

Юрьев А. Г., д-р техн. наук, проф.,  
Панченко Л. А., канд. техн. наук, доц.,  
Серых И. Р., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Мостафа Осман, д-р философии, доц.,  
Ата Эль-Карим Шойиб, д-р философии, доц.

Хелвен Университет, Каир, Арабская Республика Египет

Павленко В. И., д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ЭФФЕКТ УСИЛЕНИЯ КРУГЛЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН ВОЛОКНИСТЫМИ КОМПОЗИТАМИ

yuriev\_ag@mail.ru

*Экспериментально исследовано влияние обжатия круглых железобетонных колонн волокнистыми композитами на несущую способность и податливость. Используются полимеры, армированные углеродными или стеклянными волокнами.*

**Ключевые слова:** железобетонная колонна, полимеры с углеродными или стеклянными волокнами.

Колонны являются одними из наиболее ответственных элементов зданий. От их состояния в немалой степени зависит надежность сооружения. Поэтому восстановление и усиление колонн – актуальная проблема в деле предотвращения разрушения зданий.

В настоящее время бетонные колонны большей частью усиливаются за счет стальной арматуры – продольных стержней с поперечными связями или спиралями. Связи или спирали создают некоторое ограничение деформирования бетона в боковом направлении, характеризующегося растяжением, которое является нежелательным для него фактором.

Значительно больший эффект в этом отношении достигается обоймами в виде труб, которые используются вместо стальной арматуры. Проведены обширные исследования бетонных колонн в стальной обойме. Экспериментальные исследования [1] показывают, что в заполненных бетоном стальных трубах наблюдается довольно малое взаимодействие между бетоном и сталью, которое объясняется двумя причинами. Во-первых, бетон в большом диапазоне напряжений имеет меньший коэффициент Пуассона, чем сталь, и, следовательно, отделяется от трубы, когда колонна испытывает продольное сжимающее усилие. Это особенно чувствительно при вхождении стали в пластическую область деформирования. Во-вторых, усадка бетона вызывает расслаивание на границе раздела двух материалов. В результате такие колонны разрушаются вследствие текучести стали, если предел текучести ниже, чем 400 МПа, или вследствие дробления бетона, если этот предел выше, чем 530 МПа.

В работах [2-5] рассмотрено поведение бетона в трубе из волокнистого композита в виде полимера, армированного стеклянными и углеродными волокнами, в виде одно-, трех- и пяти-слойной композиции. В случае углеродных волокон достигалась более высокая прочность [6], а в случае стекловолокон высокая деформативность.

Полимер, армированный волокном, представляется как линейно-упругий материал. Отсутствие пластических деформаций снижает вероятность отслоения от бетона, что характерно для стали и о чем говорилось выше. На ранней стадии нагружения коэффициент Пуассона бетона меньше, чем коэффициент Пуассона материала трубы, так что последняя не создает эффекта ограничения для бетонного ядра. В дальнейшем продольная деформация увеличивается настолько, что боковое расширение бетона становится больше, чем в трубе. Появляется радиальное давление на поверхность бетона. При этом бетон находится в трехосном напряженном состоянии.

Несмотря на значительное число экспериментов для бетона в стеклополимерной и углероднополимерной трубах интерес к дополнительной информации о способах рационального усиления бетонных колонн не ослабевает. Представляет интерес изопериметрическая задача при заданном объеме материала, создающего усиление колонны путем ее обжатия. Первый вариант ее постановки состоит в рассмотренном выше непрерывном распределении материала и регулировании числа слоев и их толщины. Второй вариант предусматривает усиление кольцами, при котором регулируются их число и ширина, число слоев и их толщина. Теоретическое

решение такого рода задач затруднено недостаточной информацией о взаимодействии элементов внешнего подкрепления, в том числе промежуточных слоев волокнистого композита. Выход из этого положения состоит в накоплении экспериментальных данных.

