

Орешкин Д.А.,*ООО Технологическая группа «Экипаж», г. Харьков***Бондаренко Ю.В., Спиранде К.В., Мольский М.М.***Харьковский национальный университет строительства и архитектуры*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ ПРИ СЖАТИИ И СЖАТЫХ СТЕКЛОПЛАСТБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Постановка проблемы

Одним из путей создания эффективных несущих строительных конструкций повышенной долговечности, особенно при эксплуатации в агрессивной по отношению к стальной арматуре среде, а также в мерзлотных грунтах, является разработка бетонных конструкций, армированных композитной (неметаллической) арматурой, в том числе стеклопластиковой – стеклопластбетонных.

Помимо коррозионной стойкости достоинствами стеклопластиковой арматуры являются: высокая прочность при растяжении, низкий удельный вес (легче металлической в 4-10 раз), химическая и магнитная инертность, диэлектрические свойства, радиопрозрачность и низкий коэффициент теплопередачи. Однако наряду с преимуществами у такой арматуры существуют и недостатки: низкий модуль упругости (в 4 раза меньше стальной стержневой арматуры), хрупкость при разрушении (отсутствие предела текучести), анизотропные свойства материала (низкий предел прочности на срез и осевое сжатие), низкая огнестойкость материала. Указанные свойства ограничивают область применения композитной арматуры в строительстве и требуют дополнительных исследований, как самих композитных стержней, так и стеклопластбетонных конструкций на их основе. При этом недостаточность данных о физико-механических свойствах стеклопластиковой арматуры при сжатии сдерживает её применение в конструкциях в качестве сжатой несущей (рабочей) арматуры и соответственно требует проведения научно-теоретических и экспериментальных исследований в этом направлении.

Анализ последних исследований и публикаций

Сжатые железобетонные элементы являются основными несущими вертикальными конструкциями зданий, свайных конструкций и сооружений различного назначения. Однако экспериментальные данные о прочности и деформативности сжатых элементов, армированных композитной неметаллической арматурой практически отсутствуют.

Одной из проблем использования композитной арматуры, в этом случае, является неопределенность в получении характеристик композитной арматуры на сжатие, что обусловлено множеством различных видов характера разрушения. Характер разрушения образцов может выражаться как в потере устойчивости всего образца, так и отдельных волокон. Схема разрушения композитной арматуры на основе стеклянных или базальтовых волокон имеет обычно картину среза. Испытания стержней композитной арматуры на сжатие обычно затрудняются проявлением потери устойчивости волокон вследствие анизотропности и неоднородности композитного материала и приводят к некорректным результатам измерений. Разные исследователи для композитных стержней предлагают отличающиеся величины снижения прочности на сжатие — в среднем от 30 до 50 % его прочности на растяжение [1, 2].

Стандартных методик определения модуля упругости при сжатии, необходимого для расчета и проектирования сжатых конструкций, нормами также не предусмотрено [3]. Между тем, композитная арматура является анизотропным и, следовательно, разномодульным материалом (модуль упругости на сжатие и растяжение могут отличаться).

Экспериментальные данные по прочности и деформативности сжатых элементов, армированных композитной неметаллической арматурой практически отсутствуют. Поэтому нормы проектирования западных стран [4-7] либо не содержат методик расчета сжатых элементов с неметаллической арматурой, либо допускают ее применение, но с нулевым расчетным сопротивлением сжатию [8]. Однако, как было показано в [9-11], прочностью композитной арматуры на сжатие не стоит пренебрегать. За рубежом проводились испытания колонн, армированных неметаллической композитной арматурой, которые показали, что прочность колонн с композитной стеклопластиковой арматурой при достаточном шаге поперечной арматуры всего на 7 % ниже аналогичных колонн со стальной арматурой.

В нашем государстве нормы проектирования конструкций с применением композитной арматурой регламентируются ДСТУ-Н [12]. Расчеты рекомендуется выполнять согласно действующих норм расчета железобетонных конструкций [13, 14], заменяя стальную арматуру на неметаллическую с учетом линейной диаграммы работы и ее расчетной прочности. Специальных расчетных зависимостей нормами не вводится [3]. Нормы, связанные с испытанием такой арматуры на государственном уровне еще не разработаны.

