

С. С. МОРДОВСКИЙ
К. Б. ШАРАФУТДИНОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО АРМИРОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE INFLUENCE OF TRANSVERSE REINFORCEMENT
FOR STRENGTH OF COMPRESSED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

Анализируется влияние поперечного армирования, в том числе косвенного, на прочность сжатых железобетонных элементов. Данный вопрос возник в связи с возможностью повышения прочности коротких железобетонных элементов, нагруженных продольной силой с малыми в пределах сечения элемента эксцентриситетами. Для таких элементов может проявляться эффект обоймы, связанный с коэффициентом поперечных деформаций, величина которых является непосредственным фактором разрушения бетонного образца, и ограничение таковых непосредственно влияет на несущую способность образца в сторону увеличения. Рассмотрено влияние поперечного армирования в виде хомутов, расположенных с различным шагом, а также косвенного армирования в виде сеток с классической прямоугольной ячейкой и сеток типа «зигзаг».

Ключевые слова: железобетонные сжатые элементы, прямоугольное сечение, косвенное армирование, поперечное армирование, хомуты, арматурные сетки

Сжатые элементы представляют значительный сегмент конструкций в строительстве, исследованию которых посвящено множество научных работ [1–7].

В качестве экспериментальных образцов выбраны призмы с геометрическими размерами 150×150×600 мм. Гибкость и прогиб элемента при таких размерах не оказывает влияние на несущую способность образцов. В такой постановке прочность поперечного сечения можно отождествлять с несущей способностью опытного образца.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований в части прочности образцов магистров (Голубев М.А., Шарафутдинов К.Б., Васильева Е.Е.) направления подготовки 08.04.01 «Строительство», программа подготовки – «Теория и проектирование железобетонных конструкций». Данный профиль реализуется на кафедре железобетон-

The influence of transverse reinforcement, including indirect reinforcement, on the strength of compressed reinforced concrete elements is analyzed. This question arose in connection with the possibility of increasing the strength of short reinforced concrete elements loaded with a longitudinal force with small eccentricities within the section of the element. For such elements, the cage effect may appear, associated with the coefficient of transverse deformations, the magnitude of which is a direct factor in the destruction of the concrete sample, and the limitation of these directly affects the bearing capacity of the sample in the direction of increase. The influence of transverse reinforcement in the form of stirrups located with different spacing, as well as indirect reinforcement in the form of meshes with a classical rectangular cell and meshes of the “zigzag” type is considered.

Keywords: reinforced concrete compressed elements, rectangular section, indirect reinforcement, transverse reinforcement, clamps, reinforcing meshes

ных конструкций СамГТУ. Эксперименты проводились в Отраслевой научно-исследовательской лаборатории при кафедре строительных конструкций (с 01.09.2020 г. – кафедра железобетонных конструкций).

Все экспериментальные конструкции образцов испытывались на прессовом оборудовании П-250. Загружение осуществлялось однократное кратковременное с осевым приложением нагрузки. Помимо определения разрушающих нагрузок с помощью комплекса под названием ТК52, велось тензометрирование – определялись относительные деформации бетона и арматуры в процессе нагружения образцов, но в рамках данной статьи этот вопрос не освещается.

I. Образцы с поперечным армированием в виде хомутов (рис. 1)

Продольные арматурные стержни диаметром 12 мм из арматурной стали класса А500С

приварены к стальной пластине толщиной 6 мм. В первом варианте исполнения поперечная арматура отсутствует, данный образец изготавливается с целью оценки влияния только продольной арматуры на несущую способность колонны. Во втором и третьем вариантах армирования добавлены поперечные хомуты диаметром 6 мм из арматурной стали класса А400 с шагом 180 и 100 мм для оценки эффекта обоймы. В образцах второй серии добавлен один вариант армирования с шагом поперечных хомутов 50 мм. Соединение продольной и поперечной арматуры производится вязальной проволокой. Приварка арматурных стержней к металлическим пластинам необходима для обеспечения их проектного положения.

Геометрические характеристики экспериментальных образцов и прочностные показате-

ли материалов, из которых они изготовлены, представлены в табл. 1.

