

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ
ЕВРОПЕЙСКИХ СТАНДАРТОВ
В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА**

(г. Минск, БНТУ — 27-28.05.2014)

УДК 691.87

**СЦЕПЛЕНИЕ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ
С БЕТОНОМ**

ХОТЬКО А.А., САДИН ЭБРАИМ ЯГУБ, ДЕЛЕНДИК С.Н.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Существующие на сегодняшний день потребности в экономии материальных ресурсов ставят задачу поиска и применения в строительстве новых конструктивных решений. Одним из таких решений, позволяющих экономить стальную арматуру, является использование в качестве армирования композитной (стеклопластиковой и базальтопластиковой) арматуры в предварительно напряжённых изгибаемых несущих композитобетонных конструкциях [3,4,5].

К недостаткам, или особенностям композитной арматуры, которые не позволяют повсеместно выполнить прямую замену металлической арматуры на композитную, относятся следующие свойства: низкий модуль упругости, более низкая огнестойкость изделий армированных композитной арматурой, низкая прочность при поперечных нагрузках, сложность изготовления гнутых арматурных изделий, сложность при изготовлении предварительно напряжённых конструкций. В связи с перечисленными особенностями композитной арматуры методики расчета и конструирования композитобетонных конструкций будут иметь существенные отличия по срав-

нению с методиками расчета и конструирования железобетонных конструкций [3,4].

Ситуация может быть существенно улучшена при использовании комбинированного (композит плюс сталь) армирования, с применением в одном конструктивном элементе как неметаллической, так и определенной доли стальной арматуры. Очевидно, что дополнительное количество продольной стальной арматуры периодического профиля следует устанавливать также с точки зрения повышения жёсткостных характеристик элемента и ограничения ширины раскрытия трещин в эксплуатационной стадии. В соответствии с предложенным подходом, до достижения текучести в стальной арматуре, последняя, работая совместно с неметаллической арматурой, контролирует ширину раскрытия трещин и повышает изгибную жесткость элемента. После достижения текучести в стальной арматуре прирост усилия достигается за счет активного включения в работу неметаллической арматуры. Таким образом, при комбинированном армировании, кроме увеличения предела огнестойкости, компенсируется недоиспользование прочностных свойств арматуры из композитного полимера, армированного волокнами, и надёжность конструкции в целом возрастает [1].

Ввиду отсутствия нормативных документов, регламентирующих требования к стеклопластиковой арматуре, имеются различия, как в технологии изготовления арматуры, так и в геометрических параметрах образующегося при производстве периодического профиля. Производится арматура с песчаной посыпкой поверхности и без нее. При этом является очевидным тот факт, что обладая различными параметрами периодического профиля, стеклопластиковая арматура различных производителей будет иметь и различные характеристики сцепления с бетоном. Следует отметить, что согласно исследованиям различных авторов, именно зацепление за бетон выступов профиля и микронеровностей поверхности арматуры (по сравнению с остальными факторами) оказывают решающее влияние на совместную работу арматуры и бетона. Учитывая то, что при армировании бетонных конструкций, эффективное использование стеклопластиковой арматуры возможно только при выполнении предварительного напряжения последней, периодический профиль арматуры, обеспечивающий совместную работу арматурных стержней и бетона

приобретает особое значение, оказывая влияние на ширину раскрытия трещин и прогибы элементов.

Одним из возможных вариантов решения задачи контроля ширины раскрытия трещин и прогибов композитобетонных элементов, или элементов с комбинированным армированием (стальная и стеклопластиковая арматура) является рассмотрение расчетной модели для блока, выделенного трещинами, а не модели сечения (как это принято в традиционных случаях) с последующим усреднением расчетных параметров модели с учетом совместной работы армирующего элемента и бетона на участках между трещинами. При формулировании положений расчетной модели Туром В.В. предложено рассматривать блок, выделенный соседними трещинами. Статическая задача согласно [1] решается с использованием модифицированных положений деформационной модели. В рамках модифицированной деформационной модели для расчетного блока используется система уравнений: уравнения равновесия продольных сил, уравнения равновесия моментов, уравнения равновесия для отдельного стержня, уравнения для проскальзывания. Кроме того, в систему уравнений входят диаграммы деформирования для материалов " $\sigma_c - \epsilon_c$ ", " $\sigma_s - \epsilon_s$ ", " $\sigma_f - \epsilon_f$ " и диаграммы, связывающие величину касательных напряжений τ с величиной проскальзывания s . При этом диаграмма " $\tau - s$ " играет ключевую роль в оценке напряженно-деформированного состояния расчетного блока [1].