В Хелвен Университете города Каира были проведены эксперименты по изучению эффекта усиления круглых железобетонных колонн путем обжата полимером, армированным волокнами. Диаметр сечения колонн 120 мм, высота 800 мм, арматура: 6 вертикальных стержней  $d=16$  мм и спиральные хомуты  $d=8$  мм с 10-мм шагом, защитный слой 1,5 см.

Нагружение производилось с помощью универсальной испытательной машины UTM мощностью 100 т. Описание испытываемых об-

разцов дано в табл. 1. Введены обозначения:  $\sigma_{иl}$  – предел прочности волокна на растяжение,  $\varepsilon_{иl}$  – соответствующая деформация,  $E$  – модуль продольной упругости.

Электротензометры использовались для измерения радиальных деформаций колонн. Регистрировались нагрузка  $P$  и соответствующее перемещение (укорочение)  $\delta$  при непосредственном построении графика  $P - \delta$ . Исходя из площади нагружения  $A$  и высоты колонны  $H$  строился график  $\sigma - \varepsilon$  (напряжение – деформация).

Нагрузка, прочностные и деформационные показатели даны в табл. 2. Введены обозначения:  $f_{co}$  ( $f_{cc}$ ) – предел прочности необжатого (обжатого) бетона.

Таблица 1

## Испытываемые образцы

Обозначение	Описание
контрольный	Диаметр 120 мм, высота 800 мм, 6 вертикальных стержней $d = 16$ мм и спиральные хомуты $d = 8$ мм с 10-мм шагом, защитный слой 1,5 см
CC1	Один 0,13-мм слой полимера, армированного углеродными волокнами, $\sigma_{иl}=3570$ МПа, $\varepsilon_{иl}=0,015$ , $E=2346$ ГПа
CC2	Два 0,13-мм слоя того же материала
CC3	Один 0,13-мм слой шириной 50 мм с интервалом 50 мм
CC4	Один 0,13-мм слой шириной 50 мм с интервалом 100 мм
CG	Один 0,3-мм слой полимера, армированного стекловолокном, $\sigma_{иl}=1263,8$ МПа, $\varepsilon_{иl}=0,0214$ , $E=576,3$ ГПа

Таблица 2

## Результаты испытаний

Обозначение образца	$P_u$ , т	$f_{cc}$ , МПа	$f_{cc}/f_{co}$ , %	Площадь под графиком $P - \delta$	Увеличение площади под графиком $P - \delta$ , %	$\delta$ при $0,7 P_u$	Увеличение $\delta$ при $0,7 P_u$ , %
контрольный	21	18,59	100	0,55	100	0,1	100
CC1	50,1	44,09	237,2	3,5	636,4	0,44	440
CC2	64,1	56,79	305,2	5,57	1013	0,55	550
CC3	30	26,49	142,5	2,2	400	0,29	290
CC4	27,5	24,22	130,3	2,15	390,9	0,21	210
CG	38,2	33,83	182,2	0,67	121,8	0,075	75

График  $\sigma - \varepsilon$  для пяти образцов дан на рис. 1. Нагрузка для образца CC2 (два слоя полимера) на 28 % больше по сравнению с образцом CC1 (один слой полимера), в то время как разность объемов и стоимость используемого материала составляют 100 %. Нагрузка для образца CC1 на 66,6 % больше по сравнению с образцом CC3, в то время как разность объемов используемого материала составляет 100 %. Нагрузки для образцов CC3 и CC4 отличаются незначительно, в то время как расход используемого материала довольно различен. Использование полимера со стекловолокном снижает нагрузку на 24 % по сравнению с углеродным волокном.

Потенциальная энергия деформации вычисляется как площадь под кривой  $P - \delta$ . Как видно из табл. 2, все виды обжата повышают ее величину по сравнению с контрольным образцом. Наибольшая величина потенциальной энергии деформации наблюдается при двух слоях полимера с углеродным волокном.

Рассмотрено перемещение при  $0,7 P_u$  (см. табл. 2). Для образца CC1 (один слой полимера с углеродным волокном) податливость возрастает на 340 %, в то время как для образца CC2 (два таких слоя) – на 450 %.

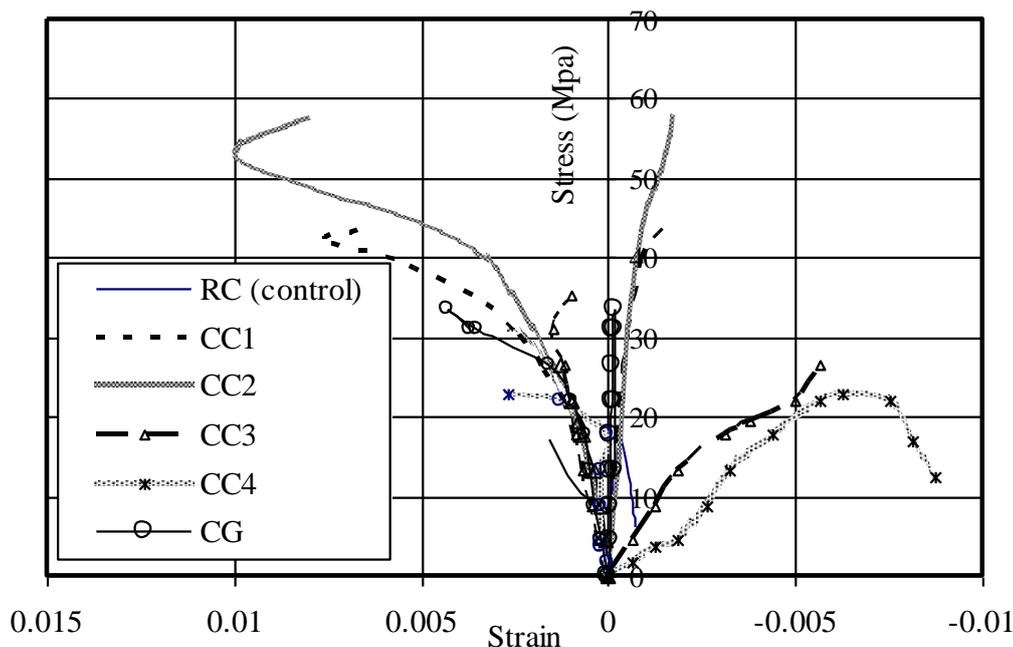


Рис. 1. График  $\sigma$ - $\epsilon$  для круглых железобетонных колонн, обжатых полимером, армированным волокнами

В итоге можно сказать, что выявленная тенденция усиления железобетонных колонн волокнистыми композитами помогает установить рациональное решение. Очевидно, достижение требуемой несущей способности колонн следует вести путем эффективного сочетания числа слоев композитов и их толщины и выгодной концентрации обжатия по высоте.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Knowles R.B., Park P. Strength of concrete-filled steel tubular columns // ASCE. V. 95. 1969. № 12. P. 2565 – 2567.
2. Fardis M.N., Khalili H. Concrete encased in fiberglass-reinforced plastic // ASI Journal. V. 78. 1981. № 6. P. 440-446.

3. Kurt C.E. Concrete-filled structural plastics columns // ASCE. V. 104. 1978. № 1. P. 55 – 63.

4. Miller M.A. FRP preprags as external reinforcement for concrete cylinders: Research report. University of Bethlehem, 1994. 92 p.

5. Хаютин Ю.Г., Чернявский В.Л., Аксельрод Е.З. Применение углепластиков для усиления строительных конструкций // Бетон и железобетон. 2002. № 6. С. 17-20.

6. Солиман Ата Эль-К., Юрьев А.Г., Панченко Л.А. Углепластики в управляемых конструкциях // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2009. № 3. С. 40-42.