. FRP to replace grated steel on Calif bridge. Plastics News. 1997. Vol. 9. Issue 22. P. 6.*

5. Чернявский В.Л., Хаяутин Ю.Г., Аксельрод Е.З., Клецов В.А., Фаткуллин Н.В. *Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами.* – М.: ИнтерАква, 2006. – 113 с.
6. Ключев С.В., Ключев А.В., Лесовик Р.В. *Усиление строительных конструкций композитами на основе углеволокна: монография.* – Ламберт, 2011. – 123 с.
7. Ali-Ahmad M. *Debonding of FRP from concrete in strengthening applications: experimental investigation and theoretical validation. Ph.D. dissertation. City University of New York. USA.* – 2004. – 354 p.
8. Borwankar A.D. *Experimental and analytical investigation of bond-slip relationship between fiber-reinforced polymer (FPR) bars and concrete. M. Sc. dissertation. University of Missouri - Kansas City. USA.* – 2004. – 182 p.
9. Choi M. *Primary anchorage zones for FRP-prestressed concrete structures. Ph.D. dissertation. University of Bath. United Kingdom.* – 2004. – 230 p.
10. *FRP Composites in Civil Engineering - CICE 2004: Proceedings of the 2nd International Conference on FRP Composites in Civil Engineering – CICE 2004, 8-10 December 2004, Adelaide, Australia, 1004 p.*
11. Guevara Ramirez P.A. *Pilot study of FRP-to-tubular steel behavior. M.A.Sc. dissertation. University of Toronto. Canada.* – 2005. – 19 p.
12. Mota C.P. *Flexural and shear behavior of FRP-RC members. M. Sc. dissertation. University of Toronto. Canada.* – 2005. – 23 p.
13. Vogel H.M. *Thermal compatibility and bond strength of FRP reinforcement in prestressed concrete applications. Journal of Composites for Construction, Vol. 11, No. 5, September/October 2007, pp. 459-468.*
14. Renstrom R. *FRP companies search for new research funds. Plastics News. 1999. Vol. 11. Issue 1. – P. 9.*
15. Теплова Ж.С., Киски С.С., Немова Д.В., Соколов А.В. *Проектирование и строительство элементов здания с использованием стеклопластиковых арматурных стержней ООО «СК» // Строительство уникальных зданий и сооружений.* – 2014. – № 4 (19). – С. 62-74.
16. Пономарев А.Н., Моспан Е.А. *Анализ направлений использования нанокompозитной арматуры «Астрофлекс» в промышленном и транспортном строительстве // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.* – 2011. – № 3. – С. 69-74.
17. Белоглазов А.П., Пономарев А.Н. *Composite armature «Astroflex». Справочник // Инженерный журнал с приложением.* – 2009. – № 12. – С. 8-9.

18. Бенин А.В., Семенов С.Г. Экспериментальные исследования сцепления композитной арматуры с плоской навивкой с бетоном. *Промышленное и гражданское строительство*. – 2013. – № 9. – С 74-76.

19. Бенин А.В., Семенов А.С., Семенов С.Г. , Мельников Б.Е. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 1. Модели с учетом несплошности соединения // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2013. – №.5(40). – С. 86–99.

20. ГОСТ 31938-2012. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ. – 2014. – 40 с.