

## Модели для исследования железобетонных плит на продавливание колоннами при нагреве

*С.Л. Фомин, К. Шейхмус, И.А. Плахотникова*

*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры*

**Аннотация:** Проведен сравнительный анализ результатов численных исследований прочности на срез двух наиболее распространенных моделей фрагмента стыка соединения железобетонной плиты перекрытия с колонной монолитных зданий при продавливании и нагреве. Моделирование напряженно-деформированного состояния бетонных образцов проведено в ПК ЛИРА 9.6 R9 при различном сочетании нагрузок и воздействий в нелинейной постановке с целью изучения процессов их разрушения. Выявлены новые особенности напряженно-деформированного состояния железобетонных монолитных зданий с безригельным каркасом при альтернативной расчетной схеме, которая отражает действительную картину загрузки плиты и соответствует методике Еврокода 2.

**Ключевые слова:** узел соединения железобетонных плит с колонной, монолитное здание с безригельным каркасом, прочность плит при срезе и продавливании в условиях нагрева, нелинейный расчет.

Согласно [1], расчет железобетонных конструкций по прочности ULS (Ultimate limit states) проводят на следующие виды воздействий: 1) изгиб с осевой или без осевой силы; 2) смещение; 3) кручение; 4) продавливания. Четвертый вид воздействий касается среза при продавливании в плитах сплошного сечения в зданиях с безригельными каркасами, получивших широкое распространение в Украине и за рубежом.

В нормах различных стран, в том числе в новых нормах Украины, разработаны рекомендации по проектированию при нормальной температуре; при высоких температурах пожарной среды нормативные указания по расчету отсутствуют. Не имеется так же экспериментальных данных по изучению процессов среза в опорной зоне плиты при нагревании.

При нормальной температуре для исследований принимается **модель №1** в виде прямоугольного фрагмента плиты с передачей нагрузки в ее центре через жесткий металлический штамп площадью равной размеру сечения колонны [4-7]. В большинстве случаев плита принимается опертой

---

снизу по контуру а нагрузка прикладывается сверху вниз [8]. В некоторых экспериментах плиту опирают по углам а штамп заменяют отрезком колонны, который изготавливают при бетонировании образца.

Недостатками такой модели является изменение по сравнению с действительностью направление силовых векторов, при котором продавливание происходит сверху вниз. В действительности нагрузка на перекрытии, т.е. на плиту, приводит к ее продавливанию колонной нижнего этажа снизу вверх. В рассмотренных установках плита представляется опертой по контуру свободной от полезной нагрузки, ее собственный вес, равный более половины общей нагрузки, действует в противоположную сторону, складываясь с усилием от колонны, пирамида продавливания направлена в противоположную сторону. Так разрушаются только фундаментные плиты, на которые действительно давят колонны, а действующая нагрузка частично погашается отпором грунта основания. Кроме того, в процессе испытания с верхней открытой поверхностью плиты визуально ничего не происходит, в то время как на нижней, мало доступной поверхности, уже на первых этапах нагружения появляются трещины, формируется очертание основания пирамиды продавливания.

В работе [9] разработаны методики расчета огнестойкости с применением компьютерных технологий, проведения экспериментальных исследований на новых видах образцов и новой установке для испытаний. Установка для испытания железобетонных плит на продавливание при нагреве содержит опытный образец в виде фрагмента узла монолитного соединения железобетонных плит с железобетонными колоннами, примыкающими к плите сверху и снизу. Особенностью образцов является наличие сквозного отверстия расположенного в центре сечения колонн, в котором размещен тяз, верхняя часть которого закрепляется в силовой раме, а нижняя в торце нижней колонны. С помощью домкрата, реверса и

---

конструкции производится продавливание плиты снизу вверх при ее нагреве снизу и четырехстороннем нагреве нижней колонны (рис.1)

Рис.1 – Схемы образцов для исследования фрагментов стыка соединения плиты с колонной по модели №1: А – при нормальной температуре, В – при высокой температуре пожара

В работе [10] проведено моделирование напряженно-деформированного состояния бетонных образцов с плитой толщиной 200 мм, колонной сечением 400x400 мм при различном сочетании нагрузок и воздействий в процессе эксплуатации с целью изучения процессов их разрушения. Использован программный комплекс ЛИРА 9.6R9. Для всех частей объемной модели фрагмента узла опирания плиты на колонны приняты физически нелинейные КЭ231 (параллелепипеды) размером 20x20x20 мм. Учитывая симметрию образца, расчетная модель представлена его четвертью, содержит 16311 элементов и 19096 узлов (рис.2).