Формулирование цели статьи

Целью данной работы является определение экспериментальным путем прочностных и деформативных характеристик стеклопластиковой арматуры при осевом сжатии. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния при осевом сжатии бетонных цилиндрических образцов, армированных стеклопластиковой арматурой АКСП-25-800 и АКСП-10-800 с измерением относительных продольных деформаций арматуры внутри бетона и определением «модуля упругости композитной арматуры в бетонной матрице при сжатии». Выяснение возможности использования композитной арматуры в сжатых элементах, например, в буронабивных сваях.

Изложение основного материала

Работы проводились в Испытательной лаборатории натуральных обследований кафедры железобетонных и каменных конструкций ХНУСА на стандартном оборудовании. При этом экспериментальные исследования выполнялись в соответствии с нормативными документами зарубежных стран [15].

Образец для испытаний состоит из отрезка стержня, на концах которого на клеевом слое установлены испытательные муфты. Общая длина образца определяется конструкцией втулок. Приспособление для испытания образцов на сжатие состоит из направляющей втулки, обеспечивающей возможность приложения нагрузки строго вдоль оси стержня, и двух испытательных муфт, установленных на концах и обеспечивающих разрушение образца на рабочем участке (рис. 1, 2).

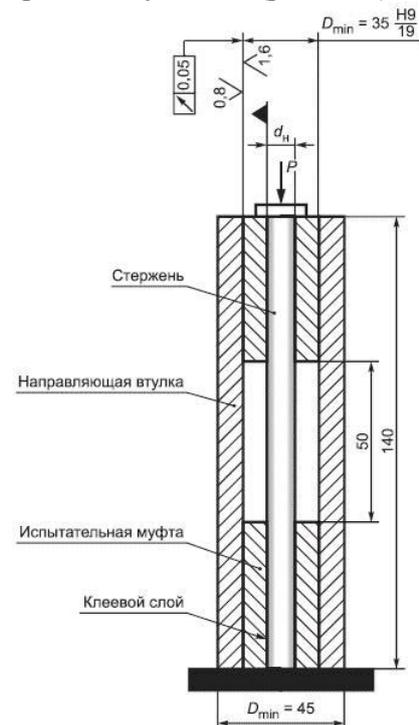


Рис. 1. Приспособление для испытания образцов на сжатие

Были выполнены испытания для определения предела прочности на сжатие f_{ck} , начального модуля упругости при сжатии E_{cf} и предельных относительных деформаций сжатия ε_{fcu} . Как отмечалось выше, в существующих нормах не предусматривается определение деформаций образцов

стеклопластиковой арматуры и модуля деформаций материала при сжатии.



Рис. 2. Общий вид испытанных образцов серии АКС на сжатие

В настоящей работе начальный модуль упругости материала при сжатии устанавливался в интервале уровней напряжений таких же как и для определения модуля деформаций при растяжении по указанному ГОСТу [15], то есть значение начального модуля упругости E_{fc} в МПа, рассчитывалось как отношение приращений напряжений при сжатии в интервале от 0,2 до 0,5 от разрушающих к соответствующим приращениям относительных деформаций. В этих же пределах напряжений устанавливался коэффициент Пуассона. Испытанию подвергались образцы номинальным диаметром 10 мм (серия АКС-10) и 25 мм (серия АКС-25) арматуры «Экибар», заделанные в испытательные муфты при свободной длине 60 мм и 125 мм соответственно.

Для измерения продольных деформаций в арматуре использовались тензорезисторы с базой 10 мм наклеенные в средней части образцов в количестве 2 штук. Для измерения поперечных (кольцевых) деформаций - использовались тензорезисторы с базой 10 мм, наклеенные по окружности в средней части образцов в количестве 2

штука для арматуры диаметром 25 мм и одного для арматуры диаметром 10 мм. Деформации фиксировались автоматическим измерителем АИД-4 с точностью измерения деформаций – 10^{-5} .