В соответствии с MC2010 [2] для описания закона сцепления неметаллической арматуры (FRP) предложена диаграмма " $\tau_f - s_f$ ", показанная на рис. 1.

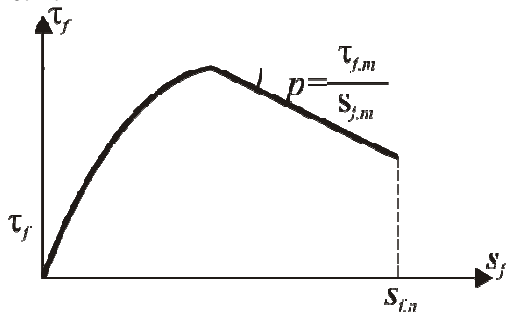


Рис. 1. Диаграмма деформирования " $\tau_f - s_f$ " для неметаллической арматуры согласно MC2010 [2]

Аналитическое описание диаграммы " $\tau_f - s_f$ " представлено в следующем виде:

$$\tau_f = \tau_{f,m} \left(s_f / s_{f,m} \right)^\alpha \quad \text{при } 0 \leq s_f < s_{f,m}; \quad (1)$$

$$\tau_f = \tau_{f,m} - \tau_{f,m} \left(s_f - s_{f,m} \right) / s_{f,m} \quad \text{при } s_{f,m} \leq s_f \leq s_{f,n} \quad (2)$$

Как следует из указаний, приведенных в МС2010 [2], значения параметрических точек диаграммы " $\tau_f - s_f$ " для соответствующего вида неметаллической арматуры определяют опытным путем.

Поэтому, целью данной работы стало экспериментальное определение параметрических точек и вида диаграммы закона сцепления (" $\tau - s$ ") стеклопластиковой арматуры с бетоном в изгибаемом элементе, армированном стеклопластиковой арматурой.

Для достижения поставленной цели предполагается решить следующие задачи:

1. Определить опытные зависимости изменения касательных напряжений сцепления по длине заделки стеклопластиковой арматуры в бетон $\tau(x)$ при различных уровнях нагружения изгибаемого элемента.
2. Определить опытные зависимости изменения взаимного проскальзывания арматуры относительно бетона по длине заделки $s(x)$ при различных уровнях нагружения изгибаемого элемента.
3. На основании полученных опытных зависимостей построить экспериментальную диаграмму " $\tau_f - s_f$ " для стеклопластиковой арматуры.
4. Выполнить аналитическое описание полученной диаграммы " $\tau_f - s_f$ " с определением параметрических точек.

Для решения поставленных задач планируется выполнить экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния изгибаемых композитобетонных элементов, армированных стеклопластиковой арматурой.

Экспериментальные исследования включают в себя испытания следующих опытных образцов:

1. Балок на свободных опорах, армированных продольной ненапрягаемой стеклопластиковой арматурой трех различных производителей (ООО "Центр инновационных технологий "МАПИД" (г.Минск), арматура производств городов Брест и Гомель.

2. Балок на свободных опорах, армированных продольной ненапрягаемой стеклопластиковой арматурой различных диаметров (6 мм, 8 мм и 10 мм).

3. Балок на свободных опорах с различными длинами заделки в бетон продольной ненапрягаемой стеклопластиковой арматуры. Длину заделки продольной арматуры назначали равной $10\emptyset$, $20\emptyset$ и $30\emptyset$.

Длину заделки арматуры в бетон ($l_{\text{зад}}$), а также форму и размеры поперечного сечения опытных образцов назначали таким образом, чтобы разрушение от внешней нагрузки происходило только по наклонному сечению от действия изгибающего момента вследствие нарушения анкеровки ненапрягаемой арматуры:

$$P^{M_{\text{накл}}} < P^{Q_{\text{накл}}} \quad \text{и} \quad P^{M_{\text{накл}}} < P^{M_{\text{норм}}} \quad (3)$$

Поперечное сечение опытных образцов принято прямоугольным с размерами сторон $b \times h = 150 \times 300$ мм. Длина образцов $L = 1500$ мм. Опытная балка в середине разделена на две части. Эффективная высота бетона (высота сжатой зоны бетона) зафиксирована путем установки стальных уголков в пределах высоты $x_{\text{eff}} = 80$ мм с шарниром между ними. В нижней части в пределах зоны чистого изгиба (в пределах 600 мм) бетон отсутствует. Поперечная и сжатая арматура отсутствует. Величина относительного пролета среза принята постоянной и равной 450 мм. Геометрические характеристики опытных балок представлены на рис. 1. Параметры и маркировка опытных образцов представлены в таблице 1.

