

С.А. ЗЕНИН, канд. техн. наук (lab01@mail.ru), А.Н. БОЛГОВ, канд. техн. наук (200651@mail.ru),
А.З. СОКУРОВ, канд. техн. наук (6618188@gmail.com), О.В. КУДИНОВ, инженер (lab01@mail.ru)

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона –
НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, АО «НИЦ «Строительство» (109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, 6, к. 5)

Прочность на продавливание плоских плит перекрытий в зонах опирания на торцы стен

В НИИЖБ им. А.А. Гвоздева выполнена научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа (НИОКР), основной задачей которой являлась оценка прочности на продавливание плоских плит перекрытий из монолитного железобетона в зонах опирания на торцы стен. В рамках исследования проведены опытные, а также расчетно-теоретические исследования по вопросу определения прочности фрагментов плоских плит перекрытий на продавливание в зонах торцов стен. На основании полученных результатов исследований и их анализа установлено, что имеет место влияние изгибающих моментов в плоскости стен на прочность плиты на продавливание. Это требует соответствующего учета в методиках расчетов.

Ключевые слова: железобетон, продавливание, плита, торцы стен, прочность, расчет.

Для цитирования: Зенин С.А., Болгов А.Н., Сокуров А.З., Кудинов О.В. Прочность на продавливание плоских плит перекрытий в зонах опирания на торцы стен // *Бетон и железобетон*. 2022. № 2 (610). С. 35–40.
DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-610-2-35-40>

S.A. ZENIN, Candidate of Sciences (Engineering) (lab01@mail.ru), A.N. BOLGOV, Candidate of Sciences (Engineering) (200651@mail.ru),
A.Z. SOKUROV, Candidate of Sciences (Engineering) (6618188@gmail.com), O.V. KUDINOV, Engineer (lab01@mail.ru)
Research, Design and Technological institute of Concrete and Reinforced Concrete – NIIZHB named after A.A. Gvozdev
JSC “Research Center “Stroitel'stvo” (6, build. 5, 2-nd Institut'skaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

Punching Strength of Flat Floor Slabs in the Areas of Support on the Ends of the Walls

Research and development work (R&D), the main task of which was to assess the punching strength of flat floor slabs of monolithic reinforced concrete in the areas of support on the ends of the walls, was carried out at NIIZHB named after A. A. Gvozdev. As part of the study, experimental, as well as computational and theoretical studies were carried out on the issue of determining the strength of fragments of flat slabs for punching in the zones of the ends of the walls. On the basis of the research results obtained and their analysis, it was found that there is an influence of bending moments in the plane of the walls on the punching strength of the plate, which requires appropriate consideration in the calculation methods.

Keywords: reinforced concrete, punching, plate, wall ends, strength, calculation.

For citation: Zenin S.A., Bolgov A.N., Sokurov A.Z., Kudinov O.V. Punching strength of flat floor slabs in the areas of support on the ends of the walls. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 2 (610), pp. 35–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-610-2-35-40>

Как известно, одними из основных факторов, влияющих на прочность плоских железобетонных плит при продавливании, являются содержание поперечной арматуры, а также прочность бетона при растяжении или ее функция от прочности бетона при сжатии. Данные факторы также являются основными при оценке прочности наклонных сечений. Отличительными особенностями данных расчетов является механизм разрушения, принятый в расчетных моделях. Как показывает анализ отечественных и зарубежных нормативных документов [1–10], при расчете на продавливание данный механизм практически идентичен во всех нормах – разрушение по пирамиде продавливания. При этом имеются отдельные отличия в моделях, например угол наклона пирамиды.

При действии поперечных сил в российских и американских нормах принята модель наклонных сечений, в которых дополнительным фактором является пролет среза. Европейская расчетная модель [5] в отличие от остальных построена на ферменной аналогии. При этом европейские и американские методики не содержат детальных указаний по расчету на продавливание плоских плит в зонах торцов стен. В отечественной нормативной базе данная методика расчета присутствует в СП 430.1325800.2018 [2]. Однако надо отметить, что методика основана на теоретических предпосылках, принятых по образцу и подобию методики расчета на продавливание в зоне сосредоточенных опор. Для оценки корректности принятых теоретических предпосылок нормативной методики

в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева были проведены экспериментальные исследования.