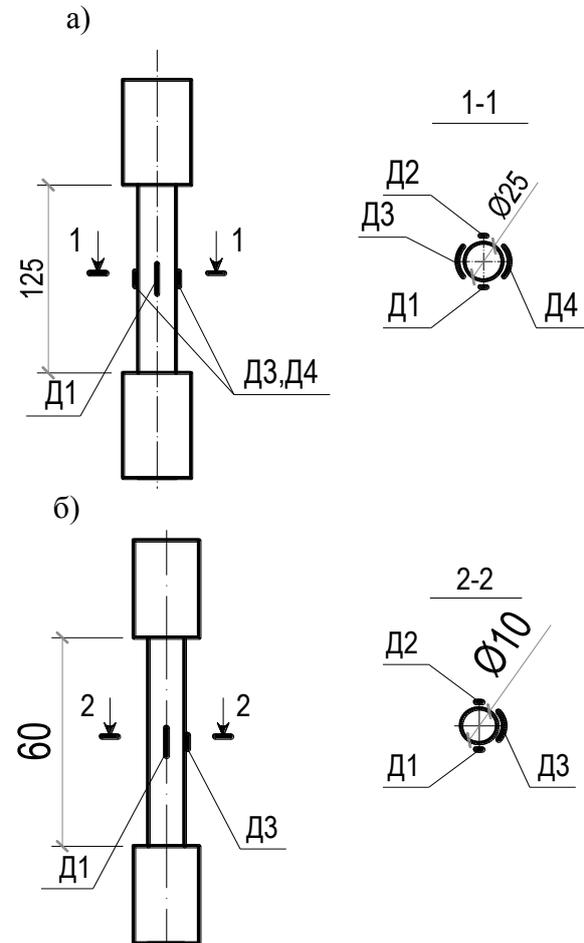


Рис. 3. Схема испытанных образцов серий: а - АКС-25; б - АКС-10:

Д1, Д2 – тензорезисторы для измерения продольных деформаций (база 10 мм); Д3, Д4 – для измерения поперечных деформаций (база 10 мм)

Опытные образцы испытывались на сжатие однократной статической нагрузкой до физического разрушения. Нагружение производилось ступенями с шагом 5%-10% от разрушающих усилий с выдержкой до 1 мин. для съема показаний с приборов. Нагрузка возрастала плавно, без рывков с постоянной скоростью.

Экспериментально установлено, что прочность стеклопластиковой арматуры производства ООО Технологической группы «Экипаж» (г. Харьков) на сжатие (483 МПа – Ø10, 294 МПа – Ø25) меньше, чем на растяжении (950 МПа – Ø10, 600

МПа – Ø25) примерно в 2 раза, то есть составляет примерно 50% от прочности на растяжение.

По различным источникам данные о прочности композитной арматуры могут существенно отличаться в зависимости от типа и формы сжатого элемента. Считается, что прочность при сжатии составляет порядка 30...35% от прочности на растяжение [1-10]. Согласно национальным нормативным документам [13] характеристическое значение прочности композитной арматуры на сжатие f_{fck} (120, 160 МПа) устанавливается как 20% от прочности на растяжение f_{fk} (600, 800 МПа). Установлено также, что модуль упругости при сжатии (47,9 ГПа – Ø10; 48,7 ГПа – Ø25) меньше, чем при растяжении (51 ГПа – Ø10; 52 ГПа – Ø25) на 6%. Согласно АСІ

[4] модуль упругости на сжатие для стеклопластиков меньше значения на растяжение на 20%.

Механизм разрушения стеклопластиковой арматуры вызван потерей устойчивости сжатых волокон внутри матрицы и соответственно ее разрыва в поперечном направлении. По результатам испытаний были построены диаграммы состояния стеклопластиковой арматуры при сжатии (рис. 4). Получены значения коэффициентов Пуассона 0,02 и 0,033; относительного укорочение при разрушающей нагрузке 1,02 % и 0,69 %, для стержней диаметром 10 и 25 мм соответственно. Установлена линейная зависимость между напряжениями и деформациями вплоть до разрушения.