Характеристики тяжелого бетона естественного твердения на силикатном заполнителе получены экспериментально и составляют:  $E_{ск} = 2345347 \text{ т/м}^2$  (23000 МПа),  $f_{cd} \equiv \sigma(-) = 1440,858 \text{ т/м}^2$  (14,13 МПа),  $f_{cd} = \sigma(+)$  = 2,2 МПа,  $\nu = 0,167$  [2,3]. На все узлы по плоскости симметрии модели ZOX наложены связи, запрещающие перемещения по X, на все узлы по плоскости симметрии модели Z0Y наложены связи, запрещающие перемещения по Y.

При опирании по контуру плиты снизу установлены одноузловые КЭ256 упругих связей с учетом предельных усилий и сверху (запрет перемещений по оси Z).

Рассмотрено 3 варианта загрузки: 1 вариант - при нагрузке собственным весом (**первое локальное загрузе**ние) и продавливающей силой  $F=90 \text{ т}$  (**второе локальное загрузе**ние), 2 вариант - при нагрузке собственным весом (**первое локальное загрузе**ние) и нагревом (**второе**

локальное загрузке). Распределение температуры по толщине плиты соответствовало 60 мин нагрева стандартным пожаром и 3 вариант - при последовательном приложении нагрузки от собственного веса (**первое локальное загрузке**), нагревом (**второе локальное загрузке**) и продавливающей силой  $F=90$  т, подсчитанной из условия наклона призмы продавливания на угол  $\theta = \arctan(1/2) = 26,6^\circ$  [1] (**третье локальное загрузке**). Продавливающая сила задана заведомо завышенной, чтобы в процессе итераций выявить действительное сопротивление срезу. Подробный анализ результатов моделирования приведен в работе [10]. Здесь лишь описаны конечные выводы.

**Характеристики нелинейности для КЭ231** основного материала - бетона класса С25 приняты по экспоненциальной зависимости 11 с учетом влияния температуры нагрева путем введения понижающих коэффициентов условия работы на модуль упругости  $\beta_c$ , прочность  $\gamma_{ct}$ , предельные относительные деформации бетона  $\epsilon_{cu}$  (рис.3).