Разрушения армированных образцов происходили с выпучиванием продольных стержней и частичным разгибанием хомутов при их наличии в месте, где продольные стержни теряли устойчивость (рис. 2). При использовании сварных хомутов, а не вязаных, результаты прочности образца в эксперименте, возможно, оказались бы выше.

Основные выводы по применению поперечного армирования в виде замкнутых хомутов (Голубев М.А.):

1. Получены экспериментальные данные о напряжённо-деформированном состоянии и прочности коротких железобетонных колонн при значениях шага поперечного армирования от 4 до 15 диаметров рабочей продольной арматуры.

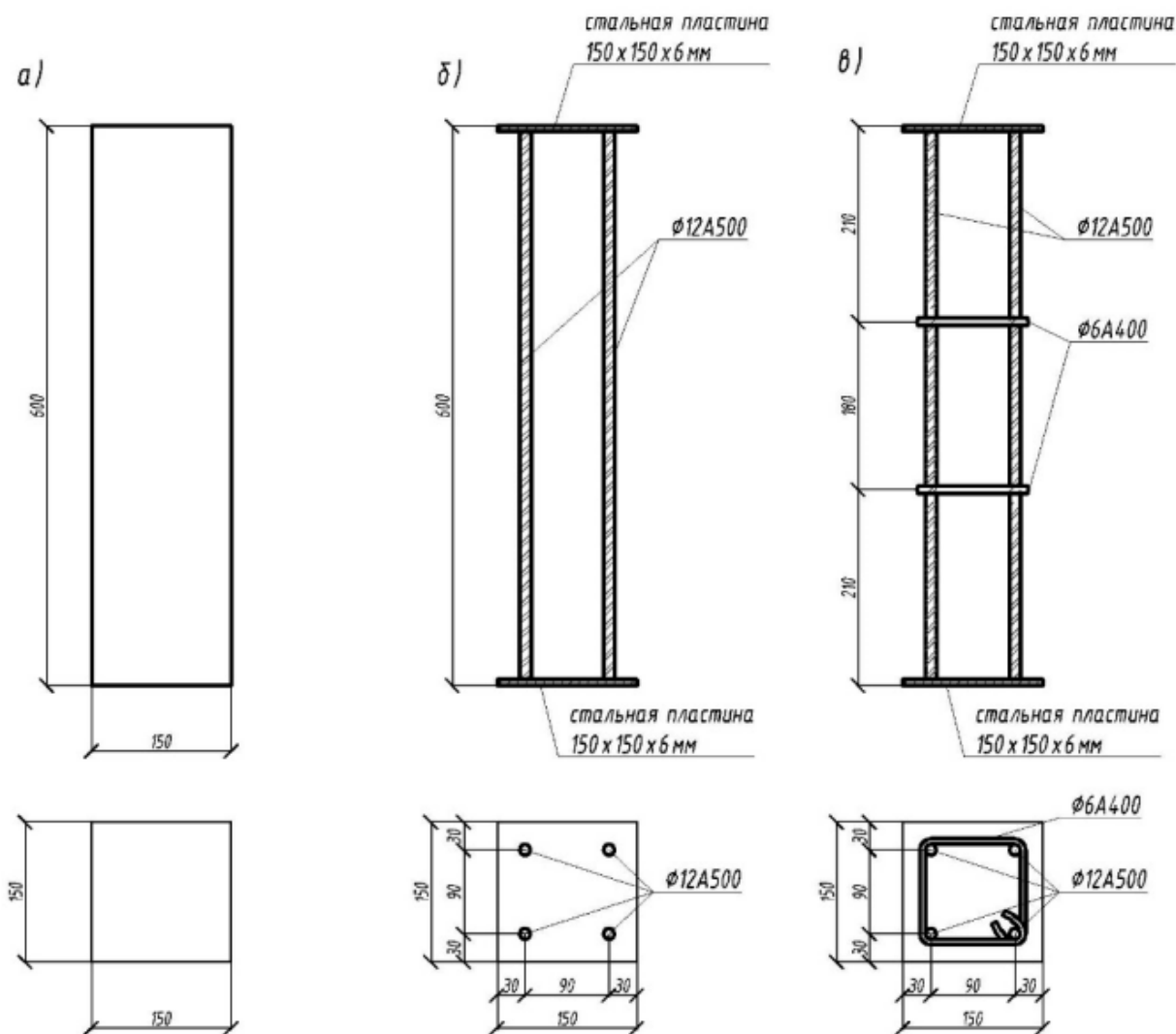


Рис. 1. Конструкция экспериментальных образцов с замкнутыми хомутами

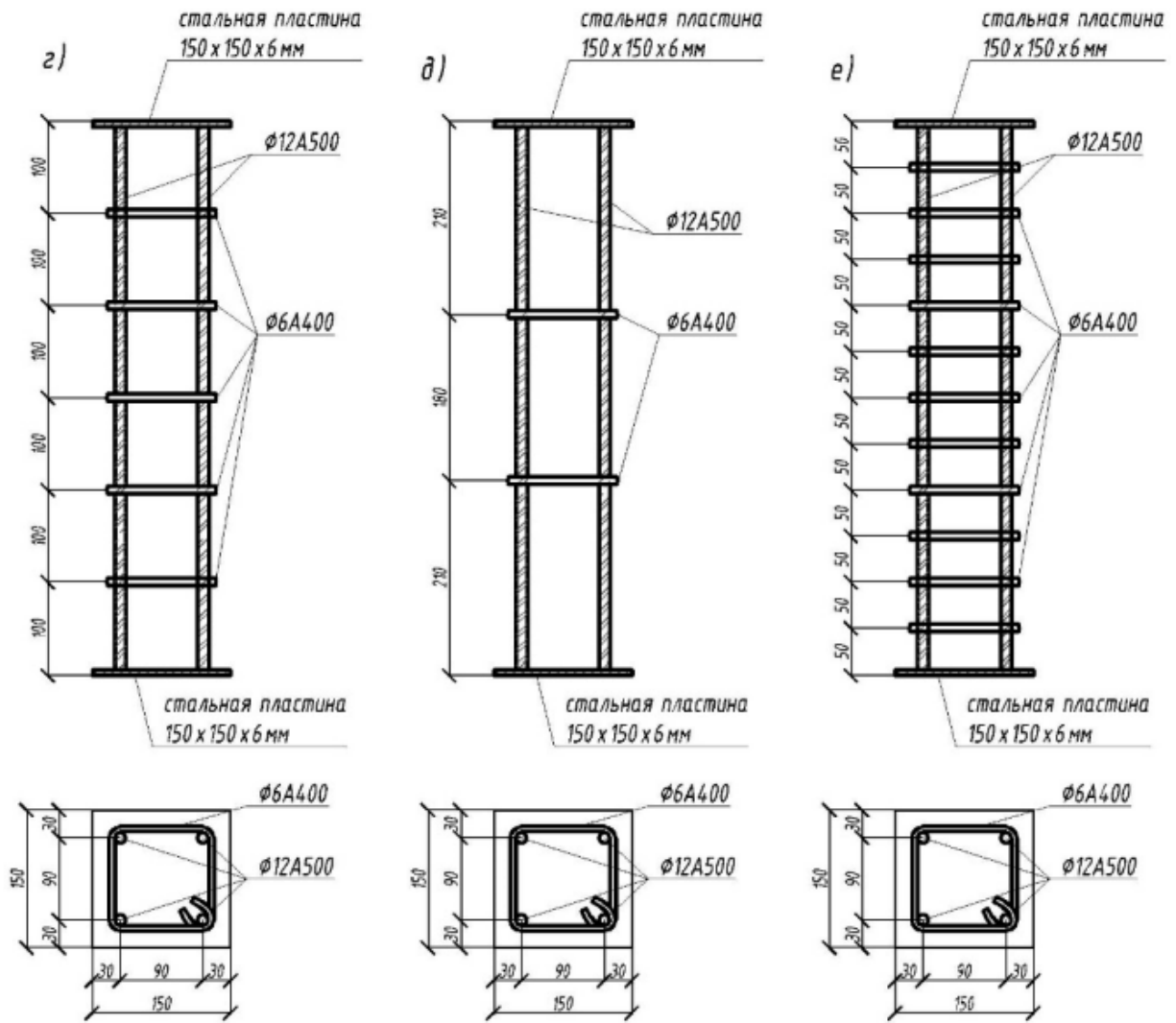


Рис. 1. (Окончание)