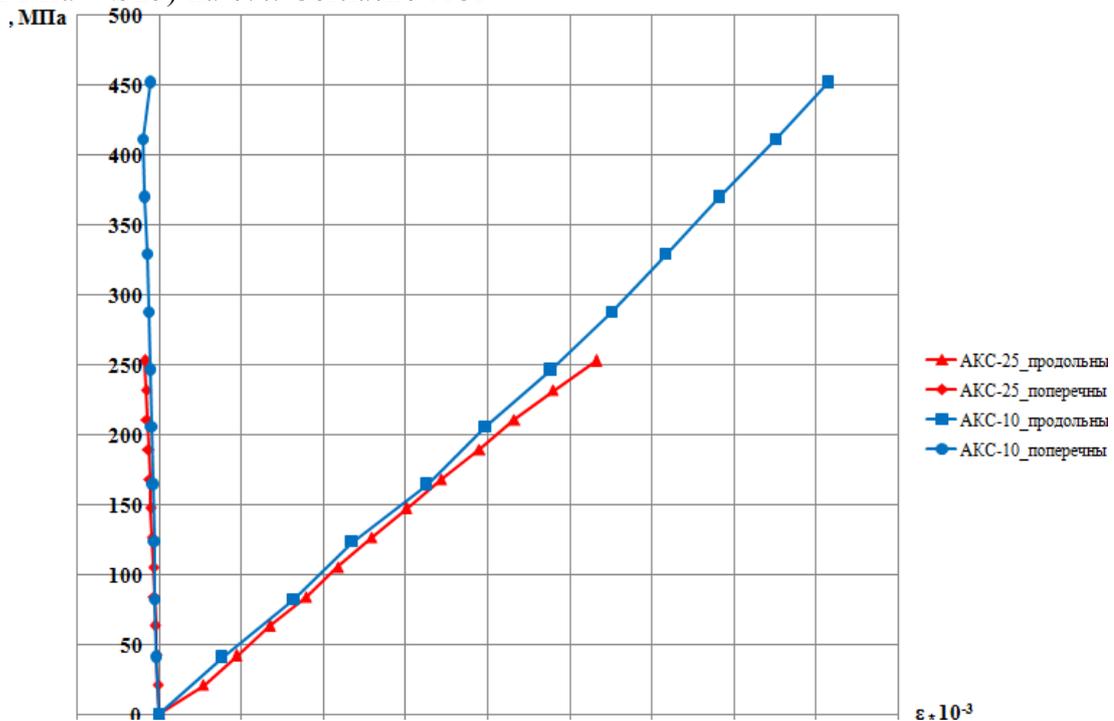


Рис. 4. Изменение деформаций стеклопластиковой арматуры при сжатии

С целью изучения прочности и деформативности бетонных сжатых элементов, армированных продольными композитными стержнями, были проведены экспериментальные исследования, программа которых включала в себя изготовление и испытание серий из трёх образцов на сжатие при статическом нагружении до физического разрушения.

Экспериментальные образцы представляли собой бетонные цилиндры диаметром 100, 150 и 200 мм с соотношением диаметра к высоте 1/3. Испытание бетонных цилиндров серий БЦ-100, БЦ-150 и БЦ-200 на осевое сжатие.

Продольные – измерялись при расположении приборов под углом 120° по окружности образцов на базе 100 мм в средней из части, поперечные – по диаметру образцов с соответствующей базой.

В результате проведенных испытаний были получены схемы трещинообразования и разрушения образцов сжатых элементов при статическом нагружении (рис. 7).

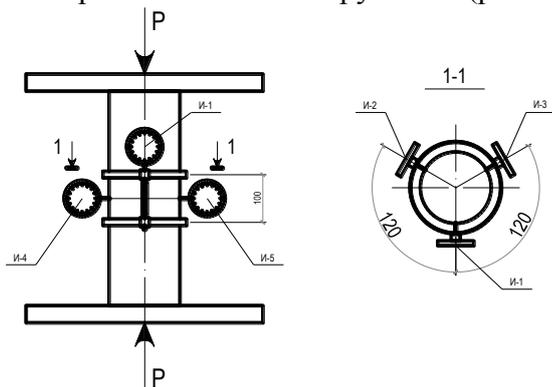


Рис. 5. Схема испытаний образцов серии БЦ:

И-1...И-3 – индикаторы для измерения продольных деформаций; И-4, И-5 – для измерения поперечных деформаций производилось на прессах МС-1000 и ПСУ-500. Нагрузка повышалась ступенями с шагом 5%-10% от разрушающих усилий с выдержкой до 1 мин. Для измерения продольных и поперечных деформаций бетона использовались индикаторы часового типа с ценой деления 10^{-3} мм.



Рис. 6. Характер разрушения образцов серии БЦ-200 и БЦ-150

Были построены графики продольного и поперечного деформирования бетона под нагрузкой (рис. 7).

