

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ БЕЗ СЦЕПЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПРИ ПРОДАВЛИВАНИИ

Т.Р. Баркая, А.В. Гавриленко, В.В. Федоров, П.В. Куляев
Тверской государственной технической университет (г. Тверь)

© Баркая Т.Р., Гавриленко А.В.,
Федоров В.В., Куляев П.В., 2020

Аннотация. В статье представлены результаты испытаний на продавливание образцов-плиток, моделирующих преднапряженные железобетонные плиты перекрытий при их продавливании колоннами. Приведены геометрические размеры образцов-плиток, а также данные по прочностным характеристикам использованных материалов. Всего рассматривались 4 серии образцов, отличавшихся уровнем предварительного обжатия. Нагружение проводилось штампами нескольких типоразмеров, что позволило реализовать различные варианты расположения напрягаемой арматуры относительно пирамиды продавливания. Дано обоснование полученным в исследовании результатам и приведены рекомендации, соблюдение которых позволит получить при продавливании положительный эффект от обжатия плит арматурой без сцепления с бетоном.

Ключевые слова: железобетон, постнапряжение, напряжение без сцепления, продавливание.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-6-14

ВВЕДЕНИЕ

С ростом пролетов эффективность применения обычных железобетонных плит перекрытий в зданиях монолитной конструктивной системы снижается – необходимо увеличивать их толщину и армирование. При пролетах более семи метров, как правило, необходимо устройство балочных перекрытий или применение капителей, которые усложняют производство опалубочных и арматурных работ, а в дальнейшем требуют устройства тех или иных потолочных отделочных систем.

Одним из оптимальных способов улучшения эксплуатационных свойств железобетонных плит перекрытий является их предварительное напряжение в условиях строительной площадки – постнапряжение [1]. В этом случае удается уменьшить толщину перекрытий, снизить расход обычной ненапрягаемой арматуры, отказаться от использования балочных систем и капителей. Однако остается не до конца выясненным вопрос прочности стыков постнапряженных плит с колоннами при продавливании [2].

За рубежом по данной теме был выполнен ряд экспериментальных и аналитических исследований. В статье [3], содержащей, помимо прочего, краткий обзор результатов нескольких весьма крупных экспериментальных изысканий, показано, что предельная сила среза увеличивается с ростом величины среднего преднапряжения. Кроме того, прочность постнапряженных плит при срезе увеличивается при постановке в их верхней зоне над колонной стержней обычной ненапрягаемой арматуры. Результаты экспериментальных исследований легли в основу американского нормативного документа по расчету и проектированию железобетонных конструкций ACI 318 [1].

В нашей стране постнапряженные плиты перекрытий в силу разных причин к настоящему времени еще не получили достаточного распространения, что обуславливает низкий интерес к их изучению со стороны исследователей [1]. В статье [5] упомянуто, что обжатие бетона плиты в зоне колонн благоприятно влияет на прочность перекрытия при

продавливании. Однако в данный момент не удается найти достаточных отечественных экспериментальных обоснований по работе стыка постнапряженной плиты с колонной при продавливании [2, 6].

В связи с изложенным представляются целесообразными выполнение экспериментального исследования прочности при продавливании ряда образцов плит, напряженных арматурой без сцепления, и сопоставление полученных результатов с прочностью при продавливании плит без напрягаемой арматуры.

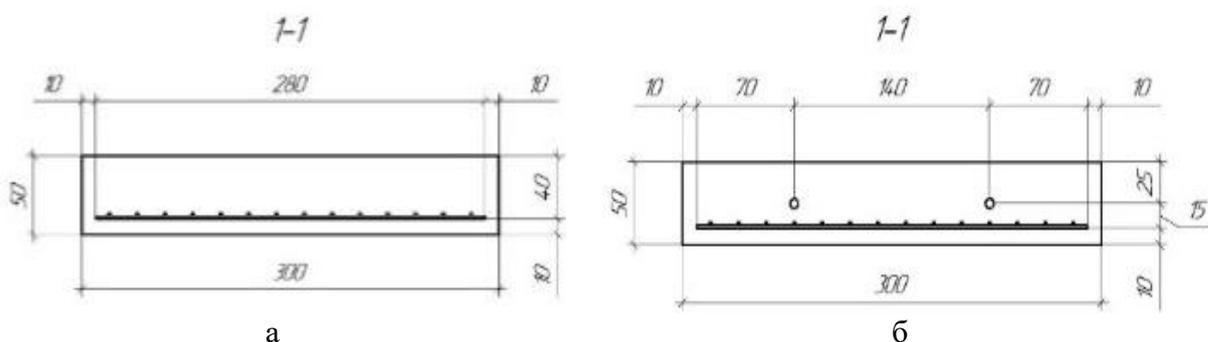
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Из бетона с параметрами, соответствующими классу В30, были изготовлены масштабные образцы-модели плит с размерами в плане 300×300 мм и толщиной 50 мм [2]. Всего было изготовлено 4 серии образцов по 3 плиты в каждой. Все серии имели ненапрягаемое армирование в нижней зоне в виде сварной неоцинкованной сетки из проволоки диаметром 2 мм с ячейкой размером 25 мм. Напрягаемая арматура плит серий 2–4 моделировалась шпильками $\varnothing 6$ мм из нержавеющей стали класса А4. Прочность шпилек при испытании на разрыв оказалась равной 18,6 кН.