Таблица 1

Результаты испытаний образцов с поперечным армированием в виде замкнутых хомутов

Марка образца	Длина, мм	Высота сечения, мм	Ширина сечения, мм	Рабочая высота сечения, мм	R_b , МПа	$\sigma_{r, \text{MPa}}$ (Ø12A500)	$\sigma_{r, \text{MPa}}$ (Ø6A400)	A_{sc} , мм ²	Шаг хомутов, мм	N_{max} , кН
№ 1.1	600	151	151	-	33,15	-	-	-	-	975
№ 1.2	600	151	152	120		-	-	-	-	1300
№ 1.3	600	152	151	120		529,7	355	452	180	1300
№ 1.4	598	152	151	121		100			1300	
№ 2.1	600	150	151	120	29,96	529,7	355	452	180	900
№ 2.2	600	151	150	120					50	1095



Рис. 2. Экспериментальный образец после испытания

2. Максимально допустимый, согласно нормативным документам, шаг установки поперечных хомутов (15d) не оказывает влияния на несущую способность колонны. При значении шага установки поперечной арматуры величиной $8,3d$ прочность колонн также осталась неизменной.

3. В рамках проведенного эксперимента при значении шага установки поперечной арматуры $4,2d$ прочность (несущая способность) колонны увеличилась на 21,7 % относительно значения прочности в образце с шагом поперечного армирования согласно конструктивным требованиям свода правил (СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003 (с Изменением №1). Однако данные сведения не дают оснований распространять полученные результаты на другие конструкции в связи с отсутствием выборки необходимого объема, требуемой для получения статистических характеристик распределения.

4. Конечно-элементное моделирование опытных образцов в ПК Лира-САПР показало идентичность характера напряженно-деформированного состояния с проведенным натурным экспериментом. Значения отклонений прочности экспериментальных образцов, рассчитанных в ПК Лира-САПР, от опытных значений находятся в интервале от -17,2 до +0,8 %.

5. Сопоставление результатов экспериментальных исследований с расчетом прочности по своду правил (СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003) показало отклонения от -36,4 до -6,6 %.

6. При установке поперечных стержней в колоннах с шагом, согласно конструктивным требованиям СП 63.13330.2018, учёт влияния поперечного армирования при расчете прочности (несущей способности) колонн не требуется.

II. Образцы с поперечным армированием в виде сеток типа «зигзаг» (рис. 3–5).

Сетка «зигзаг» чаще всего используется для армирования каменной кладки, однако тема данного исследования предполагает исследование использования этой сетки в сжатых железобетонных элементах вообще.

Преимуществом применения сеток «зигзаг» в кладке является возможность их выполнения из относительно толстой арматурной проволоки диаметром 4–10 мм, поскольку в них нет тех узлов, которые создают подпирающие точки в перекрестных сетках. Толщина шва раствора, в которой закладываются сетки «зигзаг», остается нормальной и не требует увеличения при диаметрах проволок 8 мм и менее. Однако в железобетонных конструкциях данное преимущество не играет никакой роли.

Для армирования образцов (рис. 3) использовалась проволока Вр-1 (ГОСТ 6727-80. Проволока из низкоуглеродистой стали холодноотянутая для армирования железобетонных конструкций. Технические условия (с Изменениями № 1-4), из которой гнулись сетки (рис. 4). Закрепление сеток в опалубке осуществлялось путём обвязки сеток с четырьмя продольными проволоками (рис. 3) из того же материала, как и сами сетки. В результате образовывался гибкий пространственный каркас, который затем помещался в стандартную стальную опалубку.

Было выполнено две серии образцов по причине недостаточного уплотнения бетонной смеси на некоторых образцах первой серии (Оз.1.2), что наглядно было видно на срезе поверхности призмы после разрушения образцов.

Геометрические характеристики экспериментальных образцов с поперечным армированием в виде сеток типа «зигзаг» и прочностные показатели материалов, из которых они изготовлены, представлены в табл. 2.

Анализируя результаты определения прочности образцов первой серии, выявлено увеличение прочности на 7 % и уменьшение поперечных и продольных деформаций в образцах с арматурой в виде сетки «зигзаг».

Согласно результатам эксперимента, наличие арматуры с сеткой «зигзаг» в образцах

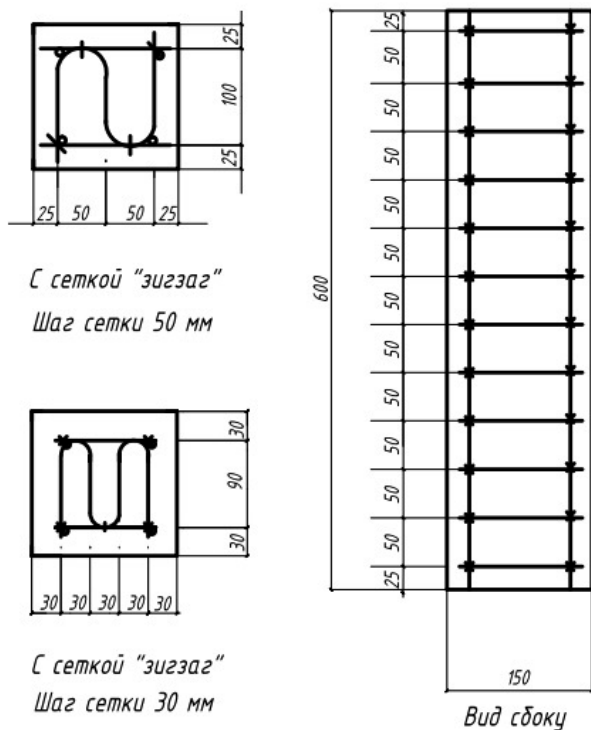


Рис. 3. Параметры сеток «зигзаг» для эксперимента

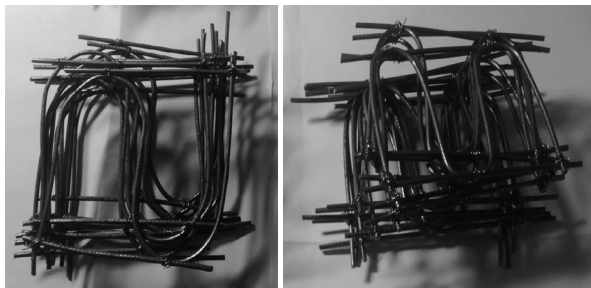


Рис. 4. Элементы для сборки каркаса из сеток «зигзаг»

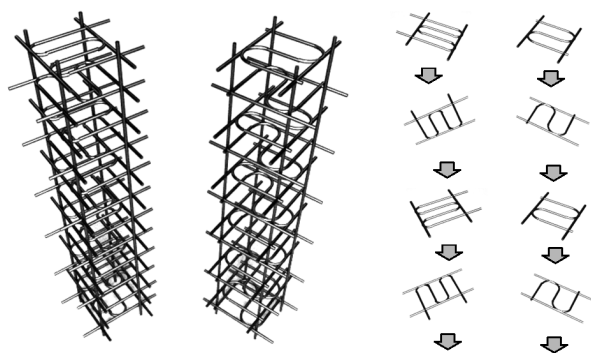


Рис. 5. 3D-модель армирования образцов сетками «зигзаг»

второй серии дает увеличение прочности на 14–17 %. Анализируя показания тензометрических датчиков образцов второй серии, можно увидеть, что применение сетки «зигзаг» с размером ячейки 50 мм значительно уменьшает поперечные и продольные деформации образцов, чем сетки «зигзаг» с размером ячейки 30 мм. Напряжения в бетоне достигали больших значений при приложении равной нагрузки именно у образца с меньшим размером ячейки сетки.

Основные выводы по результатам исследования образцов с поперечным армированием в виде сеток типа «зигзаг» (Шарафутдинов К.Б.):

1. Получены экспериментальные данные о влиянии армирования сеткой «зигзаг» на прочность коротких железобетонных колонн.
2. Наличие арматуры с сеткой «зигзаг» дает увеличение прочности на 7–17 % относительно неармированного элемента, а также, создавая эффект «обоймы», уменьшает поперечные и продольные деформации образцов.
3. Использование сетки «зигзаг» позволяет сэкономить 12–22 % объема и стоимости арматуры при установке её вместо прямоугольной сетки с теми же параметрами ячеек.

III. Образцы с поперечным армированием в виде классических сеток с прямоугольной ячейкой (рис. 6, 7)

Косвенное армирование является одним из способов повышения прочностных и деформационных характеристик железобетонных конструкций. Такое армирование, расположенное перпендикулярно сжимающему усилию, за счет ограничения поперечных деформаций создает объемное напряженное состояние и повышает эффективность работы бетона на сжатие.

Косвенное армирование названо так, поскольку воспринимает не продольные напряжения в бетоне, а поперечные, вызванные продольными деформациями.

Следуя такому определению, необходимо разграничить косвенное и поперечное армирование, а именно определить, что косвенное армирование является поперечным, но, как правило, под своим определением подразумевает более мощное армирование, призванное непосредственно воспринимать поперечные деформации бетона. Под поперечным армированием обычно подразумевают его назначение из конструктивных соображений, а именно: «Поперечную арматуру следует устанавливать исходя из расчета на восприятие усилий, а также в целях ограничения развития трещин, удержания продольных стержней в проектном положении и закрепления их от

Таблица 2

Результаты испытаний образцов с поперечным армированием в виде сеток типа «зигзаг»

Марка образца	Длина, мм	Высота сечения, мм	Ширина сечения, мм	$R_{p, MPa}$	σ_{br}, MPa ($\varnothing 3Bp-1$)	Разрывное усилие арм., кН	A_s, mm^2 ($\varnothing 3Bp-1$)	Шаг сеток, мм	$N_{max}, кН$
Оз. 1.1	600	150	150	28,88	-	-	-	-	650
Оз. 1.2	600	150	150		819	5,67	6,92	50	400
Оз. 1.3	600	150	150				6,92	30	700
Оз. 2.1	600	150	150	17,02	-	-	-	-	383
Оз. 2.2	600	150	150		744	4,79	6,44	50	450
Оз. 2.3	600	150	150				6,44	30	437

бокового выпучивания в любом направлении» (СП 63.13330.2018).

Сетки с квадратной ячейкой, применяемые в конструкциях экспериментальных образцов, выполнялись вязаными, что в конечном счёте сказалось на не столь большом повышении прочности на осевое сжатие относительно образцов без косвенного армирования.

Геометрические характеристики экспериментальных образцов с поперечным армированием в виде классических сеток с прямоугольной ячейкой и прочностные показатели материалов, из которых они изготовлены, представлены в табл. 3.

Образцы с маркировкой Оп.1.1* и Оп.2.1* в табл. 3 это те же образцы, что и Оз.1.1 и Оз.2.1 в табл. 2 соответственно. Эксперимент проводился совместно.

Основные выводы по результатам исследования образцов с поперечным армированием в виде классических сеток с прямоугольной ячейкой (Васильева Е.Е.):

1. При использовании косвенного армирования в виде сеток с прямоугольной ячейкой прочность сжатого железобетонного элемента увеличивается:

- для элементов с ячейкой 30x30 с шагом 50 мм – на 7–20 %;
- для элементов с ячейкой 50x50 с шагом 50 мм – на 14 %.

2. В случае применения сварных сеток с квадратной ячейкой, а не вязаных, возможно, удалось бы повысить прочность образцов несколько больше.

3. Установка сеток с прямоугольной ячейкой является эффективным вариантом косвен-

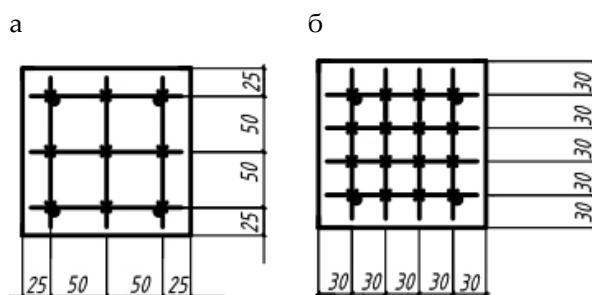


Рис. 6. Сетки с прямоугольной ячейкой: а – ячейка размером 50x50 мм; б – ячейка размером 30x30 мм

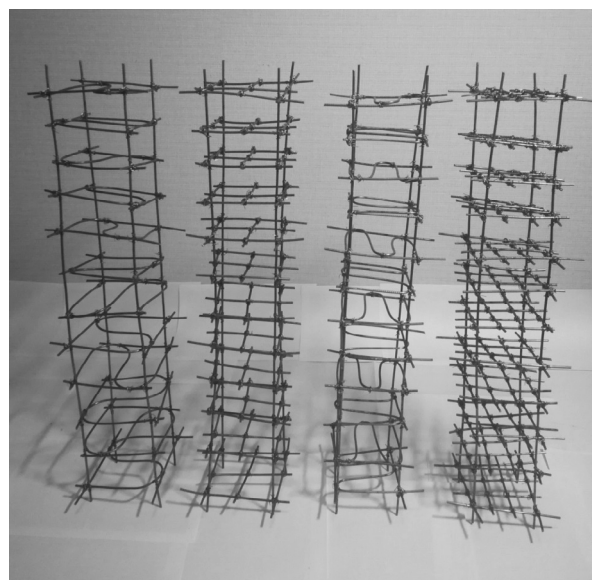


Рис. 7. Готовые арматурные каркасы (второй и четвёртый)

Таблица 3

Результаты испытаний образцов
с поперечным армированием в виде классических сеток с прямоугольной ячейкой

Марка образца	Длина, мм	Высота сечения, мм	Ширина сечения, мм	$R_{p, MPa}$	$\sigma_{\text{в}}, MPa$	$A_{\text{в}}, мм^2$	Диаметр проволоки, мм	Размер ячейки, мм	$N_{\text{max}}, кН$
Оп. 1.1*	600	150	150	28,88	-	-	-	-	650
Оп. 1.2	600	150	150		765,9	6,92	3	50	350
Оп. 1.3	600	150	150					30	700
Оп. 2.1*	600	150	150	17,02	-	-	-	-	383
Оп. 2.2	600	150	150		758,8	6,315	3	50	450
Об. 2.3	600	150	150					30	475

ного армирования сжатых железобетонных элементов.

Выводы. 1. Получены экспериментальные данные о влиянии различных вариантов поперечного армирования (в том числе косвенного) на прочность коротких железобетонных колонн.

2. При установке поперечных стержней в колоннах, согласно конструктивным требованиям свода правил (СП 63.13330.2018), поперечное армирование в виде замкнутых гнутых хомутов не оказывает влияния на прочность (несущую способность) коротких колонн.

3. При значении шага установки поперечной арматуры в виде замкнутых хомутов 4,2d на образцах второй серии зафиксировано повышение прочности на 21,7 % относительно значения прочности в образце с шагом поперечного армирования согласно конструктивным требованиям.

4. Косвенное армирование сеткой типа «зигзаг» позволило увеличить прочность образца на 7–17 % относительно неармированного элемента, а также уменьшило его поперечные и продольные деформации.

5. Косвенное армирование в виде сеток с прямоугольной ячейкой, расположенных с шагом 50 мм по высоте, позволило увеличить прочность сжатого железобетонного элемента:

а) для элементов с ячейкой 30x30 – на 7–20 %;

б) для элементов с ячейкой 50x50 – на 14 %.

6. Использование в качестве косвенного армирования сетки «зигзаг» позволило уменьшить массу использованной арматуры на 12–22 % в сравнении с образцами аналогичной

прочности, армированными сетками с прямоугольной ячейкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мурашкин Г.В., Мордовский С.С. Применение диаграмм деформирования для расчёта несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов // Жилищное строительство. 2013. №3. С. 38–40.

2. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. К расчёту прочности, жёсткости и трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 4 (26). С. 113–120.

3. Труш А.И., Ламзин Д.А., Лобов Д.М., Вахотин А.Н., Кузнецов С.И. Экспериментальная оценка влияния типа поперечного армирования на несущую способность коротких железобетонных колонн // Приволжский научный журнал. 2019. № 2. С. 25–34.

4. Гнедовский В.И. Косвенное армирование железобетонных конструкций. Л.: Стройиздат, Ленингр. отделение, 1981. 128 с.

5. Тихонов И.Н. Армирование элементов монолитных железобетонных зданий: пособие по проектированию. М.: Строительство, 2007. 168 с.

6. Аксенов В.Н., Аксенов Н.Б., Блягоз А.М., Хутыз А.М. Исследование работы сжатых железобетонных элементов из высокопрочного бетона // Новые технологии. 2012. № 4. С. 32–35.

7. Груздев Р.В. Результаты экспериментальных исследований моделей железобетонных колонн на сжатие с кручением // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6(2). С. 355–358.

REFERENCES

1. Murashkin G.V., Mordovsky S.S. Application of deformation diagrams for calculating the bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete elements. *Zhilishhnoe stroitel'stvo* [Housing construction], 2013, no 3, pp. 38-40. (in Russian)
2. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaikin O.V. Calculation of strength, stiffness and crack resistance of eccentrically compressed reinforced concrete elements using non-linear deformation model. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [News of the Kazan State University of Architecture and Engineering], 2013, no 4 (26), pp. 113-120. (in Russian)
3. Trush L.I., Lamzin D.A., Lobov D.M., Vakhotin A.N., Kuznetsov S.I. Experimental estimate of influence of the type of transverse reinforcement on the bearing capacity of short reinforced concrete columns. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Volga Scientific Journal], 2019, no. 2, pp. 25-34. (in Russian)
4. Gnedovsky V.I. *Kosvennoe armirovanie zhelezobetonnykh konstruktsiy* [Confinement reinforcement of reinforced concrete structures]. Leningrad, Stroyizdat, Leningr. otdelenie, 1981. 128 p.
5. Tikhonov I.N. *Armirovanie elementov monolitnykh zhelezobetonnykh zdaniy* [Reinforcement of elements of monolithic reinforced concrete buildings]. Moscow, Stroitelstvo, 2007. 168 p.
6. Aksyonov V.N., Aksyonov N.B., Blyagoz A.M., Khutyz A.M. Research of the work of compressed concrete elements of durable concrete. *Novye tekhnologii* [New technologies], 2012, no. 4, pp. 32-35. (in Russian)
7. Gruzdev R.V. Results of experimental researches of models of reinforced concrete columns on compression and torsion. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2013, Vol. 15, no. 6(2), pp. 355-358. (in Russian)

Об авторах:

МОРДОВСКИЙ Сергей Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных конструкций Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, тел. (846)339-56-35 E-mail: qaer1@yandex.ru

ШАРАФУТДИНОВ Камил Булатович

аспирант кафедры строительных конструкций и вычислительной механики Пермский национальный исследовательский политехнический университет 614030, Россия, г. Пермь, ул. Куйбышева, 109

MORDOVSKIY Sergey S.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Reinforced Concrete Structures Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244, tel. (846)339-56-35 E-mail: qaer1@yandex.ru

SHARAFUTDINOV Kamil B.

Postgraduate Student of the Building Structures and Computational Mechanics Chair Perm National Research Polytechnic University 614030, Russia, Perm, Kuybysheva str., 109

Для цитирования: Мордовский С.С., Шарафутдинов К.Б. Экспериментальные исследования по изучению влияния поперечного армирования на прочность сжатых железобетонных элементов // Градостроительство и архитектура. 2020. Т.10, № 4. С. 21–28. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.04.3.

For citation: Mordovskiy S.S., Sharafutdinov K.B. Experimental Studies on the Influence of Transverse Reinforcement for Strength of Compressed Reinforced Concrete Elements. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2020, vol. 10, no. 4, Pp. 21-28. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2020.04.3.