С целью определения изменения прочности бетона цилиндрических образцов по высоте (при бетонировании в вертикальном положении) проведены натурные выборочные испытания прочности бетона цилиндров неразрушающим методом. Прочность определялась по высоте каждого образца на предварительно выбранных участках, расположенных максимально близко к верхней, средней и нижней

зонам. Определение прочности бетона на отмеченных участках проводилось неразрушающим методом упругого отскока с применением ударно-импульсного измерителя прочности «ОНИКС-2.51», на каждом участке испытания получено до 7-ми частных значений кубиковой прочности бетона. Отбраковка аномальных результатов измерений производилась прибором «ОНИКС» автоматически. Установлено существенное различие прочности бетона по высоте цилиндров, что неизбежно при бетонировании цилиндрических образцов в вертикальном положении и может также вносить дополнительные погрешности при определении прочности и деформативности испытываемых элементов в целом.

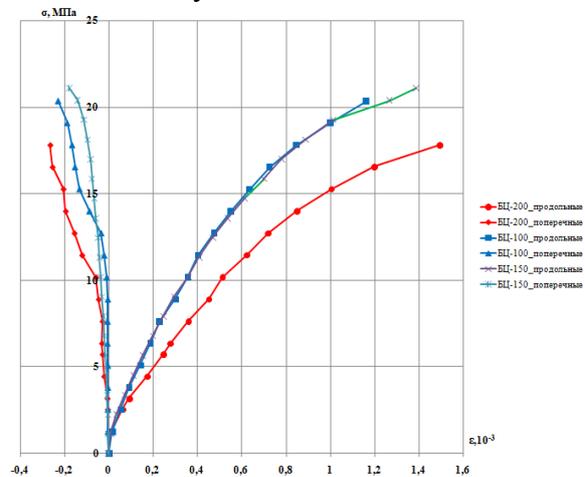


Рис. 7. Изменение деформаций бетонных цилиндров БЦ при сжатии

Подверглись испытанию экспериментальные образцы аналогичные первой серии - бетонные цилиндры диаметром 100, 150 и 200 мм, армированные стеклопластиковой арматурой «ЭКИБАР» номинальными диаметрами 10 и 25 мм (серии БЦА-100-10, БЦА-100-25, БЦА-150-10 и БЦА-200-25). Для измерения продольных и поперечных деформаций бетона, выполнялось аналогично бетонным образцам. Для измерения продольных деформаций арматуры АКСП использовались тензорезисторы с базой 10 мм наклеенные под 120° по окружности стержней в средней части образцов в количестве 6 штук. Деформации фиксировались автоматическим измерителем АИД-4 с точностью измерения деформаций – 10^{-5} .

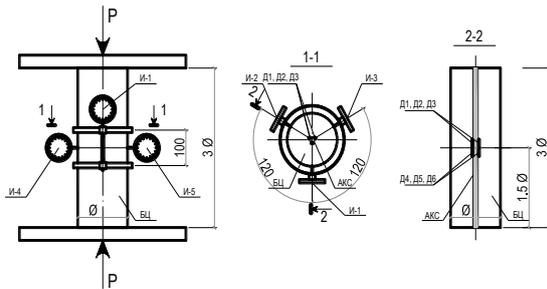


Рис. 8. Схема испытаний образцов серии БЦА:

И-1...И-3 – индикаторы для измерения продольных деформаций; И-4, И-5 – поперечных деформаций; Д1...Д6 - тензорезисторы для измерения продольных деформаций на арматуре

Сравнение прочности армированных и неармированных образцов показало неоднозначность полученных результатов, так:

- разрушающая нагрузка средняя для образцов серии БЦ-100 равна 155кН, для образцов серии БЦА-100-10 равна 182,5 кН, то есть больше на 18%;

- разрушающая нагрузка средняя для образцов серии БЦ-100 равна 155кН, для образцов серии БЦА-100-25 равна 176,3 кН, то есть больше на 13,7%;

- разрушающая нагрузка средняя для образцов серии БЦ-150 равна 388кН, для образцов серии БЦА-150-10 равна 359 кН, то есть меньше на 7,5%;

- разрушающая нагрузка средняя для образцов серии БЦ-200 равна 460кН, для образцов серии БЦА-200-25 равна 491 кН, то есть больше на 6,7% .

