

## СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 624.012:69.07

*Я. З. Блихарский, Р. Е. Хмиль*

### УВЕЛИЧЕНИЕ ЖЁСТКОСТИ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН, УСИЛЕННЫХ УГЛЕРОДНОЙ ЛЕНТОЙ

UDC 624.012:69.07

*Y. Z. Blikharsky, R. E. Khmil*

### IMPROVING THE HARDNESS OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS STRENGTHENED BY CARBON LAMINATE

#### **Аннотация**

В статье отражены результаты исследования железобетонных колонн, усиленных углеродной лентой, при действии осевой сжимающей силы и изгибаемого момента. Проведен сравнительный анализ усиленных и неусиленных образцов и определен эффект от усиления.

#### **Ключевые слова:**

железобетонные колонны, CFRP, усиление, лента, углерод, композитные материалы.

#### **Abstract**

This paper presents results of the research of reinforced concrete columns strengthened with a carbon tape under the action of the axial compressive force and the bending moment. The comparative analysis with non-strengthened samples has been performed with the strengthening effect being determined.

#### **Key words:**

reinforced concrete columns, CFRP, strengthening, laminate, carbon, composite materials.

#### **Введение**

Железобетонные конструкции во всем мире являются наиболее распространёнными. Однако под влиянием времени, окружающей среды, некачественных материалов, из которых они изготовлены, их эксплуатационные свойства ухудшаются. Именно поэтому и возникает потребность в восстановлении и усилении таких конструкций.

Кроме прочности, в таких конструкциях важна также деформативность. То есть конструкции могут воспринимать нагрузку, но при значительном изгибе и прогибе невозможна их даль-

нейшая эксплуатация. Именно поэтому для эффективного использования важно повышение жёсткости конструкций, достигаемое с помощью различных систем усиления.

Одним из современных методов усиления является применение углеродных фиброармированных полимеров (CFRP), преимущество которых в высокой прочности, жёсткости, коррозионной стойкости. Среди недостатков следует отметить стоимость, потребность в защите от ультрафиолетовых лучей и воздействия огня. Однако, если комплексно учесть стоимость их использо-

вания в сравнении с другими методами, то общая стоимость работ будет одинаковой.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований, на основании которых определена эффективность применения CFRP для повышения жёсткости усиленных колонн.

#### Анализ существующих публикаций

Многие работы ученых в Украине [1–4], России [5], Беларуси [6] посвящены исследованиям композитных материалов системы CFRP.

В США, Европе и Великобритании разработаны методические указания по использованию композитных материалов и методы их расчета [7–10].

**Целью работы** является исследование возможности использования углеродных лент для повышения жёсткости конструкций. Для этого необходимо определить экспериментальным путем деформативность внецентренно сжатых

железобетонных колонн как неусиленных, так и усиленных углеродной лентой. По результатам исследований выполнен сравнительный анализ и установлен эффект повышения жёсткости конструкций.

#### Материалы и конструкция опытных образцов

В ходе работы были изготовлены опытные образцы колонн с размерами 2200×180×140 мм. На краях колонн были сделаны консольные выступы для передачи нагрузки. С помощью консолей стало возможным приложение нагрузки с большим эксцентриситетом, моделирование значительных изгибающих моментов в колоннах реального каркаса зданий. В исследованиях принят эксцентриситет, равный 150 мм. Конструкция опытных образцов показана на рис. 1.

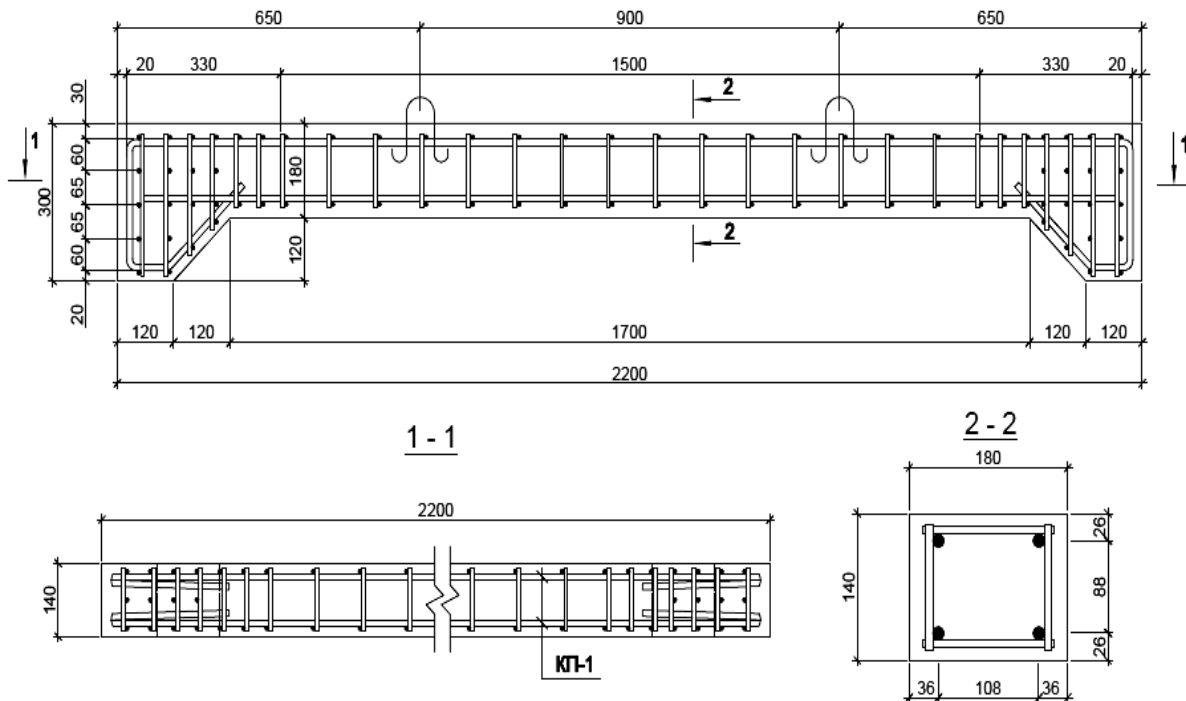


Рис. 1. Армирование и размеры испытуемых колонн

В процессе изготовления арматурных каркасов были предусмотрены крепления для механических приборов определения деформаций. Образцы колонн усилили лентой SikaCarbodurS512 шириной 25 и 50 мм. Ленту наклеивали на растянутую грань колонны (рис. 2). Для обеспечения анкеровки ленты на консолях колонны использованы ткань SikaWrap шириной 150 мм, которую на-

клеивали в два слоя: под и над лентой. Ткань заводили за боковые грани колонны на 160 мм. Для наклеивания ткани SikaWrap использовали двухкомпонентный клей Sikadur330, а для наклеивания ленты SikaCarbodur – двухкомпонентный клей Sikadur-30. Перед усилением проводили подготовку опытных образцов согласно требованиям производителя [12].

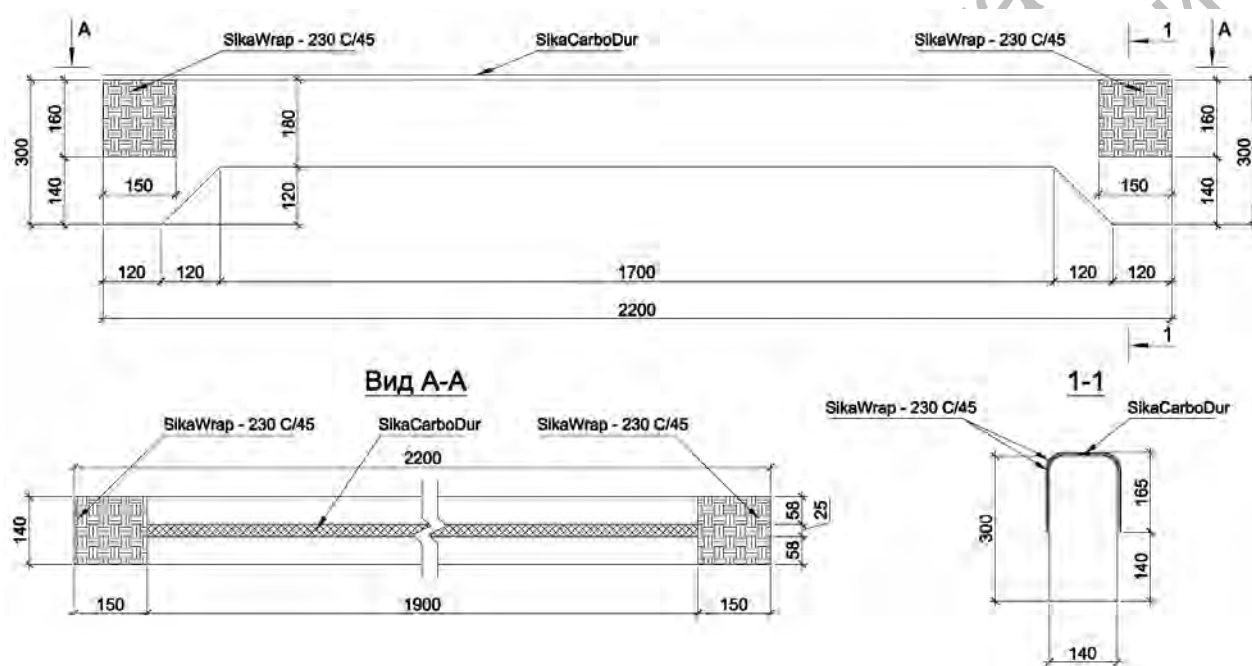


Рис. 2. Схема колонны, усиленной композитной арматурой

Опытные образцы испытывали не ранее чем через 7 сут [11, 12] после усиления.

#### **Экспериментальные исследования внецентренно сжатых образцов**

Принята следующая маркировка исследуемых колонн: КЗ-0.1 и КЗ-0.2, КПС-1.3 и КПС-1.4, КПС-2.11 и КПС-2.12, где КЗ – колонна обычная; КПС – колонна, усиленная лентой. Первая цифра указывает на номер серии, а вторая – на номер образца. Серия 0 – без ленты, серия 1 – усиленные лентой шириной 25 мм, серия 2 – усиленные лентой шириной 50 мм.

Нагрузку прикладывали сосредоточенной силой, приложенной с эксцентриситетом  $e = 150$  мм. Шаг нагрузки составлял 10 кН, выдержка – 15 мин. Приложение нагрузки создавали с помощью гидравлического домкрата на специально подготовленном стенде. Экспериментальное исследование колонн проходило в горизонтальном положении. Нагрузку контролировали кольцевым динамометром.

Для определения деформаций в сжатой и растянутой арматуре, сжатом бетоне, деформаций бетона по высоте сечения, дополнительно в усиленных образцах деформаций ленты было ис-

пользовано 28 микроиндикаторов часового типа в неусиленных образцах и 35 в усиленных.

Прогибы колонн измерили пятью прогибомерами Аистова. Крайние про-

гибомеры отступали по 150 мм от края образца, а остальные – с шагом 475 мм вдоль оси колонн. Общий вид стенда и колонны с расположением приборов приведен на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид колонны с размещением приборов

### **Результаты экспериментальных исследований**

По результатам исследований были построены графики прогибов колонн при каждом этапе нагрузки. Поскольку образцы КЗ-0.1 и КЗ-0.2, КПС-1.3 и КПС-1.4, КПС-2.11 и КПС-2.12 – «близнецы», то для каждой пары «колонн-близнецов» были построены усредненные графики прогибов по длине образцов для каждой отдельной серии в зависимости от величины нагрузки. Следует отметить, что «образцы-близнецы» показали примерно одинаковые прогибы, отклонение было незначительным. Усредненные графики представлены на рис. 4 и 5.

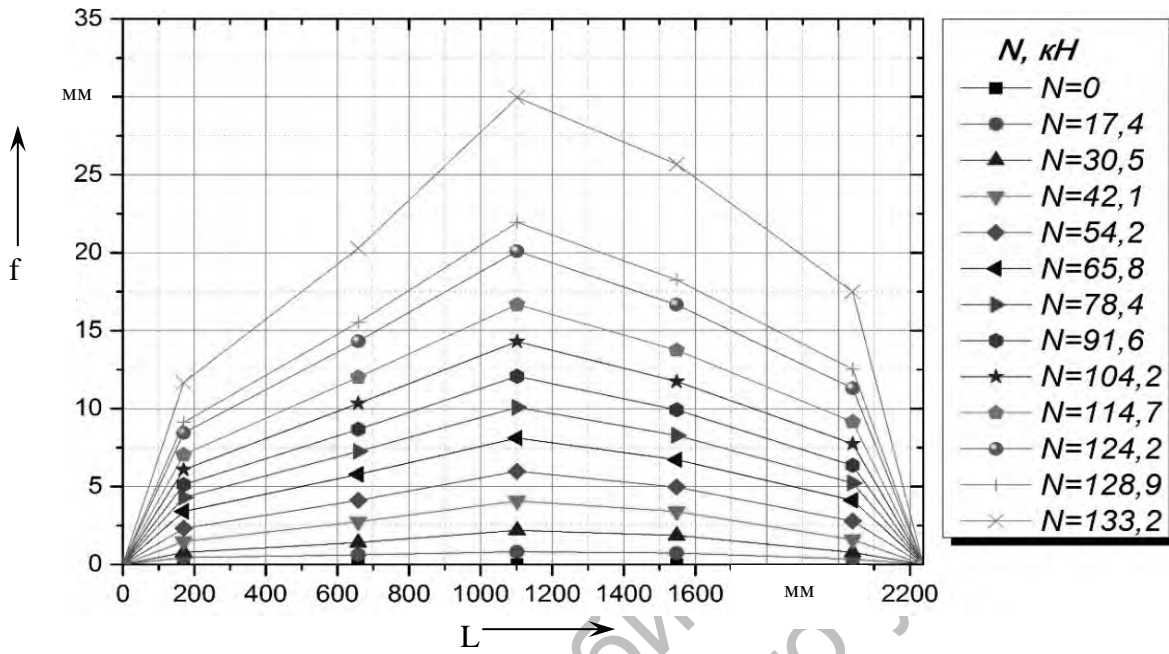
Общий вид колонн при уровне нагрузки, соответствующей исчерпанию несущей способности неусиленных об-

разцов, представлен на рис. 6. Визуально можно увидеть, что усиленный широкой лентой (50 мм) образец имеет наименьший прогиб, одновременно усиленные образцы имеют значительно меньшие прогибы по сравнению с неусиленными образцами.

Анализ графиков прогибов (см. рис. 4 и 5) при одинаковой нагрузке в сериях колонн, усиленных лентой, также показывает, что прогибы этих образцов значительно меньше, чем неусиленных.

Наглядно продемонстрировано уменьшение прогибов усиленных образцов на графиках прогибов колонн в зависимости от нагрузки для центрального сечения, имеющего наибольший прирост (рис. 7). Цифровые значения прогибов представлены в табл. 1.

а)



б)

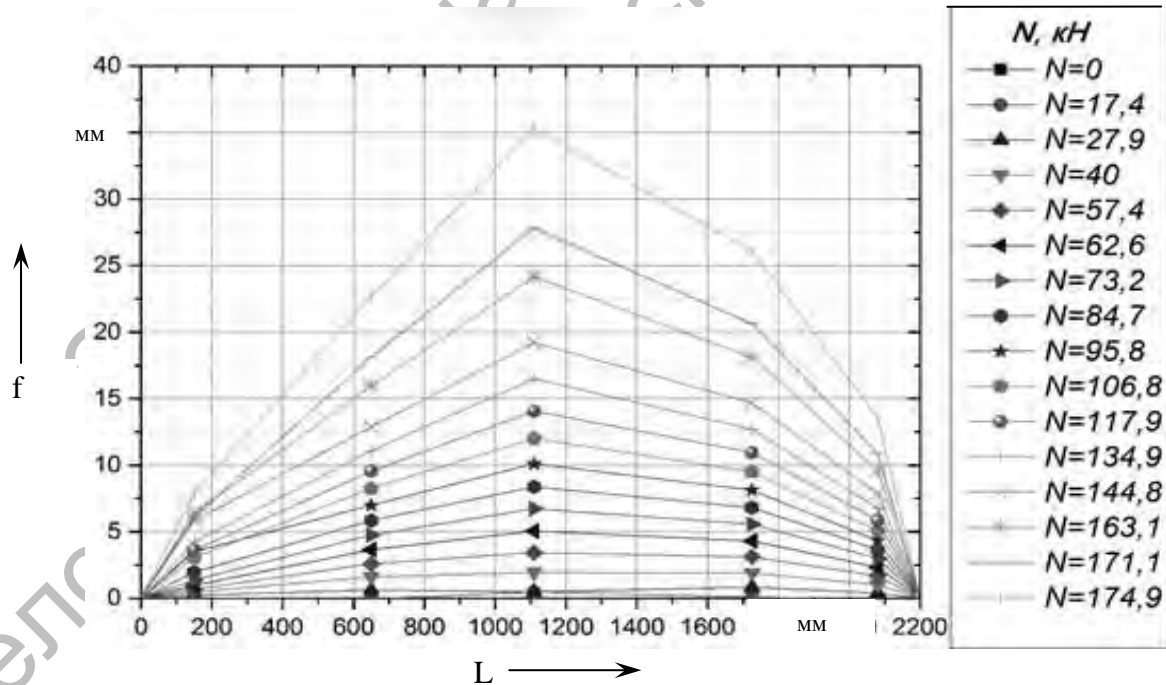


Рис. 4. Усредненные графики зависимости прогибов колонн КЗ-0.1 и КЗ-0.2 (а), КПС-1.3 и КПС-1.4 (б) по длине в зависимости от нагрузки

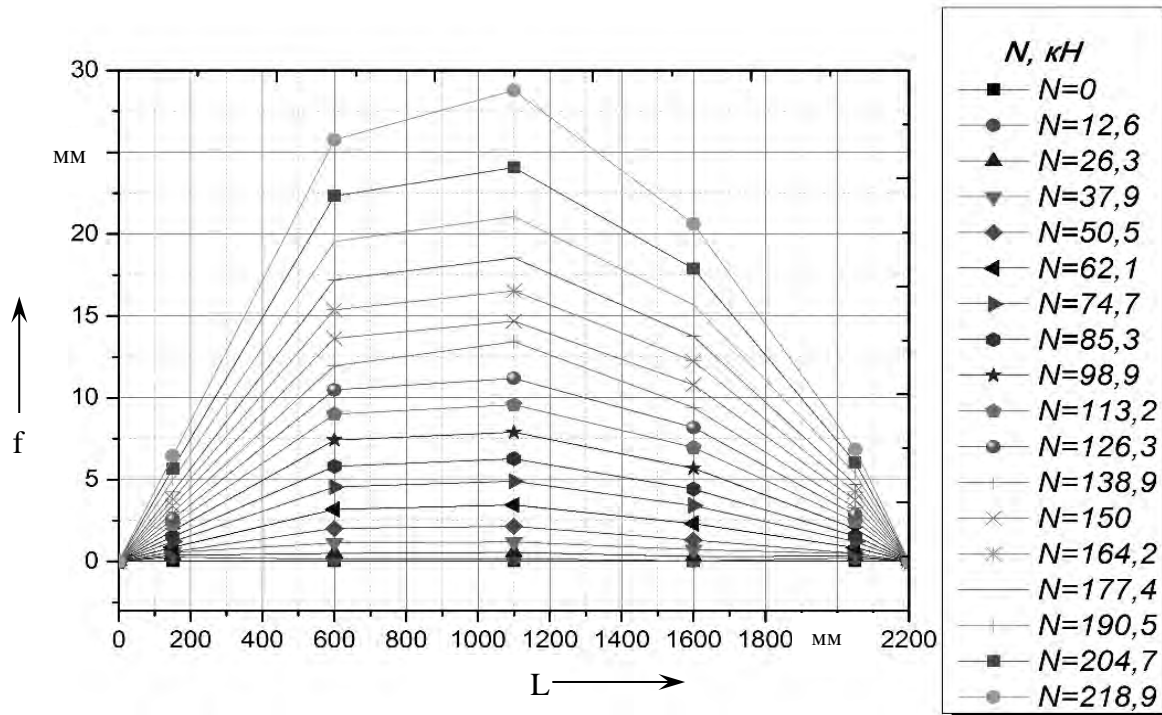


Рис. 5. Усредненные графики зависимости прогибов колонн КПС-2.11 и КПС-2.12 по длине в зависимости от нагрузки

а)



б)



в)

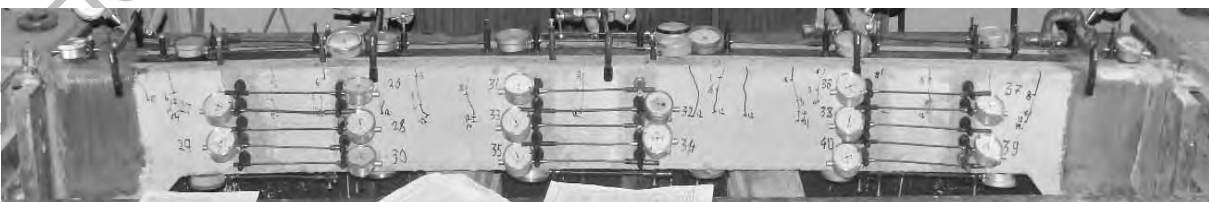


Рис. 6. Общий вид колонн КЗ-0.1 (а), КПС-1.3 (б), КПС-2.11 (в) при нагрузке 133 кН

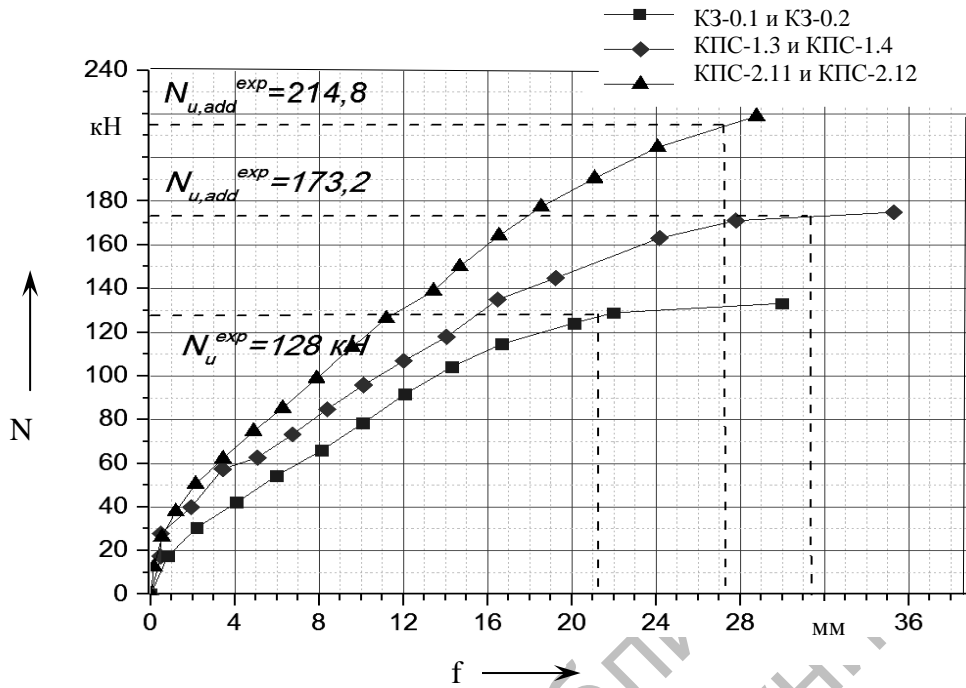


Рис. 7. Усредненные графики прогибов центрального прогибомера колонн КЗ-0.1 и КЗ-0.2, КПС-1.3 и КПС-1.4, КПС-2.11 и КПС-2.12

Табл. 1. Результаты прогибов экспериментальных образцов

N, кН	Прогиб серии колонн f, мм			Разница между КЗ-0 и КПС-1, мм	Разница между КЗ-0 и КПС-2, мм	Эффект увеличения жёсткости КПС-1, %	Средний эффект, %	Эффект увеличения жёсткости КПС-2, %	Средний эффект, %
	КЗ-0	КПС-1	КПС-2						
0	0	0	0	0	0	0	36,8	0	54,5
10	0,5	0,29	0,12	0,21	0,38	42,0		76,0	
20	1,07	0,49	0,32	0,58	0,75	54,2		70,1	
30	2,15	0,74	0,77	1,41	1,38	65,6		64,2	
40	3,75	1,95	1,32	1,8	2,43	48,0		64,8	
50	5,31	2,79	2,07	2,52	3,24	47,5		61,0	
60	7,01	4,23	3,22	2,78	3,79	39,7		54,1	
70	8,79	6,25	4,35	2,54	4,44	28,9		50,5	
80	10,3	7,68	5,58	2,63	4,73	25,5		45,9	
90	11,8	9,16	6,82	2,64	4,98	22,4		42,2	
100	13,5	10,8	7,99	2,74	5,55	20,2		41,0	
110	15,6	12,57	9,19	3,02	6,4	19,4		41,1	
120	18,6	14,35	10,38	4,21	8,18	22,7		44,1	
130	23,8	15,75	11,86	8,02	11,91	33,7		50,1	
133	30	16,21	12,42	13,77	17,56	45,9		58,6	

Из табл. 1 видно, что для образцов серии КПС-1 (усиленных лентой шириной 25 мм) больший эффект увеличения жёсткости наблюдался до уровня нагрузки 60 кН (ориентировочно 40...65 %). Средний эффект при погрузке 70...120 кН уменьшался и составлял 20...30 %. Далее на завершающих этапах нагружения, равного 120...133 кН, что соответствует разрушению неусиленных образцов КЗ-0, происходит интенсивное увеличение жёсткости усиленных колонн, а именно на 35...45 %.

В образцах серии КПС-2 (ширина ленты 50 мм) при нагрузках меньше 60 кН эффект повышения жёсткости составляет 55...75 %, что на 15...20 % больше, чем для образцов серии КПС-1, при нагрузке 70...120 кН – соответственно 40...50 %, что на 20 % больше, чем в КПС-1. На заключительных этапах нагрузки перед разрушением неусиленных колонн серии КЗ-0 эффект повышения жёсткости в образцах серии КПС-2 составлял 50...60 %, что на 15 % больше, чем в образцах серии КПС-1, усиленных лентой шириной 25 мм.

Средняя величина уменьшения прогибов опытных образцов внецентренно сжатых колонн и, соответственно, увеличения их жёсткости при использовании углеродной ленты шириной 25 мм составляла 36,8 %, а ленты шириной 50 мм – 54,5 %. Это подтверждает эффективность применения метода усиления с помощью материалов CFRP для увеличения жёсткости внецентренно сжатых колонн. Однако при увеличении внешнего армирования в усиленных образцах в 2 раза (50 мм по сравнению с 25 мм) достигается уменьшение прогиба колонн лишь в 1,5 раза.

Дополнительно проанализирован график на рис. 7. Отмечено, что в образцах, усиленных лентой шириной 25 мм (КПС-1), прогиб при исчерпании несущей способности ( $N_u^{\text{exp}} = 173,2$  кН) составлял 31,3 мм, что на 10,1 мм (47,6 %) больше прогиба неусиленных колонн КЗ-0

(21,2 мм) при  $N_u^{\text{exp}} = 128$  кН. При этом предельная нагрузка увеличилась на 35,3 % от 128,0 кН (серия КЗ-0) до 173,2 кН (серия КПС-1) [1].

Аналогично для образцов, усиленных лентой шириной 50 мм (КПС-2), предельный прогиб составлял 27,3 мм ( $N_u^{\text{exp}} = 214,8$  кН), что на 6,1 мм (28,8 %) больше прогиба неусиленных колонн КЗ-0 (21,2 мм). При этом предельная нагрузка увеличилась на 67,8 % от 128,0 кН (серия КЗ-0) до 214,8 кН (серия КПС-2) [1].

### Выводы

1. Экспериментальные исследования показали, что в усиленных углеродной лентой внецентренно сжатых колоннах достигается повышение жёсткости в сравнении с неусиленными образцами.

2. В усиленных углеродной лентой шириной 25 мм образцах при этапе нагрузки 0...60 кН эффект повышения жёсткости от усиления составлял 40...65 %, при нагрузке 70...120 кН – 20...30 %, при нагрузке 120...133 кН – 35...45 %. Средний эффект от усиления составил 36,8 %.

3. В усиленных углеродной лентой шириной 50 мм образцах при этапе нагрузки 0...60 кН эффект повышения жёсткости от усиления составлял 55...75 %, при нагрузке 70...120 кН – 40...50 %, при нагрузке 120...133 кН – 50...60 %. Средний эффект от усиления составил 54,5 %.

4. При увеличении внешнего армирования при усилении в 2 раза (50 мм по сравнению с 25 мм), уменьшение прогибов колонн происходит лишь в 1,5 раза, что необходимо учитывать для оптимального проектирования при усилении конструкций.

В колоннах, усиленных системой CFRP, предельная нагрузка, соответствующая предельным деформациям в арматуре, была больше соответственно на 35,3 % для серии КПС-1 и на 67,8 %



для серии КПС-2. При этом величины прогибов, соответствующие этим нагрузкам, были больше от неусиленных колонн для серии КПС-1 на 47,6 %, а

для серии КПС-2 на 28,8 %, что тоже подтверждает увеличение жёсткости конструкций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бліхарський, Я. З.** Міцність та деформативність зб колон, підсилених вуглецевою стрічкою / Я. З. Бліхарський, Р. Є. Хміль // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Сер. : Теорія і практика будівництва. – 2013. – № 755.
2. **Мельник, І. В.** Деформації зовнішньої композитної арматури при підсиленні залізобетонних балок / І. В. Мельник, А. Я. Мурин // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій : зб. наук. праць. – 2009. – № 8.
3. Міцність і деформативність залізобетонних мостових балок, підсилених неметалевою арматурою CFRP / В. Г. Кваша [и др.] // Актуальні проблеми будівництва та інженерії докiлля : VI Міжнар. наук. конф. – Львів, 2001.
4. **Борисюк, О. П.** Розрахунок несучої здатності нормальних перерізів зб згинальних елементів, підсилених композитною арматурою за дії малоциклових навантажень / О. П. Борисюк, О. П. Конончук // Рекомендації НУВГП. – Рівне, 2012.
5. **Хаютин, Ю. Г.** Применение углепластиков для усиления строительных конструкций / Ю. Г. Хаютин, В. Л. Чернявский, Е. З. Аксельрод // Бетон и железобетон. – 2002. – № 6.
6. **Шевчик, А.** Новые материалы фирмы Sika для усиления дорожных и мостовых объектов / А. Шевчик // Строительство и эксплуатация автомобильных дорог и мостов : материалы науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию белорусской дорожной науки. – Минск, 1998.
7. **ACI 440.2R-02.** Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures // American Concrete Institute», Farmington Hills. – 2002. – № 45.
8. Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures, by «EBR» working «party of FIB TG» 9.3 // FIB. – 2001. – № 14.
9. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures // Technical report fib. – 2001. – № 14.
10. Design Guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials (Second Edition) «The Concrete Society // The Concrete Society, Technical Report. – 2004. – № 55.
11. **Хаютин, Ю. Г.** Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами / Ю. Г. Хаютин, В. Л. Чернявский, Е. З. Аксельрод. – М., 2006.
12. Технология усиления композитными материалами Sika [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http : // ukr.sika.com](http://ukr.sika.com).

Статья сдана в редакцию 16 января 2014 года

**Ярослав Зиновьевич Бліхарський**, аспірант, Національний університет «Львівська політехніка». E-mail: yzb@ukr.net.

**Роман Євгенєвич Хміль**, канд. техн. наук, доц., Національний університет «Львівська політехніка». E-mail: roman\_hl@ukr.net.

**Yaroslav Zinovyevich Blikharskyy**, PhD student, National University Lviv Polytechnic. E-mail: yzb@ukr.net.

**Roman Yevgenyevich Khmil**, PhD (Engineering), Associate Prof., National University Lviv Polytechnic. E-mail: roman\_hl@ukr.net.