Образцы серии 1 были эталонными и армировались только сварной сеткой. Серии 2–4 отличались между собой количеством стержней напрягаемой арматуры: в плиты серии 2 устанавливались 2 стержня только в одном направлении; в плиты серии 3 устанавливались 4 стержня – 2 стержня в продольном направлении и 2 стержня в поперечном; в плитах серии 4 было установлено всего 8 напрягаемых стержней по 4 стержня в продольном и поперечном направлениях. Чертежи образцов плит каждой серии приведены на рис. 1.

Для формования плиток была изготовлена опалубка из фанеры, внутри которой были размещены пластиковые оболочки-кембрики, надетые на жесткие стальные стержни, в количестве, предусмотренном принятой программой испытаний. При извлечении формовочных стальных стержней из кембриков после затвердевания бетона в плитках оставалось отверстие для пропуска напрягаемых шпилек.

Усилие обжатия создавалось при помощи растяжения шпилек в машине ИР-500 и дальнейшей фиксации их в растянутом состоянии путем накручивания усиленных гаек из нержавеющей стали. Усилие растяжения каждой шпильки составляло 14,71 кН, при этом их удлинение достигало 30...40 мм. Для исключения смятия бетона под торцом гайки между ним и бетоном плиты размещалась полоска из стали толщиной 4 мм и шайба.



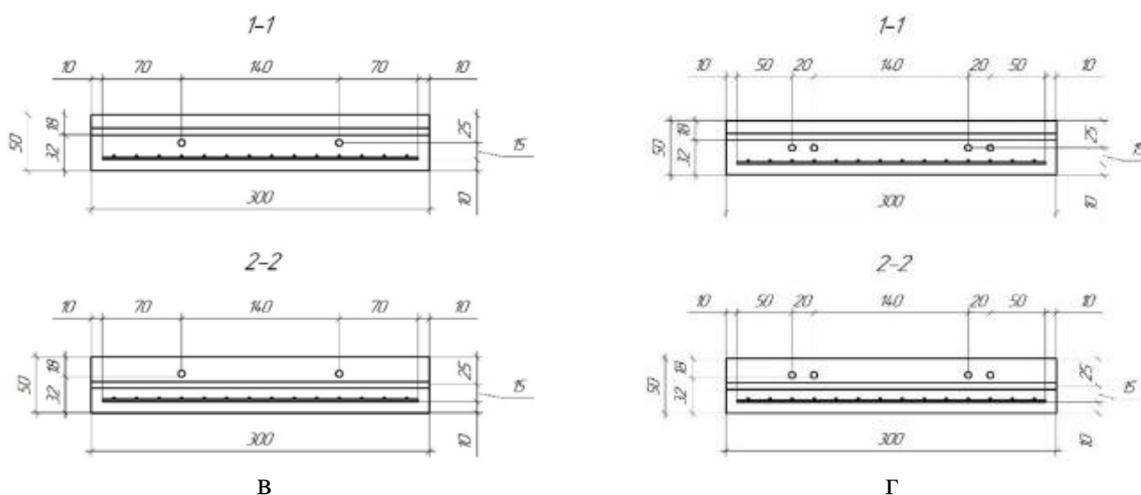


Рис. 1. Чертежи образцов плит: а – серии 1; б – серии 2; в – серии 3; г – серии 4

Уровень предварительного обжатия образцов различных серий, в зависимости от количества напрягаемых стержней, варьировался в пределах от 2 до 4 МПа.

При проведении испытаний варьируемыми параметрами, кроме наличия и величины предварительного обжатия, являлись также форма и размер штампа. Всего рассматривались три штампа, два из которых были квадратными и один круглый. Квадратный штамп № 1 имел размеры в плане 50×50 мм, квадратный штамп № 2 – 100×100 мм, а круглый штамп № 3 имел диаметр 140 мм.

В процессе испытаний первый из трех образцов каждой из четырех рассматриваемых серий подвергался силовому воздействию, передаваемому на него от штампа № 1, второй образец – воздействию от штампа № 2 и третий образец – от штампа № 3 соответственно.

Следует также заметить, что при проведении испытаний под образцы плит подкладывалась фанера с вырезанным в середине нее отверстием. Форма отверстий под испытания штампами № 1 и 2 была квадратной, а для штампа № 3 – круглой. Штampu № 1 соответствовало отверстие размерами 130×130 мм, штампу № 2 – 180×180 мм, а штампу № 3 – Ø220 мм. Отверстия в фанере-основании были выполнены после проведения предварительных экспериментальных исследований, которые показали, что нагружение плит, расположенных на сплошном фанерном основании, приводит к их разрушению от изгиба, а не от продавливания. Размеры отверстий подобраны таким образом, чтобы пирамида продавливания получалась с углом наклона граней порядка 45, принятом в действующих в РФ нормативах.

Испытания проводились на прессе ИП-1000 в лаборатории кафедры конструкций и сооружений.

Принятые размеры плит, штампов и отверстий в фанере позволяют реализовать следующие случаи нагружения образцов:

при штампе № 1 стержни преднапряженной арматуры будут обжимать пирамиду продавливания за ее границами;

штампе № 2 стержни предварительно напряженной арматуры расположены на границе пирамиды продавливания;

штампе № 3 стержни предварительно напряженной арматуры расположены в границах конуса продавливания.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

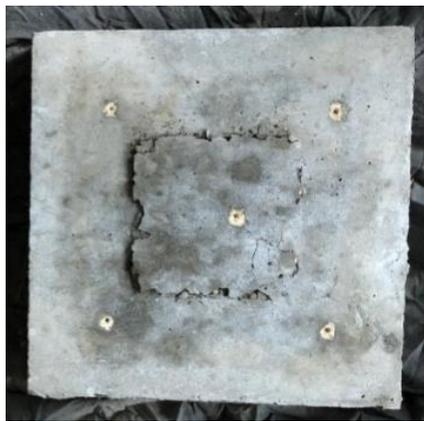
Результаты испытания описанных серий плит по принятым схемам сведены в таблицу.

Результаты экспериментальных испытаний

Серия плит	Разрушающая нагрузка при нагружении штампом, кН
------------	---

	№ 1	№ 2	№ 3
1	65,2	80,83	71,0
2	57,5	68,00	68,9
3	53,8	67,30	67,0
4	51,3	52,9	65,4

При разрушении образцов плиток всех серий при их нагружении через штамп № 1 была получена вполне отчетливая пирамида продавливания. На рис. 2 приведен характер разрушения плит серий 1 и 4 при их нагружении через штамп № 1.



а



б

Рис. 2. Разрушение образцов при нагружении через штамп № 1: а – серии 1; б – серии 4

При нагружении плит серии 1 штампом № 2 разрушение произошло по пирамиде продавливания с углом граней, почти равным 45° (рис. 3а). Пирамида продавливания в плитах серий 2 и 4 оказалась с углами граней, отличающимися от 45° (рис. 3б, в, г).

Пирамиды продавливания образцов серий 1 и 2 при их нагружении круглым штампом № 3 приведены на рис. 4а и б соответственно.



а



б



в



г

Рис. 3. Разрушение образцов при нагружении через штамп № 2: а – серии 1; б – серии 2; в – серии 4, общий вид; г – серии 4, вид сверху



а



б

Рис. 4. Разрушение образцов при нагружении через штамп № 3: а – серии 1; б – серии 2

По данным таблицы следует, что при испытаниях плит всех серий тремя рассматриваемыми типами штампов с увеличением количества предварительно напряженных стержней повышения несущей способности при продавливании не наблюдалось.

В случае нагружения плит штампом № 2 наблюдавшееся в эксперименте снижение прочности при увеличении предварительного обжатия можно объяснить тем, что напрягаемые стержни находились на наклонной грани пирамиды продавливания, тем самым оказалась уменьшена площадь бетона в сечении и, напротив, возникли локальные концентраторы напряжений в виде отверстий под напрягаемую арматуру.