Разброс прочности на сжатие и различие характера разрушения в зависимости от метода испытаний указывает на разность и недооцененность условий реальной работы стержней композитной арматуры в бетоне.

В результате проведенных испытаний были получены схемы трещинообразования и разрушения сжатых образцов стеклопластбетонных элементов при статическом нагружении (рис. 9). Разрушение образцов сжатых элементов во всех случаях сопровождалось раздроблением бетона. Анализ схем разрушения образцов сжатых элементов показал, что независимо от процента армирования элементов разрушение

имеет близкий по форме характер. Общепринятая величина предельных деформаций бетона при сжатии равная $\epsilon_{ск} = 200 \times 10^{-5}$ значительно меньше полученных предельных деформаций стеклопластиковой арматуры ($\epsilon_{fc} = 690 \times 10^{-5}$ для арматуры АКСП-25-800 и $\epsilon_{fc} = 1020 \times 10^{-5}$ для арматуры АКСП-10-800). Поэтому критерием разрушения стеклопластбетонных (как и железобетонных, в аналогичных условиях) элементов при сжатии является предельная сжимаемость бетона. Очевидно, что эти данные необходимо учитывать при выборе величины расчетного сопротивления стеклопластиковой арматуры при определении несущей способности сжатых конструктивных элементов.



Рис. 9. Характер разрушения стеклопластбетонных образцов при сжатии

На рис.10 приведены графики зависимостей «напряжения – деформации в арматуре и бетоне», полученные в результате перераспределения усилий между арматурой и бетоном аналитически - путём численной обработки экспериментальных данных при постоянных значениях модуля упругости $E_{fc} = 47,78$ ГПа для арматуры АКСП-10-800 и $E_{fc} = 48,72$ ГПа для арматуры АКСП-25-800, установленные в ре-

зультатам испытаний. Такой подход используется при определении напряжённо - деформированного состояния сжатых железобетонных элементов, которые являются по структуре (композиционный материал из бетона и арматуры, работающей практически упруго в пределах эксплуатационных уровней загрузки) аналогичными исследуемым в настоящей работе стеклопластбетонным образцам.