Целью проведения испытаний являлось получение экспериментальных данных для оценки напряженно-деформированного состояния плоских плит перекрытий из монолитного железобетона при продавливании у торцов стен.

По результатам экспериментальных исследований планировалось оценить влияние наличия и отсутствия поперечной арматуры, влияние наличия и отсутствия изгибающих моментов на прочность плоских плит перекрытий из монолитного железобетона при продавливании у торцов стен, а также получить значения разрушающих нагрузок опытных образцов.

Разработка конструкций образцов была выполнена с учетом необходимости рассмотрения различных схем и форм разрушения в зависимости от различных факторов – отсутствия или наличия поперечного армирования, а также отсутствия или наличия изгибающих моментов. За основу приняты экспериментальные образцы в виде фрагментов сопряжения плита–стена из монолитного железобетона как наиболее характерные узлы монолитных конструктивных систем зданий.

Плиты имеют габаритные размеры $2500 \times 2000 \times 200$ мм. Фрагменты стен представлены в виде пилонов с размерами в плане 1000×200 мм и высотой 800 мм, которые расположены у торцов плит и ориентированы вдоль их длинной грани (рис. 1). Опытные образцы запроектированы из монолитного тяжелого бетона класса прочности при сжатии В25. Продольное армирование плит выполняется вязаны-

ми сетками из отдельных арматурных стержней класса А500; армирование у нижней грани плиты состоит из стержней диаметром 10 с шагом 200 мм, у верхней грани плиты диаметром 20 с шагом 100 мм. Защитный слой бетона в обоих случаях составляет 25 мм. Поперечное армирование запроектировано в виде сварных каркасов длиной 300 мм, выполненных из отдельных арматурных стержней диаметром 8 с шагом 75 мм класса А240 и установленных крестообразно в зоне продавливания по три каркаса на сторону и на торец с шагом 50 мм. Армирование стен выполняется отдельными арматурными стержнями диаметром 10 класса А500, шаг стержней составляет 220 мм.

Влияние изгибающих моментов на прочность образцов учтено при помощи рассмотрения трех различных положений нагрузки.

Всего предусмотрено шесть образцов – по три образца без поперечной арматуры с различным приложением нагрузки и по три образца с поперечной арматурой с аналогичными схемами приложения нагрузки.

Испытания проводились на специальной установке, подготовленной для данных испытаний и закрепленной на силовом полу.

Образец при испытаниях устанавливали на силовой пол и раскрепляли к силовой раме. Сосредоточенные нагрузки на плиту передавали с помощью гидравлических домкратов с полым штоком грузоподъемностью 500 кН и силовых тяг, пропущенных через технологические отверстия в плите и закрепленных в силовом полу.

Образцы с маркировкой ПО – без поперечной арматуры, образцы с маркировкой ПКр – с поперечной

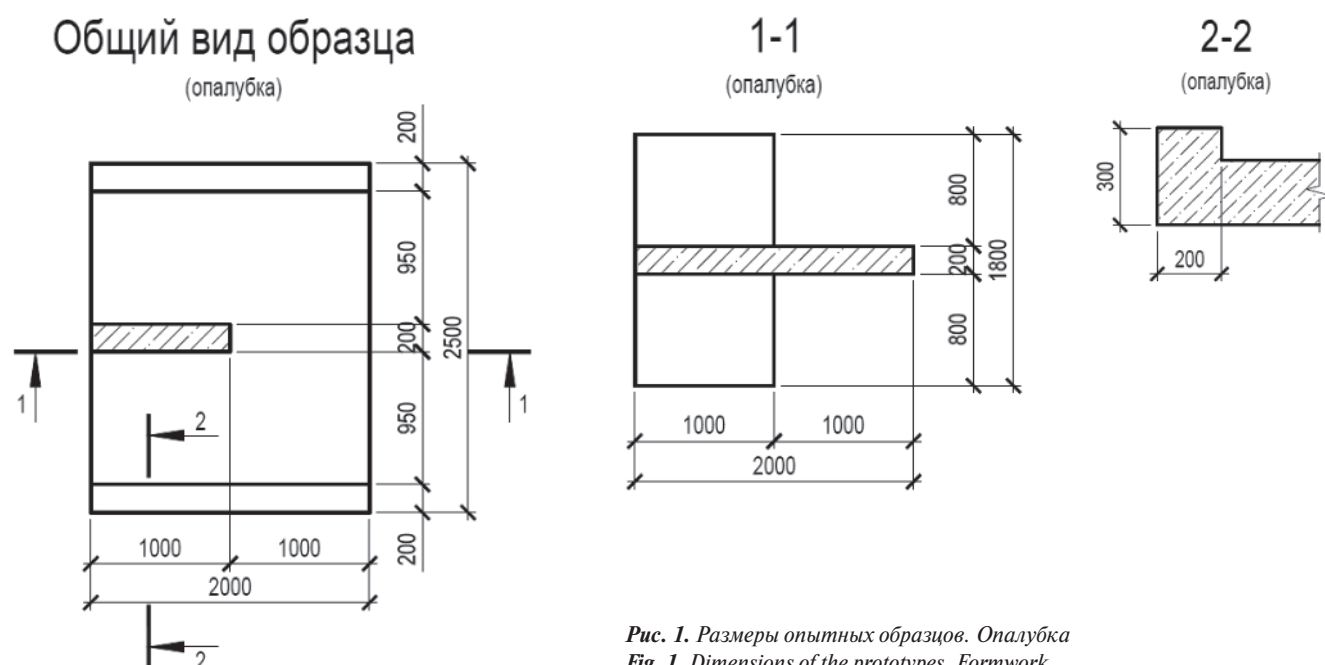


Рис. 1. Размеры опытных образцов. Опалубка
Fig. 1. Dimensions of the prototypes. Formwork

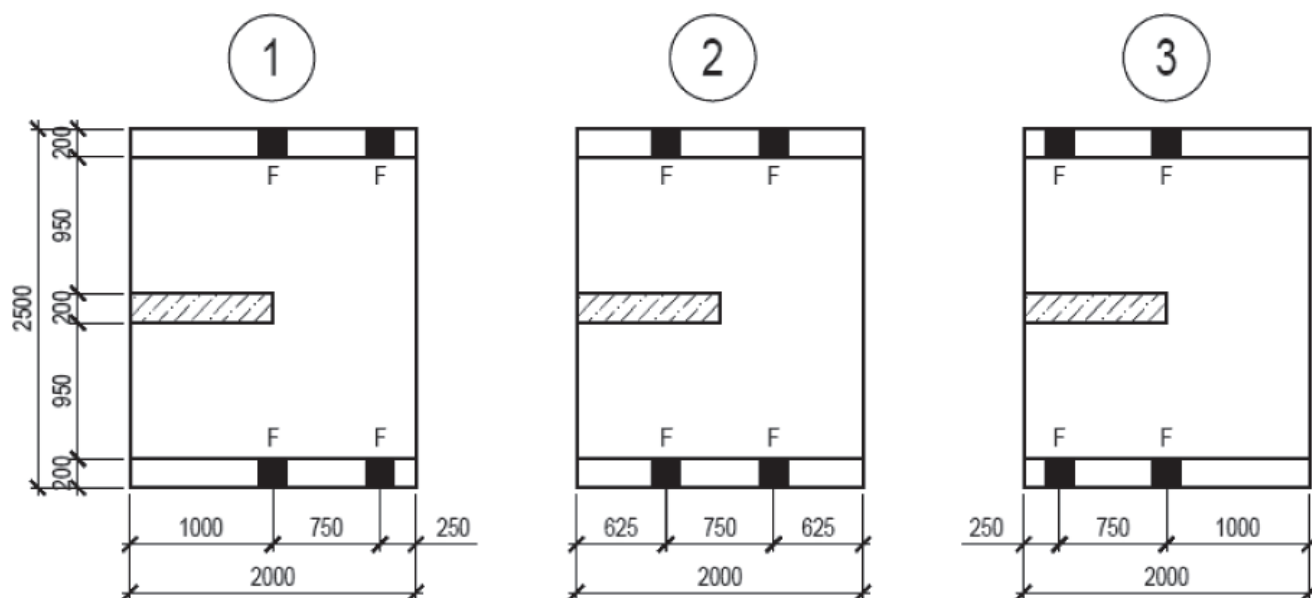


Рис. 2. Схемы приложения нагрузки
Fig. 2. Load application schemes

арматурой. Цифра в маркировке образца соответствует схеме нагружения (рис. 2).

Нагрузка на опытные образцы прикладывается в соответствии со схемами нагружения, приведенными на рис. 2.

Деформации бетона и продольной арматуры определяли с помощью наклеенных на них тензодатчиков.

По результатам проведенных испытаний установлено следующее. Трещинообразование опытных образцов имело сходный характер, у свободных краев плиты по верхней грани плиты образовывались преимущественно продольные трещины вдоль рабочей арматуры. Причем смещение нагрузок от пилона к свободному краю плиты (схемы 1 и 2, рис. 2) приво-

дит к образованию по верхней грани плиты замкнутого контура трещин. Нагружение по схеме 3, когда нагрузки приложены вдоль пилона, ведет к образованию системы продольных трещин, характерных для разрушения по наклонному сечению. Схемы трещин на поверхности плит у опытных образцов приведены на рис. 3–8.

Первые трещины появлялись на верхней поверхности и располагались вдоль пилона при $F/F_{разр}=0,2-0,35$ и практически не зависели от наличия поперечной арматуры. При $F/F_{разр}=0,4$ в образцах, которые испытывались по схеме нагружения 1 и 2 (ПО-1 и ПО-2), образовывались косые трещины от граней стен, которые развивались к внешним сто-



Рис. 3. Схема трещин на верхней поверхности плит. Образец ПО-1
Fig. 3. Diagram of cracks on the upper surface of the plates. PO-1 prototype



Рис. 4. Схема трещин на верхней поверхности плит. Образец ПО-2
Fig. 4. Diagram of cracks on the upper surface of the plates. PO-2 prototype



Рис. 5. Схема трещин на верхней поверхности плит. Образец ПО-3

Fig. 5. Diagram of cracks on the upper surface of the plates. PO-3 prototype



Рис. 6. Схема трещин на верхней поверхности плит. Образец ПКр-1

Fig. 6. Diagram of cracks on the upper surface of the plates. PKr-1 prototype



Рис. 7. Схема трещин на верхней поверхности плит. Образец ПКр-2

Fig. 7. Diagram of cracks on the upper surface of the plates. PKr-2 prototype



Рис. 8. Схема трещин на верхней поверхности плит. Образец ПКр-3

Fig. 8. Diagram of cracks on the upper surface of the plates. PKr-3 prototype



Рис. 9. Характер разрушения образца: а – опытный образец ПО-3; б – опытный образец ПКр-3

Fig. 9. The nature of the destruction of the sample: а – prototype PO-3; б – prototype PKr-3

ронам плиты. При $F/F_{разр}=0,4-0,5$ образовывались наклонные трещины у стен с выходом и развитием к внешней грани со стороны стен. На предельных стадиях перед разрушением наибольшее раскрытие трещин в образцах наблюдалось вокруг граней стен (до 0,5–0,9 мм).

Четыре опытных образца, которые испытывались по схемам 1 и 2 (ПО-1, ПО-2, ПКр-1, ПКр-2), разрушились от продавливания торцом стены; два опытных образца, которые испытывались по схеме 3 (ПО-3, ПКр-3), – по наклонному сечению от действия поперечной силы. Разрушение образцов от продавливания произошло в форме незамкнутого усеченного конуса с основанием, равным поперечному сечению торца стены. Разрушение опытных образцов ПО-3 и ПКр-3 произошло по наклонному сечению (рис. 9).