В случае испытания плит штампом № 3 снижение несущей способности при продавливании с ростом обжатия могло иметь сходную причину: защитный слой бетона между границей продавливания и предварительно напряженными стержнями мог оказаться недостаточным, в результате чего стержни фактически «прорезали» пирамиду продавливания, что можно видеть на рис. 4б.

В случае испытаний штампом № 1 наблюдавшееся снижение несущей способности может свидетельствовать о том, что отверстия под предварительно напряженные стержни, будучи расположенными даже за границами пирамиды продавливания, оказывают определенный негативный эффект на несущую способность плит, ослабляя их бетон.

Чтобы установить, какое влияние оказывают отверстия в бетоне на несущую способность плит при продавливании, был испытан один дополнительный образец серии 4 с восемью отверстиями без предварительного напряжения. Его разрушение при нагружении штампом № 1 произошло при нагрузке в 46,5 кН, что менее разрушающей нагрузки аналогичного предварительно напряженного образца, равной 51,3 кН. Из этого опыта отчетливо следует, что обжатие плит стержнями, расположенными за границами

теоретически ожидаемой пирамиды продавливания, оказывает положительное влияние на их несущую способность при продавливании на уровне порядка 10 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При испытании описанных плит, предварительно напряженных арматурой без сцепления, создающей обжатие бетона на уровне порядка 2...4 МПа, повышения их несущей способности зафиксировано не было. Напротив, с ростом количества напрягаемой арматуры и, соответственно, уровня обжатия, наблюдалось снижение предельной продавливающей силы. По мнению авторов, наблюдавшееся поведение образцов может объясняться рядом некорректных решений, принятых на стадии разработки программы экспериментального исследования: оказался некорректно выбран масштабный фактор, в результате чего отверстия под стержни напрягаемой арматуры существенно ослабили бетон, особенно в случаях, когда стержни проходили по грани пирамиды продавливания или внутри нее; предварительное напряжение, несомненно, создающее положительный эффект по увеличению несущей способности плит при продавливании, в проведенном опыте не смогло компенсировать негативного эффекта, вызванного ослаблением сечения отверстиями для арматуры; центры тяжести предварительно напряженных стержней в рассмотренных плитах находились на расстоянии 15...25 мм от наиболее растянутой грани, что не позволило обжатию должным образом повлиять на развитие напряжений в растянутой части сечений.

По результатам проведенных исследований можно дать следующие рекомендации по конструктивным мероприятиям, соблюдение которых позволит получить положительный эффект от преднапряжения при продавливании: должен быть создан достаточно высокий уровень обжатия бетона (равный или более 4 МПа); предварительно напряженная арматура должна размещаться в наиболее растянутой зоне бетона; не следует допускать расположения стержней напрягаемой без сцепления арматуры в зонах, граничащих с боковыми поверхностями пирамиды продавливания.

В целом рассмотренный вопрос представляется весьма актуальным и требующим дальнейшей экспериментальной и теоретической проработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гавриленко А.В., Абдуллина Ю.Р., Баркая Т.Р. Особенности технологии преднапряжения железобетонных конструкций в условиях производства строительно-монтажных работ // *Саморазвивающаяся среда технического вуза: научные исследования и экспериментальные разработки: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции*. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2020. С. 72–78.
2. Бровкин А.В., Митин М.А., Юлленен С.И. Вопросы расчетной прочности предварительно напряженных железобетонных плит на продавливание // *Международный студенческий строительный форум – 2018 (к 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова): сборник докладов: в 2 т.* Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2018. Т. 1. С. 35–40.
3. Saleh Z.A., Wimal S. Punching shear strength of post-tensioned concrete flat plates with L-shaped columns. *PTI Journal*. 2009. V. 7. No. 1, pp. 29–39.
4. Bondy K.V. Two-way post-tensioned slabs with bonded tendons. *PTI Journal*. 2012. V. 8. No. 2, pp. 43–48.
5. Бардышева Ю.А., Кузнецов В.С., Тыльзова Ю.А. Конструктивные решения безбалочных безкапитальных перекрытий с предварительно напряженной арматурой // *Вестник МГСУ*. 2014. Вып. 6. С. 44–51.
6. Баркая Т.Р., Бровкин А.В., Митин М.А., Юлленен С.И. Исследование продавливания плит перекрытий // *Саморазвивающаяся среда технического университета: материалы III Всероссийской научно-практической конференции: в 2 ч.* Тверь: Тверской государственный технический университет, 2018. Ч. 1. С. 119–129.

7. Юлленен С.И. Расчетная и экспериментальная прочность предварительно напряженных железобетонных плит при продавливании: дисс. маг. Тверь, 2019. 122 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАРКАЯ Темур Рауфович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, инженерно-строительный факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: btrs@list.ru

ГАВРИЛЕНКО Алексей Владимирович – ассистент кафедры конструкций и сооружений, инженерно-строительный факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: gawaw@mail.ru

ФЕДОРОВ Виктор Владимирович – д-р культурологии, профессор кафедры конструкций и сооружений, инженерно-строительный факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: vvf322@yandex.ru

КУЛЯЕВ Павел Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, инженерно-строительный факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Баркая Т.Р., Гавриленко А.В., Федоров В.В., Куляев П.В. Экспериментальное исследование предварительно напряженных без сцепления железобетонных плит при продавливании // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 4 (8). С. 6–14.

EXPERIMENTAL STUDY OF PUNCHING SHEAR OF UNBONDED POST-TENSIONED REINFORCED CONCRETE SLABS

T.R. Barkaya, A.V. Gavrilenko, V.V. Fedorov, P.V. Kulyaev
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. In this paper there are results of a punching shear test of slab samples, which were modeling post-tensioned reinforced concrete floor slabs when they are punched by columns. Geometrical dimensions of slab samples and properties of used materials are listed as well. There were 4 series of samples which differed to each other by level of prestress. Load have been applied through stamps of several types, which have allowed to research different positions of tensioned reinforcement relatively to the punching pyramid. Obtained results are discussed. Recommendations, which compliance may allow to obtain positive effect in ultimate punching shear loads for unbonded post-tensioned slabs are given.

Keywords: reinforced concrete, unbonded post-tensioning, punching shear.

REFERENCES

1. Gavrilenko A.V., Abdullina Yu.R., Barkaya T.R. Features of the technology of post-tensioning of reinforced concrete structures in conditions of construction and installation works. *Self-developing environment of technical university: scientific research and experimental studies: materials of the IV All-Russian scientific and practical conference*. Tver: Tver State Technical University. 2020, pp. 72–78. (In Russian).

2. Brovkin A.V., Mitin M.A., Yullenen S.I. Issues of calculational punching shear strength of post-tensioned reinforced concrete slabs. *International Student Construction Forum – 2018 (to the 165th anniversary of the birth of V.G. Shukhov): collection of reports: in 2 vol.* Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2018. Vol. 1, pp. 35–40. (In Russian).
3. Saleh Z.A., Wimal S. Punching shear strength of post-tensioned concrete flat plates with L-shaped columns. *PTI Journal*. 2009. V. 7. No. 1, pp. 29–39.
4. Bondy K.B. Two-way post-tensioned slabs with bonded tendons. *PTI Journal*. 2012. V. 8. No. 2, pp. 43–48.
5. Bardysheva Yu.A., Kuznetsov V.S., Talyzova Yu.A. Constructive solutions for flat floor slabs without girders and capitals with stressed reinforcement. *Vestnik MGSU*. 2014. No. 6, pp. 44–51. (In Russian).
6. Barkaya T.R., Brovkin A.V., Mitin M.A., Yullenen S.I. Research of punching shear of floor slabs. *Self-developing environment of technical university: scientific research and experimental studies: materials of the III All-Russian scientific and practical conference: in 2 vol.* Tver: Tver State Technical University. Vol. 1. 2018, pp. 119–129. (In Russian).
7. Yullenen S.I. Calculative and experimental punching shear strength of prestressed reinforced concrete slabs. Mag. Diss. (Construction). Tver, 2019. 122 p. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BARKAYA Temur Raufovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

GAVRILENKO Alexey Vladimirovich – Assistant of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: gawaw@mail.ru

FEDOROV Viktor Vladimirovich – Doctor of Cultural Sciences, Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vvf322@yandex.ru

KULIAEV Pavel Victorovitch – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Barkaya T.R., Gavrilenko A.V., Fedorov V.V., Kulyaev P.V. Experimental study of punching shear of unbonded post-tensioned reinforced concrete slabs // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2020. No. 4 (8), pp. 6–14.