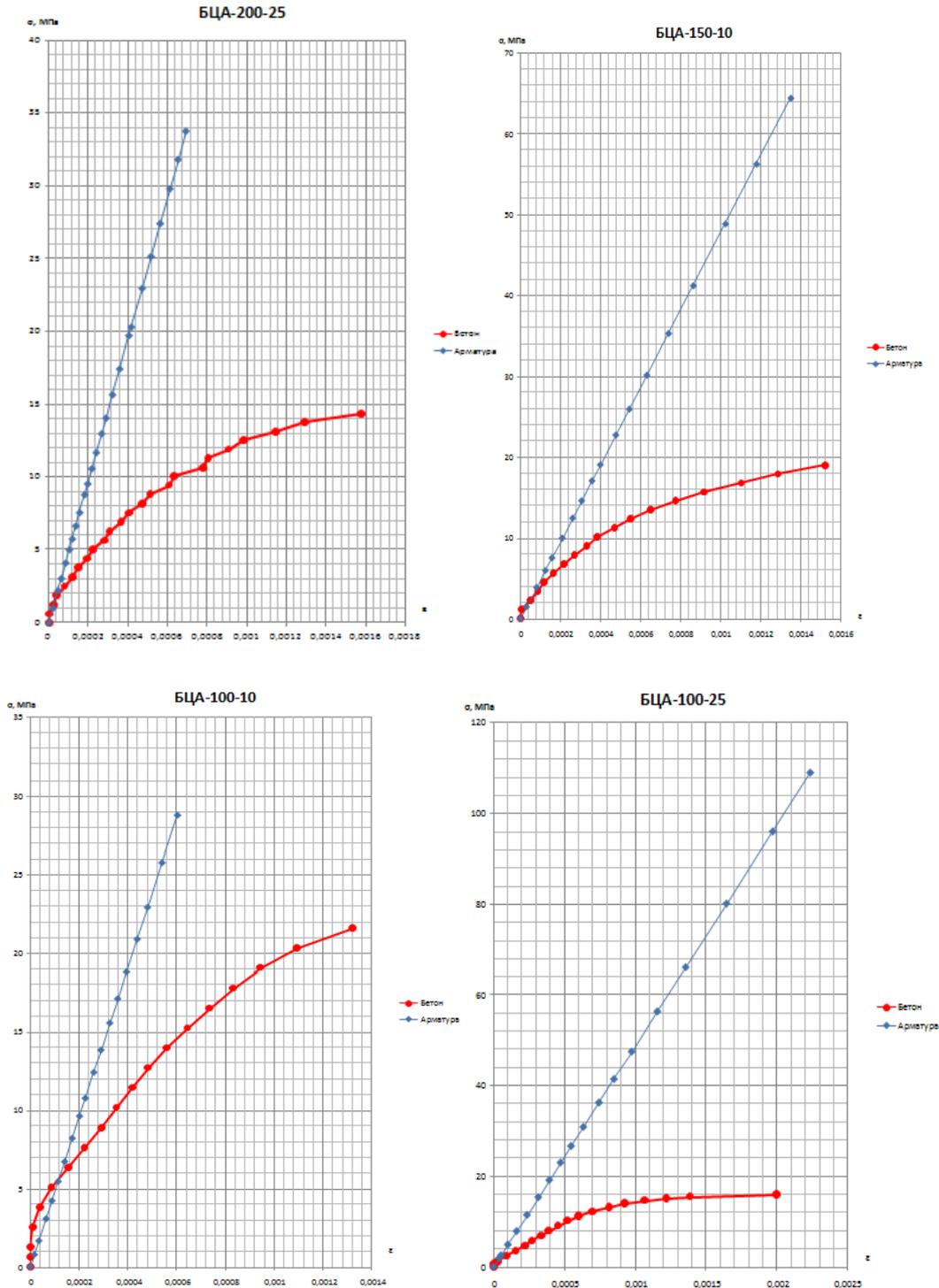


Рис. 10. Зависимости «напряжения - относительные деформации в бетоне и арматуре», полученные в результате перераспределения усилий между арматурой и бетоном

В настоящем исследовании одной из поставленных задач было определение для сжимаемых бетонных цилиндров с композитным армированием модуля упругости композитной арматуры в бетонной матрице при сжатии.

С нашей точки зрения эффект возможного изменения модуля деформации стеклопластиковой арматуры в условиях контакта с бетоном (предположительно увеличения) может проявиться при наличии значительного бокового (радиального) обжатия бетоном арматурного стержня, находящегося в центре сечения цилиндра. Такое явление может возникнуть как результат:

- усадочных деформаций бетона, обжимающих арматуру;
- при ограничении поперечных (радиальных) деформаций бетона, то есть радиальном обжатии за счёт спирального армирования с натяжением (преднапряжения);
- при одновременном радиальном деформировании арматурного стержня (увеличении его диаметра);
- при учащенной постановке поперечной арматуры.

Ввиду того, что бетон значительно более податливый материал, чем стеклопластик, возникновение указанного эффекта (изменения «модуля упругости композитной арматуры в бетонной матрице при сжатии») возможно только при условии принудительного (искусственно созданного) всестороннего обжатия арматурного стержня.

Для подтверждения этого предположения требуется проведение специального целенаправленного исследования, не предусмотренного в настоящей работе.

Результаты, полученные в настоящем экспериментальном исследовании нужно рассматривать как поисковые, открывающие возможность более точно и целенаправленно спланировать серию экспериментов для установления эффективности использования композитных стеклопластиковых стержней в качестве рабочей арматуры в сжатых бетонных элементах и уточнения её некоторых физико-механических свойств при сжатии в бетонной среде.

Выводы:

1. Использование стеклопластиковой арматуры является перспективным с экономической точки зрения в целях повышения долговечности конструкций зданий и сооружений эксплуатирующихся в условиях воздействия агрессивных сред, электрокоррозии и в мерзлотных грунтах.

2. Экспериментально получены прочностные и деформативные характеристики для стеклопластиковой арматуры АКСП-25 и АКСП-10 при сжатии.

3. Осуществлена попытка экспериментального определения модуля упругости (деформации) композитной арматуры находящейся в бетонной матрице при сжатии.