Образование поверхности разрушения всех образцов происходило внезапно, при этом имеющиеся трещины в образцах не совпадали с будущей поверхностью разрушения.

Разрушение по нормальному сечению

Разрушения плит в опытных образцах по нормальному сечению не достигнуто. Учитывая, что образцы были запроектированы именно с такой способностью, можно сделать вывод о возможности применения существующей методики расчета нормальных сечений изгибаемых элементов в зонах опирания плит на торцы стен, предусмотренной в действующих нормативных документах СП 63.13330.2018 [1].

Разрушение по продавливанию

По результатам проведенных испытаний на продавливание разрушились образцы, нагруженные по схемам 1 и 2 (образцы ПО-1, ПО-2, ПКр-1 и ПКр-2). Сравнительный анализ результатов испытаний образцов, разрушившихся при продавливании плиты, показал следующее.

Установлено, что увеличение эксцентриситета приложения нагрузки на плиту относительно торца стены снижает прочность плиты при продавливании. Причем данное обстоятельство наблюдается как в образцах без поперечной арматуры, так и с поперечной арматурой (табл. 1).

По результатам проведенных исследований установлено, что увеличение эксцентриситета нагрузок относительно торца стены (схемы нагружения 1 и 2) снижает значения разрушающих нагрузок до 10–18%. Таким образом, очевидно, что на прочность плит на продавливание у торцов стен оказывает влияние изгибающий момент в плоскости стены. Причем для образцов с поперечной арматурой разница между разрушающими нагрузками меньше, чем для образцов без нее (10 и 18% соответственно).

Наличие поперечной арматуры при малых эксцентриситетах (схема 2) приводит к незначительному увеличению разрушающей нагрузки – на 7%. При увеличении эксцентриситета (схема 1) вклад поперечной арматуры усиливается: значение разрушающей нагрузки по сравнению с образцом без поперечной арматуры увеличивается на 15%.

Таблица 1
Table 1

Основные данные и сравнение результатов испытаний опытных образцов, разрушенных при продавливании плиты
Basic data and comparison of test results of prototypes destroyed during slab punching

Шифр образца	R_m , МПа	R_{btm} , МПа	$\sigma_{T,sw}$, МПа	A_{sw} , мм ²	h , мм	a , мм	h_0 , мм	L_{sw} , мм	q_{sw} , кН/м	$F_{T,b}$, кН	$F_{T,sw}$, кН	F_T , кН	$F_{оп}$, кН	$F_T/F_{оп}$
По-1	37,2	2,72			200	55	145			408		408	372	1,1
По-2	37,2	2,71			200	55	145			406		406	440	0,92
Пкр-1	34,9	2,74	584	101	200	55	145	100	282	411	68	479	428	1,12
Пкр-2	73,3	2,67	584	101	200	55	145	100	282	400	68	468	471	0,99

Примечания к табл. 1 и 2:

R_m – средняя кубиковая прочность бетона
 R_{btm} – средняя прочность бетона на осевое растяжение, принятая в расчетах
 $\sigma_{T,sw}$ – предел текучести поперечной арматуры, принятый в расчетах
 A_{sw} – площадь поперечной арматуры
 h – толщина плиты
 h_0 – рабочая высота плиты
 u – периметр расчетного контура
 a – толщина защитного слоя бетона у растянутой грани
 L_{sw} – длина зоны установки поперечной арматуры
 q_{sw} – погонное усилие, воспринимаемое поперечной арматурой
 $F_{T,b}$ – теоретическая продавливающая сила, воспринимаемая бетоном
 $F_{T,sw}$ – теоретическая продавливающая сила, воспринимаемая арматурой
 F_T – суммарная теоретическая продавливающая сила
 $F_{оп}$ – опытная разрушающая нагрузка
 C – пролет среза

Таблица 2

Table 2

Основные данные и сравнение результатов испытаний опытных образцов, разрушенных по наклонному сечению плиты
Basic data and comparison of test results of prototypes destroyed along the inclined section of the slab

Шифр образца	R_m , МПа	R_{bm} , МПа	h , мм	a , мм	h_0 , мм	C , мм	$F_{T,b}$, кН	$F_{оп}$, кН	$F_{T,b}/F_{оп}$
По-3	34,9	2,69	200	55	145	360	468	597	0,78
Пкр-3	73,3	2,47	200	55	145	360	429	558	0,77
Примечания (см. табл. 1).									

Сравнение фактической несущей способности образцов при продавливании с теоретическим значением, определяемым согласно СП 430.1325800.2018 [3], показало, что при малых эксцентриситетах приложения нагрузки (схема 2) наблюдается весьма хорошая сходимости опытных и теоретических данных: разница практически отсутствует, максимальные отклонения не превышают 8%, причем опытные значения выше теоретических.

При этом с увеличением эксцентриситета приложения нагрузки (схема 1) теоретические значения несколько выше опытных значений – на 10–12%. Данное обстоятельство можно объяснить влиянием изгибающих моментов в плоскости стены на несущую способность плиты при продавливании, что не учитывается методикой действующих норм.

Разрушение по наклонному сечению

Проведенные испытания показали, что по наклонному сечению разрушились образцы, загруженные по схеме 3 (образцы ПО-3 и ПКР-3). При загрузке по данной схеме эксцентриситет приложения сил относительно опоры торца стены отсутствует, нагрузки приложены вдоль стены, что и объясняет полученную схему разрушения как изгибаемого элемента по наклонному сечению. Некоторое различие в полученных значениях разрушающих нагрузок при разрушении по наклонному сечению между образцами ПО-3 и ПКР-3 можно объяснить пониженной кубиковой прочностью образца ПКР-3. Данные образцы после достижения разрушающей нагрузки были доведены до полного разрушения, при котором в образце ПО-3 (без поперечной арматуры) трещины образовали контур продавливания у торца стены.

Сравнение фактической несущей способности плит по наклонному сечению с теоретическим значением (табл. 2) показало, что методика СП 63.13330.2018 [1] дает более осторожные значения.

Вывод

Как показали результаты проведенных экспериментальных исследований, при наличии больших эксцентриситетов приложения нагрузки к плите от-

носительно торца стеновой панели возможна схема разрушения плиты при продавливании. При этом методика действующих норм дает несколько завышенные значения несущей способности на плиту (на 10–12%). Представляется, что это обусловлено влиянием изгибающих моментов, действующих в плоскости стены, и методика действующих норм требует корректировки.

Список литературы / References

- СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01–2003 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». М., 2018.
- SP 63.13330.2018 SNiP 52-01–2003 Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. Moscow. 2018.
- СП 430.1325800.2018 «Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования». М., 2018.
- SP 430.1325800.2018 Monolithic structural systems. Design rules. Moscow. 2018.
- ACI CODE-318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. 2005. 430 p.
- ACI 421.1 R-20 Guide to Shear Reinforcement for Slabs.
- EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, EN 1992-1-1, Brussels, Belgium, 2004, 225 p.
- Model Code 2010.
- Reineck K., Kuchma D., Kang-Su Kim, Marx S. Punching of structural concrete slabs. *fib Bulletin*. 2001. April. No. 12. DOI: 10.35789/FIB.BULL.0012
- Triantafyllou T., Matthys S. Shear and punching shear in RC and FRC elements. *fib Bulletin*. 2010. October. No. 57. DOI: 10.35789/FIB.BULL.0057
- Punching shear of structural concrete slabs: Honoring Neil M. Hawkins. *fib Bulletin*. 2017. No. 81. 10.35789/fib.bull.0081.ch11
- Aurelio Muttoni. Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs without Transverse Reinforcement. *Aci Structural Journal*. 2008. July.