Выбор длин заделки продольной арматуры в бетон, равных $10\emptyset$, $20\emptyset$ и $30\emptyset$ основан на результатах испытаний на вытягивание стеклопластиковых стержней из бетона, которые показали, что усилие на выдергивание стеклопластиковой арматуры диаметром 6, забетонированной на 10 см составляет 15 кН. Для опытных образцов с максимальной длиной заделки $30\emptyset$ усилие, при котором будет происходить нарушение сцепления, будет соответствовать напряжениям в арматуре ≈ 960 МПа, что близко к пределу прочности стеклопластиковой арматуры. Для длин заделки $10\emptyset$ и $20\emptyset$ будет происходить проскальзывание арматуры.

Таблица 1

Параметры и маркировка опытных образцов

Маркировка образцов	Производитель СПА	Диаметр арматуры \varnothing , мм	Длина заделки, Изад, мм ($n \cdot \varnothing$)	Количество образцов	
БМ6-10	МАПИД	6	60 (10 \varnothing)	2	
БМ6-20			120 (20 \varnothing)	2	
БМ6-30			180 (30 \varnothing)	2	
БМ8-10		8	80 (10 \varnothing)	2	
БМ8-20			160 (20 \varnothing)	2	
БМ10-10			100 (10 \varnothing)	2	
ББ6-10	Брест	6	60 (10 \varnothing)	2	
ББ8-10			8	80 (10 \varnothing)	2
ББ8-20				160 (20 \varnothing)	2
ББ10-10		10	100 (10 \varnothing)	2	
ББ10-20			200 (20 \varnothing)	2	
ББ10-30			300 (30 \varnothing)	2	
БГ6-10	Гомель	6	60 (10 \varnothing)	2	
БГ6-20			120 (20 \varnothing)	2	
БГ8-10			8	80 (10 \varnothing)	2
БГ10-10		10		100 (10 \varnothing)	2
БГ10-20				200 (20 \varnothing)	2
БГ10-30			300 (30 \varnothing)	2	
Итого:				36 образцов	

Балки изготовлены в разборной деревянной опалубке с формированием в горизонтальном положении (для арматуры). Проектируемая призмная прочность бетона образцов – 25 МПа. Бетонирование производится с уплотнением бетонной смеси вибратором. После формирования предусматривается выдержка их в опалубке в течение двух недель для набора прочности, достаточной для разуплубливания. Для определения прочностных и деформационных характеристик бетона изготавливаются кубы с размерами ребер 100×100×100 и призмы размером 100×100×400 мм в соответствии с ГОСТ 10870-78 “Бетоны. Методы определения прочности на растяжение и сжатие”, ГОСТ 244-80 “Бетоны. Методы испытаний. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона”.

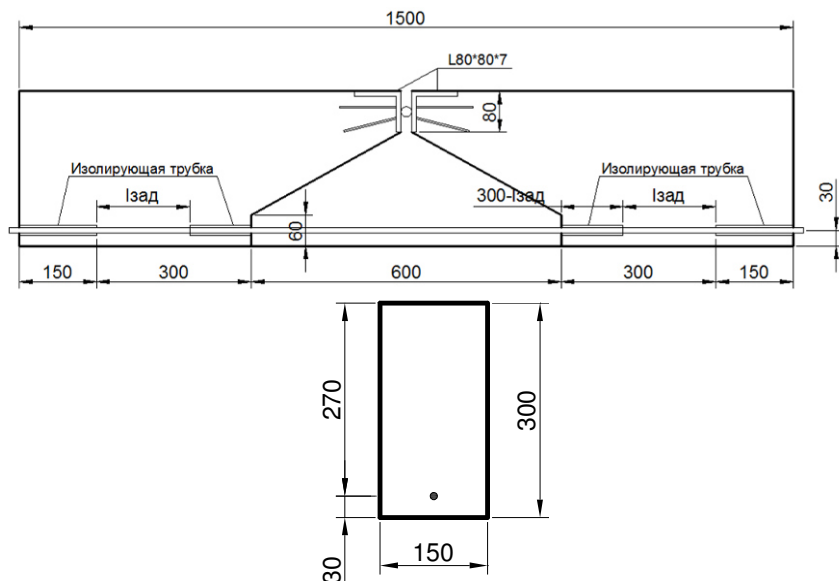


Рис. 1. Геометрические характеристики опытных балок

В процессе испытаний предполагается контролировать:

1. Характер разрушения опытных образцов и максимальную нагрузку, при котором сцепление стеклопластиковой арматуры с бетоном не нарушено (P_{max});
2. Перемещения незагруженного (свободного) конца арматурного стержня (y_1) относительно наружных граней бетона на обоих концах образца;
3. Перемещения загруженного конца арматурного стержня (y_0) относительно наружных граней бетона на обоих концах образца;
4. Относительные деформации бетона наружных граней балки по длине заделки арматуры в бетон, $\epsilon_{ст}(x)$;

Контроль геометрических параметров профиля арматуры производился при помощи штангельглубиномера до формования образцов. Нагрузка регистрируется по шкале силоизмерителя прессы на каждом этапе до момента разрушения. Смещения арматуры планируется измерять при помощи индикаторов часового типа с ценой деления – 0,001 мм, жестко закрепленных на струбцинах, соединяемой с наружными слоями бетона. Схема испытания опытных образцов с размещением приборов показана на рис. 2.

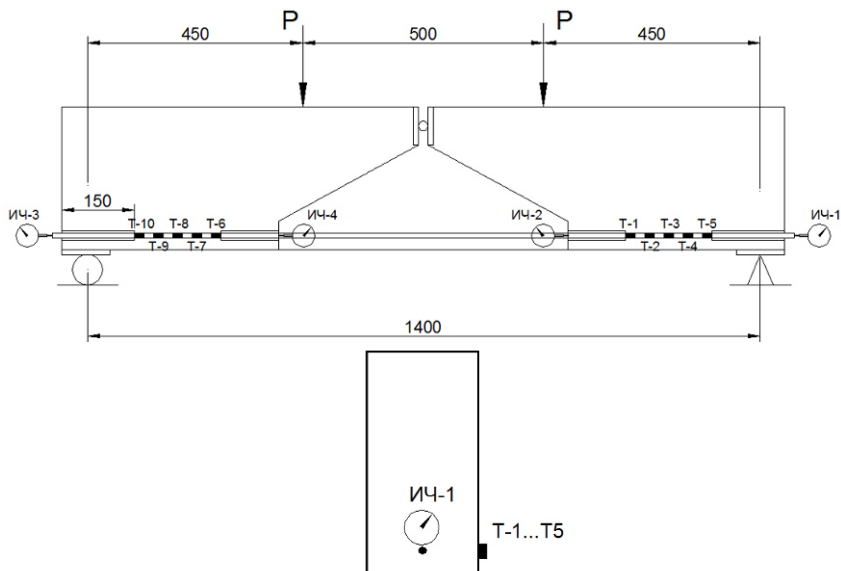


Рис. 2. Схема размещения приборов

Взаимное проскальзывание незагруженного конца $s(n)$ арматурного стержня, если пренебречь деформацией поперечных слоев бетона опытных образцов будет равно перемещениям незагруженного конца арматуры относительно наружных слоев бетона того же сечения, определенным на каждом этапе нагружения с помощью индикаторов ИЧ-1 (ИЧ-3).

$$s(n) = (yI) \quad (4)$$

Взаимное проскальзывание загруженного конца $s(0)$ арматурного стержня, пренебрегая деформацией поперечных слоев бетона опытных образцов, будет равно разности перемещений незагруженного конца арматуры относительно наружных слоев бетона в сечении на расстоянии 450 мм от торца балки, определяемых на каждом этапе нагружения с помощью индикаторов ИЧ-2 (ИЧ-4) и удлинения арматурного стеклопластикового стержня, полученного на участке 300- $l_{зад}$.

$$s(0) = (y0) - \varepsilon_s(0) \times (300\text{мм} - l_{зад}) \quad (5)$$

Относительные деформации на загруженном конце стеклопластикового стержня $\varepsilon_s(0)$ определяются по диаграмме деформирова-

ния арматуры при известном напряжении в стержне на загруженном конце $\sigma_s(0) = P \times a / (A_s \times (d - x_{\text{эф}}/2))$.

Перемещения бетона наружных граней опытных образцов по длине заделки арматуры $u_{ct}(x)$ определяются на основании данных определения относительных деформаций бетона по длине заделки $\varepsilon_{ct}(x)$:

$$u_{ct}(x+1) = u_{ct}(x) + \varepsilon_{ct}(x+1) \times \Delta x \quad (6)$$

Перемещения бетона наружных граней опытных образцов в сечении незагруженного конца арматуры определяются по формуле: $u_{ct}(n) = \varepsilon_{ct}(n) \times \Delta x$.

Напряжения в арматуре по длине заделки стержня $\sigma_s(x)$ могут быть определены из известных граничных условий (взаимные проскальзывания арматуры относительно бетона и напряжения в арматуре на загруженном ($s(0)$, $\sigma_s(0)$) и незагруженном ($s(n)$, $\sigma_s(n)=0$) концах стержня), методом последовательных приближений из следующих предпосылок:

– учитывая то, что разница между проскальзыванием арматуры на загруженном и свободном конце равна удлинению стеклопластикового арматурного стержня, полученному на участке заделки арматуры в бетон, можно определить площадь кривой зависимости нормальных напряжений в арматуре по длине заделки:

$$s_0 - s_n = \int_0^{l_{\text{зад}}} \varepsilon_x dx = \int_0^{l_{\text{зад}}} \frac{1}{E_s} \cdot \sigma_x dx = \frac{1}{E_s} \int_0^{l_{\text{зад}}} \sigma_x dx \quad (7)$$

$$\int_0^{l_{\text{зад}}} \sigma_x dx = E_s \cdot (s_0 - s_n) \quad (8)$$

– учитывая то, что разница между перемещениями арматуры и перемещениями бетона равна величине проскальзывания арматуры относительно бетона (пренебрегая деформацией поперечных сечений бетона), можно установить зависимость величины проскальзывания арматуры от относительных деформаций арматуры по длине заделки:

$$s(x) = u_s(x) - u_{ct}(x) \quad (9)$$

или

$$\frac{ds(x)}{dx} = \varepsilon_s(x) - \varepsilon_{ct}(x) \quad (10)$$

В конечных разностях выражение примет вид:

$$s_{i+1} = s_i + \Delta x \cdot \left(\frac{\varepsilon_{s,i+1} + \varepsilon_{s,i}}{2} - \frac{\varepsilon_{ct,i+1} + \varepsilon_{ct,i}}{2} \right) \quad (11)$$

Для решения задачи, зная граничные значения относительных деформаций и взаимного проскальзывания на одном конце (граничных условий на свободном конце $s_1 = \text{опыт}$ и $\varepsilon_s(1) = 0$), задаются такими значениями относительных деформаций арматуры для промежуточных точек, чтобы вычисления по формуле (11) показали опытное значение взаимного проскальзывания арматуры относительно бетона на загруженном конце ($s_0 = \text{опыт}$) и площадь графика напряжений в арматуре (полученной по диаграмме деформирования " $\sigma - \varepsilon$ ") соответствовала значению, полученному по формуле (8).

Напряжения сцепления по контакту арматуры с бетоном $\tau(x)$ определим из уравнения равновесия для отдельного стержня:

$$\frac{d\sigma_s(x)}{dx} - \frac{4}{\varnothing} \tau(x) = 0 \quad (12)$$

Взаимные проскальзывания арматуры относительно бетона по длине заделки $s(x)$ определяются по зависимости (9).

На основании сопоставления для отдельных точек по длине заделки зависимостей напряжений сцепления и взаимных проскальзываний строится диаграмма " $\tau_f - s_f$ " для стеклопластиковой арматуры, после чего выполняется аналитическое описание полученной диаграммы " $\tau_f - s_f$ " с определением параметрических точек.

Таким образом, выполнение данной работы позволит решить задачу контроля ширины раскрытия трещин и прогибов композитобетонных элементов, или элементов с комбинированным армированием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тур В.В., Малыха В.В. Сопротивление изгибаемых железобетонных элементов с комбинированным армированием стеклопластиковыми и стальными стержнями // Ресурсоeкономні матеріали,

конструкції, будовлі та споруди.– Збірник наукових праць, Вип. 24, 2012.– Рівне.– с. 271–281.

2. ModelCode 2010.

3. Фролов, Н.П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции / Н.П. Фролов. – Москва: Стройиздат, 1980. - 104с.

4. Николаев, Е. Применение композитных материалов в строительстве в мире. Потенциал роста в России / Е. Николаев // ООО «Гален» [Электронный ресурс] – 2011. –

5. Неметаллическая арматура: опыт разработки и применения неметаллической арматуры в СССР и за рубежом // Технологической группы «ЭКИПАЖ» (Украина, Харьков) [Электронный ресурс] – 2009. – Режим доступа.