4. Для обоснования использования композитной неметаллической арматуры в сжатых конструкциях в качестве рабочей (несущей) и введения в нормы проектирования соответствующих методик расчета необходимо проведение полномасштабных исследований с изучением влияния на прочность и деформативность таких элементов формы поперечного сечения, шага и диаметра поперечной арматуры, процента продольного армирования; воздействия внецентренной и циклической нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лапшинов А.Е. Перспективы применения неметаллической композитной арматуры в качестве рабочей ненапрягаемой в сжатых элементах // Вестник МГСУ. 2015. № 10. С. 96—105.
2. Блазнов А.Н., Савин В.Ф., Волков Ю.П., Тихонов В.Б. Исследование прочности и устойчивости однонаправленных стеклопластиковых стержней при осевом сжатии // Механика композиционных материалов и конструкций. 2007. Т. 13. № 3. С. 426—440.
3. Кузеванов Д.В. Научно-технический отчет «Конструкции с композитной неметаллической арматурой. Обзор и анализ зарубежных и отечественных нормативных документов», 2012г. [Электронный ресурс] // НИИЖБ им. А.А.Гвоздева Лаборатория №2 URL: <http://www.niizhb2.ru/Article/nka2012.pdf> . Дата обращения 15.04.2016.
4. ACI 440.1R—15. Guide for the design and

- construction of structural concrete reinforced with FRP Bars. ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich. 2015. 83 p.
5. CAN/CSA-S6-02. Design and construction of building components with fibereinforced polymers, CAN/CSA S806-02. Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, Canada, 2002. 177 p.
 6. CNR-DT 203/2006. Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione e il Controllo di Strutture di Calcestruzzo armato con Barre di Materiale Composito Fibrorinforzato. Rome: CNR, 2007. 42 p. (in Italian)
 7. Fib Bulletin #40. FRP reinforcement in RC structures. 147 p.
 8. Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials // Japan Society of Civil Engineers (JSCE). Concrete Engineering Series No. 23. 1997. 325 p.
 9. Afifi M.Z., Mohamed H., Benmokrane B. Axial capacity of circular concrete columns reinforced with gfrp bars and spiral // Journal of Composites for Construction. 2014. Vol. 18 (1). Режим доступа: http://www.researchgate.net/publication/260081219_Axial_Capacity_of_Circular_Concrete_Columns_Reinforced_with_GFRP_Bars_and_Spirals. Дата обращения: 15.04.2016.
 10. Исследование прочности и деформативности бетонных сжатых элементов, армированных стальными и композитными стержнями / И.А. Русаков, О.О. Русакова, К.Л. Кудряков [и др.] // Материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Братск : ГОУ ВПО «БРГУ», 2014. – С. 35–37.
 11. Невский А.В., Балдин И.В. Прочность и деформативность сжатых бетонных элементов с продольным армированием стальными, стеклопластиковыми и углепластиковыми стержнями при статическом нагружении / Перспективные материалы в строительстве и технике (ПМСТ-2014). Материалы Международной научной конференции молодых ученых [Электрон. текстовые дан.]. Секция 2. Инновационные технологии в производстве строительных материалов. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. – С. 312-321.
 12. ДСТУ-Н Б В.2.6-185:2012 . Настанова з проектування та виготовлення бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою на основі базальто- і склоровінгу. Введено в дію 28.09.2012.
 13. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Введено в дію 01.07.2011.
 14. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. Введено в дію 01.06.2011.
 15. ГОСТ 32492-2013 Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения физико-механических характеристик. Введен 01.01.2015.

УДК 666.972.16

Шептун С. Ю.

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

РЕНТГЕНОФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Введение

Введение минеральных наполнителей в качестве самостоятельной составляющей растворной смеси является одним из существенных резервов повышения экономичности сухих смесей по стоимости и расходу цемента, и улучшения их конструктивно-технических свойств[1-4].

Для понимания роли микронаполнителей в структурообразовании цементного камня необходимо провести рентгенофа-

зовый анализ, дериватографические, электронномикроскопические исследования, ИК-спектроскопию и др.

Методика проведения исследования

В основе рентгенографического анализа лежит явление дифракции рентгеновских лучей кристаллами. Известно, что веществу в любом агрегатном состоянии свойственна та или иная степень упорядоченности. Наибольшей упорядоченностью обладают твердые кристаллические тела: