

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ ПРИ УСИЛЕНИИ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А. А. ХОТЬКО¹, И. В. ДАНИЛЕНКО²

¹ к.т.н., доцент, доцент кафедры «Строительные конструкции имени доктора технических наук, профессора Т. М. Пецоляда»

² старший преподаватель кафедры «Строительные конструкции имени доктора технических наук, профессора Т. М. Пецоляда»

Белорусский национальный технический университет г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье описаны сложности освоения композитной арматуры в Республике Беларусь, представлены приоритетные области ее применения, предложен метод усиления изгибаемых железобетонных плит перекрытия добавлением композитной арматуры. Представлены результаты численного эксперимента, который показывает эффективность применения стеклопластиковой арматуры при усилении многопустотных железобетонных плит.

Ключевые слова: композитная арматура, стеклопластиковая арматура, усиление железобетонных конструкций, комбинированное армирование, многопустотные железобетонные плиты, несущая способность, трещиностойкость.

APPLICATION OF COMPOSITE REINFORCEMENTS WHEN REINFORCING BENDING REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

A. A. KHOTSKO¹, I. V. DANILENKO²

¹PhD in engineering, associate professor, Department

«Building structures named after Doctor of Technical Sciences, Professor T. M. Petzold»

²Senior lecturer, Department

«Building structures named after Doctor of Technical Sciences, Professor T. M. Petzold»

Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article describes the difficulties of mastering composite reinforcement in the Republic of Belarus, presents the priority areas of its application, proposes a method for reinforcing bent reinforced concrete floor slabs by adding composite reinforcement. The results of a numerical experiment are presented, which show the effectiveness of the use of fiberglass reinforcement in strengthening multi-hollow reinforced concrete slabs.

Keywords: composite reinforcement, fiberglass reinforcement, reinforcement of reinforced concrete structures, combined reinforcement, multi-hollow reinforced concrete slabs, load bearing capacity, crack resistance.

В связи с низким модулем упругости, низкой огнестойкостью и щелочестойкостью композитной арматуры, а также сложностью изготовления из нее каркасов, применение такой арматуры при изготовлении бетонных конструкций неэффективно и весьма ограничено. Многочисленные исследования показали, что это является одной из основных причин отсутствия нормативных документов РБ по проектированию бетонных конструкций, армированных композитной арматурой.

Пожалуй, самым очевидным недостатком стеклопластиковой арматуры, не позволяющим массово использовать ее при армировании бетонных конструкций, является низкий модуль упругости. По этой причине изгибаемые элементы с такой арматурой без ее предварительного напряжения имеют низкую жесткость и трещиностойкость. Решить данную проблему можно было бы путем создания предварительного напряжения арматуры. Однако, в связи со спецификой структуры такой арматуры, сделать это достаточно сложно. Стандартные анкеры, с использованием которых производится натяжение арматуры, оказывают, кроме всех прочих, поперечное усилие на арматурный стержень, которое разрушает структуру полимерного связующего, превращая стержень в пучок отдельных стеклянных нитей. Именно с этим и связаны сложности при испытании композитной арматуры, особенно больших диаметров, на растяжение.

Наличие описанных недостатков композитной арматуры вовсе не определяет невозможность или неэффективность ее использования в строительстве. А известные преимущества композитной арматуры по сравнению со стальной арматурой (высокая прочность, легкость, низкая теплопроводность, немагнитность), предопределяют те области, в которых использование композитной арматуры может стать рациональным и эффективным. Эти области определены, известны и описаны во многих научных статьях, а также нормативных документах:

- при строительстве сооружений дорожно-транспортной инфраструктуры;
- при строительстве зданий и сооружений химических производств;
- при строительстве сооружений, которые эксплуатируются в условиях высоких электромагнитных полей;
- при реконструкции зданий и сооружений, в частности при усилении конструкций;
- для армирования фундаментов, ограждающих конструкций, трубопроводов, опор линий электропередач, емкостных сооружений и других конструкций, эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивных сред.

В агрессивной среде сложно защитить стальную арматуру от коррозии и минимизировать теплопотери. Поэтому применение композитной арматуры открывает большие возможности ее использования в сооружениях, которые эксплуатируются в агрессивных средах, а также в фундаментах, в малоэтажном строительстве, при использовании в виде связей в различных конструкциях.

Не смотря на наличие большого объема исследований свойств композитной арматурой и конструкций из нее, проводимых учеными РУП «Институт жилища НИПТИС им. Атаева С. С.» (под руководством Пецольда Т. М.), БрГТУ г. Брест (под руководством Тура В. В.), ГрГУ г. Гродно (под руководством Волик А. Р.), УО «ПГУ» г. Новополоцк (под руководством Лазовского Д. Н.), БНТУ (под руководством Хотько А. А.), до настоящего момента отсутствует утвержденный нормативный документ, позволяющий проектировать конструкции с такой арматурой. Исключение составляет утвержденные Рекомендации по проектированию, изготовлению и устройству несущих и ограждающих конструкций мостовых сооружений, армированных композитной арматурой: ДМД 33200.2.083-2017: [утверждено Белорусским дорожным научно-исследовательским институтом 02.03.17: срок действия с 01.06.17 до 01.06.22].

На отсутствие стандартов на проектирование строительных конструкций с использованием композитной арматуры обратили внимание специалисты Инспекции Госстандарта, встревоженные результатами надзорных мероприятий, проведенных в 2017 году.

Тем не менее европейские, японские, канадские и американские ученые, а также коллеги из РФ значительно преуспели в этом направлении, разработав следующие нормативные документы:

- CAN/CSA-S806-02 A National Standard of Canada (approved May 2004) Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers (Канада);
- ACI 440.1R-06. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars (США);
- ACI 440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (США);
- FRP reinforcement in RC structures. Technical report prepared by a working party of Task Group 9.3 (EC);
- FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures (EC);
- Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. CNR – Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction (EC);
- СП 295.1325800.2017 «Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования» (РФ).

Таким образом, нормативные документы других стран, в том числе и РФ, позволяют использовать композитную арматуру не только при изготовлении новых конструкций, но и усилении существующих.

Одним из недостатков, препятствующих эффективному применению композитной арматуры является зачастую ее невысокое качество, характеризующееся большим разбросом физико-механических характеристик, наличие большого объема кустарного ее производства. Это в свою очередь отражается на методике расчета важнейших механических характеристик.

Согласно методике СП 295.1325800.2017 расчетное сопротивление композитной арматуры определяется по формуле:

$$R_f = \frac{\gamma_{f1} \cdot R_{fn}}{\gamma_f} \quad (1)$$

где: γ_f – коэффициент надежности по композитному материалу, принимаемый при расчете по предельным состояниям второй группы равным 1,0, а при расчете по предельным состояниям первой группы в зависимости от значения коэффициента вариации равным 1,2 при коэффициенте вариации не выше 0,1, и равным 1,5 при коэффициенте вариации, находящемся в диапазоне от 0,1 до 0,15.

γ_{f1} – коэффициент, учитывающий условия эксплуатации конструкции;

Для стеклопластиковой арматуры значение коэффициента γ_{f1} при эксплуатации конструкций на открытом воздухе и в грунте составляет 0,7, а при эксплуатации конструкций во внутренних помещениях – 0,8, соответственно.

Как показали результаты исследований, при имеющемся уровне производства, значения коэффициента вариации составляют в основном выше 0,1. Поэтому, при расчете конструкций по несущей способности значение расчетного сопротивления стеклопластиковой арматуры при эксплуатации конструкций на открытом воздухе и в грунте составляют 46,7 % от характеристического предела прочности при растяжении такой арматуры, а при расчете только на действие постоянных и длительных нагрузок – 30 % от характеристического предела прочности при растяжении. Причем, СП 295.1325800.2017 четко регламентирует значение характеристического (нормативного) предела прочности при растяжении стеклопластиковой арматуры, который принимается равным 800МПа. То есть, не смотря на отличительное преимущество стеклопластиковой арматуры, касающееся ее высокой прочности по сравнению со стальной арматурой, расчетное сопротивление такой арматуры согласно СП 295.1325800.2017 близко к расчетному сопротивлению стальной арматуры класса S400. Такие низкие значения расчетных характеристик сводят на «нет» высокие прочностные свойства стеклопластиковой арматуры. Изменить ситуацию может повышение качества производства, разработка и внедрение нормативных документов (стандартов), регламентирующих производство композитной арматуры и определение ее характеристик.

Из всех возможных областей использования композитной арматуры, наиболее перспективным на наш взгляд, является ее использование при усилении железобетонных конструкций. В частности, на наш взгляд, заслуживает внимания усиление железобетонных многопустотных плит методом приклеивания дополнительной композитной арматуры в растянутой зоне пустот через предварительно устроенные прорези.

Возможность использования предварительно напряженной композитной арматуры при усилении железобетонных многопустотных плит изложена в методике, предложенной в работах Д. Н. Лазовского [3].

На рис. 1 показана суть этой методики, которая заключается в фиксации концов стержней усиления обетонированием и дальнейшим их притягиванием к нижней грани пустот плиты с помощью струбцин или натяжных болтов, что и создает преднапряжение. Затем пустота с натянутой арматурой бетонируется.

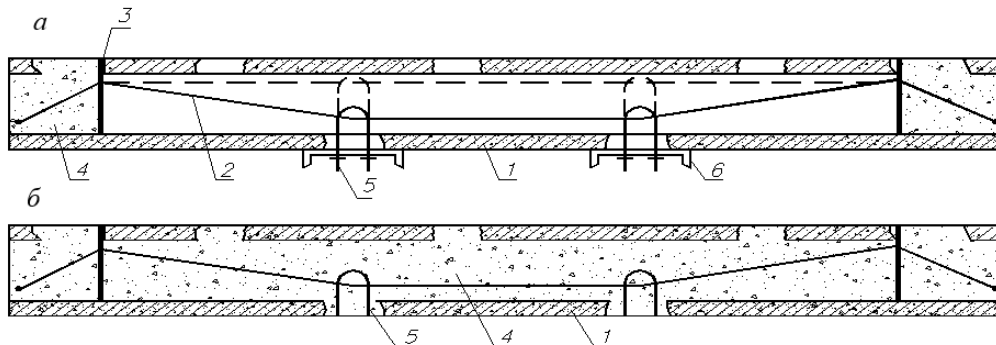


Рисунок 1 – Усиление сборных многопустотных плит предварительно напряженной арматурой:
a – плиты в момент предварительного напряжения арматуры; *б* – усиленная плита; 1 – усиливаемая плита; 2 – дополнительная арматура; 3 – временная ограничительная пластина; 4 – бетона;
 5 – натяжной болт; 6 – опалубка

Такой метод предварительного натяжения арматуры связан с некоторым перегибом стержня. Известно, что стеклопластиковую арматуру невозможно изгибать на значительные углы без ее повреждения. Натяжение арматуры в пустотах плит указанным методом приведет к изгибам стержней на угол, не превышающий $2...3^\circ$ (для плит пролетом 6,0 м). Тем не менее, требуются дополнительные исследования свойств композитной арматуры после механических изгибов на такие углы.

Простейшие расчеты для плит длиной 6000 мм с диаметром пустот 159 мм показывают, что натяжение композитной арматуры указанным способом приведет к относительному удлинению стержней, равному 0,07 %, что будет соответствовать напряжению всего ≈ 40 МПа или 5 % от нормативного предела прочности при растяжении. Поэтому, такой уровень натяжения с учетом потерь незначительно скажется на деформативности и трещиностойкости изгибаемых усиливаемых элементов. Тем не менее, это натяжение важно с точки зрения включения композитной арматуры в работу усиливаемой конструкции.

Следует учитывать, что усиленная конструкция имеет комбинированное армирование. Исследования изгибаемых бетонных элементов с комбинированным армированием стальными и стеклопластиковыми стержнями проводились под руководством профессора Тура В. В. Однако, напряженно-деформированное состояние железобетонных элементов, усиленных композитной арматурой, имеет свои особенности. Напряженно-деформированное состояние изгибаемых бетонных элементов с комбинированным армированием зависит от совместной работы трех компонентов: бетона, стальной арматуры и композитной арматуры. Композитная арматура в усиленных железобетонных элементах включается в работу на этапе, когда бетон и стальная арматура уже находятся в напряженном состоянии. Уровень этого напряжения зависит от того, при какой внешней нагрузке выполнено усиление. Усиление изгибаемых железобетонных элементов рекомендуется выполнять, предварительно, по возможности, разгрузив усиливаемую конструкцию. Не в каждом практическом случае такое возможно. И в момент усиления конструкция будет подвергаться нагрузке от ее собственного веса.

Для оценки напряженно-деформированного состояния железобетонных многпустотных плит, усиленных стеклопластиковой арматурой, устанавливаемой в пустоты конструкций, нами выполнен численный эксперимент с использованием программного комплекса «Beta» (УО «ПГУ»), позволяющий выполнять расчет усиленных железобетонных элементов с учетом предварительного их нагружения (до момента усиления), а также задавать произвольные диаграммы деформирования материалов, что позволяет задать характеристики стеклопластиковой арматуры.

В качестве расчетного образца принята многпустотная железобетонная плита шириной 1200 мм, армированная в растянутой зоне стальной арматурой $7\varnothing 12$ мм S500. Бетон образца принят класса С30/37 (рис. 2).

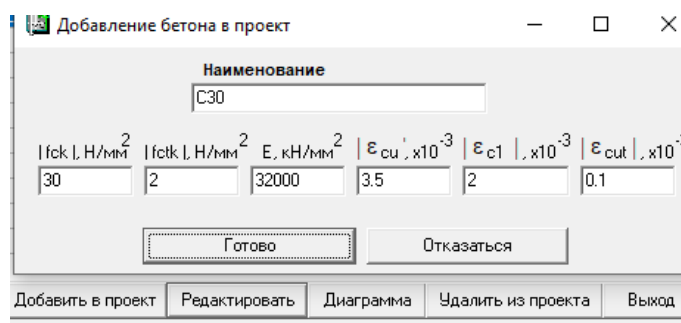


Рисунок 2 – Скриншот программного комплекса с данными по бетону конструкции

Исследования выполняли с заданием произвольных диаграмм деформирования материалов. Расчеты сечения выполняли как до усиления, так и после усиления. Причем, усилия, при которых производится усиление многпустотной плиты, в численном эксперименте принимали равными ≈ 30 % от предельных усилий, воспринимаемых железобетонной конструкцией до ее усиления. Усиление выполняли путем установки четырех стержней стеклопластиковой арматуры

ры $\varnothing 10$ мм с характеристическим пределом прочности при растяжении равным 800 МПа и модулем упругости 50000 Н/мм² (рис. 3).



Рисунок 3 – Скриншот программного комплекса с данными по стеклопластиковой арматуре, используемой для усиления многопустотных плит

Стеклопластиковую арматуру размещали в четырех пустотах плиты с заполнением пустот бетоном того же класса, что и бетон усиливаемой конструкции (рис. 4).

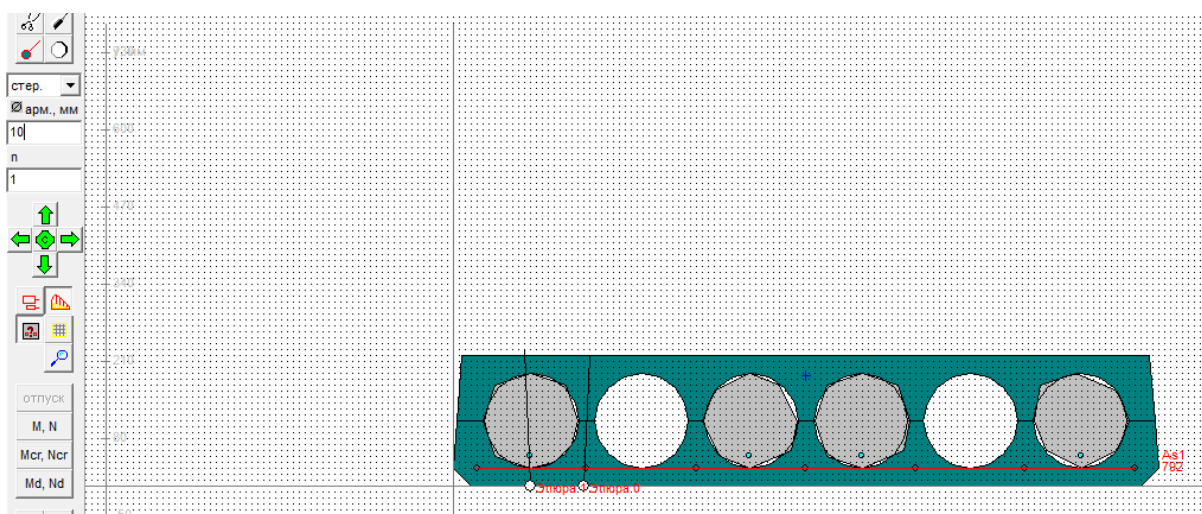


Рисунок 4 – Скриншот программного комплекса с данными по стеклопластиковой арматуре, используемой для усиления многопустотных плит

Результаты расчетов железобетонного сечения плиты до усиления показали, что предельный изгибающий момент, воспринимаемый сечением плиты составляет $M_{Rd} = 76,1$ кНм. Момент трещинообразования $M_{cr} = 17,9$ кНм. Усиление производили при значении изгибающего момента $M_{Ed} = 23,0$ кНм.

Усилия приводятся с учетом собственного веса

$M_x = 0.0$ $M_y = 23.0$ $N = 0.0$
 $k_x = 0.000e+00$ $k_y = 5.274e-06$

Критерий для РСУ = 0.297301

$M_{xcr} = 0.0$ $M_{ycr} = 17.9$ $N_{cr} = 0.0$
 $k_{xcr} = 0.000e+00$ $k_{ycr} = 8.107e-07$

$M_{xd} = 0.0$ $M_{yd} = 76.1$ $N_d = 0.0$
 $k_{xd} = 0.000e+00$ $k_{yd} = 2.848e-05$

Рисунок 5 – Скриншот программного комплекса с результатами расчета конструкции до усиления

В результате расчетов сечения конструкции с комбинированным армированием установлено, что усиление железобетонной плиты установкой стеклопластиковой арматуры, не смотря на

низкое значение ее модуля упругости, привело не только к увеличению предельного изгибающего момента, который для усиленной конструкции составил $M_{Rd} = 83,2$ кНм, но и к значительному увеличению момента трещинообразования $M_{cr} = 43,4$ кНм (рис. 6).

Усилия приводятся с учетом собственного веса

$M_x=0.0$ $M_y=23.0$ $N=0.0$
 $k_x=0.000e+00$ $k_y=2.203e-08$

Критерий для РСУ = 0.297759

$M_{xcr}=0.0$ $M_{ycr}=43.4$ $N_{cr}=0.0$
 $k_{xcr}=0.000e+00$ $k_{ycr}=8.688e-07$

$M_{xd}=0.0$ $M_{yd}=83.2$ $N_d=0.0$
 $k_{xd}=0.000e+00$ $k_{yd}=2.287e-05$

Рисунок 6 – Скриншот программного комплекса с результатами расчета конструкции после усиления

Напряжения в стеклопластиковой арматуре в момент достижения предельных усилий в стальной арматуре достигали значений ≈ 157 МПа.

Литература:

1. EN 1992-1-1:2004, Eurocode 2 – Design of Concrete Structures. Part 1: General rules and rules. – CEN, 2004.
2. СП 295.1325800.2017 «Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования».
3. Проектирование реконструкции зданий и сооружений: учеб.-метод. комплекс. В 3 ч. Ч. 2. Оценка состояния и усиление строительных конструкций / Д. Н. Лазовский. – Новополоцк : ПГУ, 2010. – 340 с
4. Почебыт А. А. Железобетонные балки с комбинированным армированием / А. А. Почебыт // Наука – 2017 : сборник научных статей. В 2 ч. Ч. 1/ Учреждение образования «Гродненский государственный университет им. Я.Купалы». – Гродно: ГрГУ им. Я. Купалы, 2017. – С.328 –330.
5. Тур В. В. Экспериментальные исследования изгибаемых бетонных элементов с комбинированным армированием стальными и стеклопластиковыми стержнями / В. В.Тур, В. В. Малыха // Вестник ПГУ, Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 8. – С. 58–65.
6. Фролов Н. П., Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции. – Москва: Стройиздат, 1980.