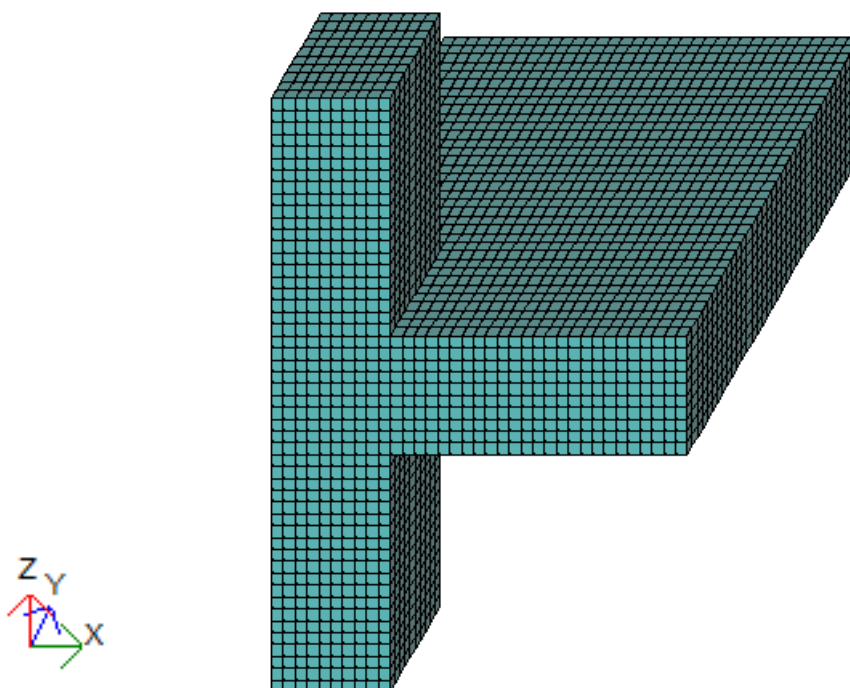


Рис. 2 – Расчетная схема опытного образца ПК200Б

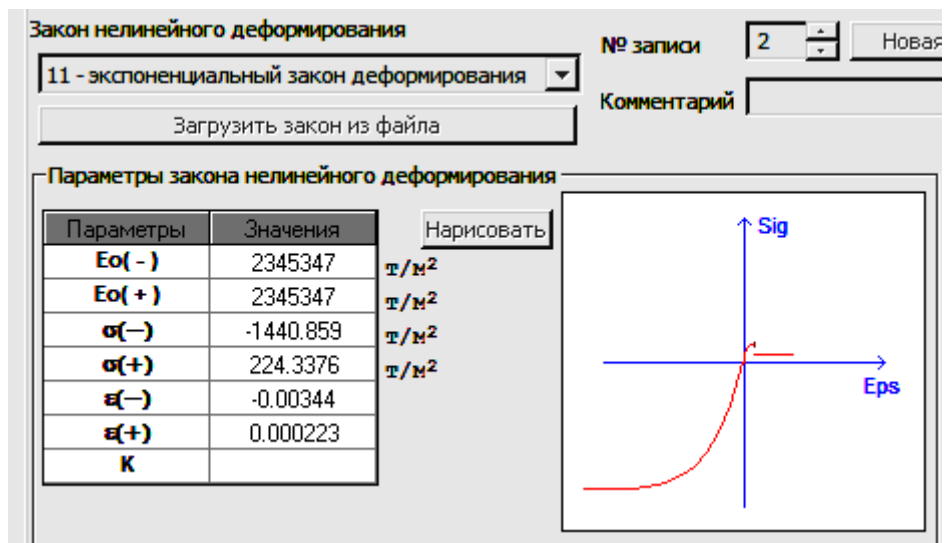


Рис. 3 – Законы нелинейного деформирования материалов

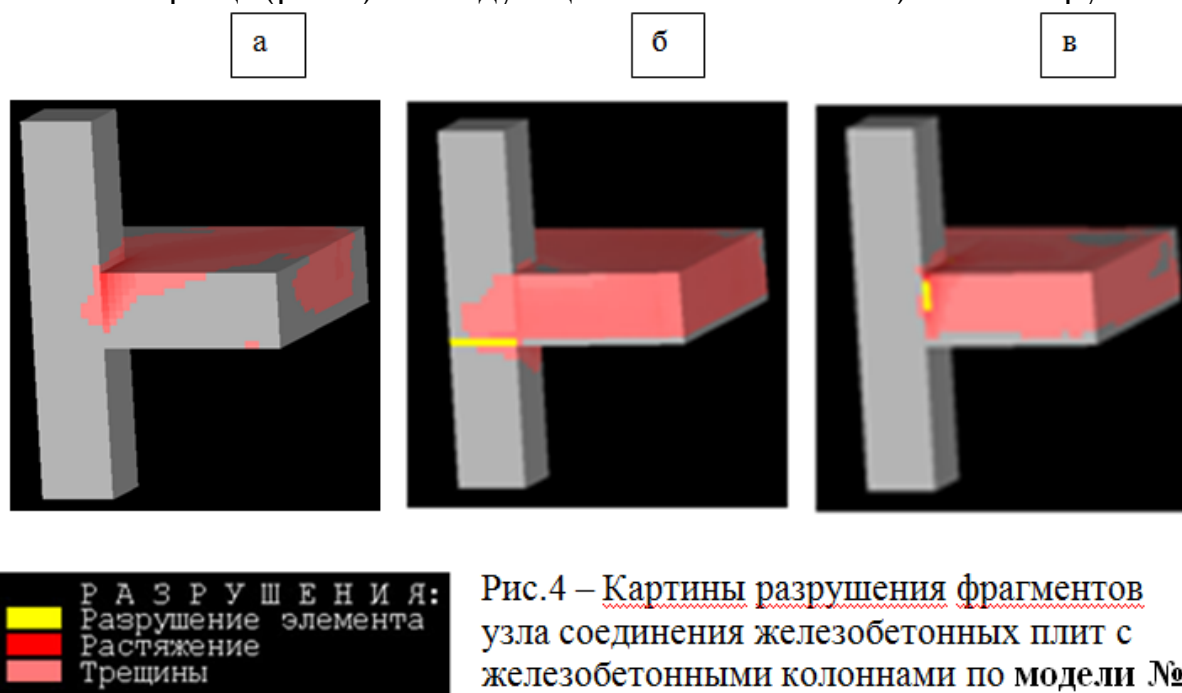
В 1 варианте при продавливании в холодном состоянии характер разрушения при увеличении нагрузки продавливания формировался по известному закону путем образования так называемой призмы продавливания (рис.4а). Продавливающая сила с заданной 90 т снизилась до 45 т, что определялось по **рестарту** (останову счета).

Во втором варианте главным фактором разрушения оказался температурный момент, который привел с первых шагов итерационного процесса к возникновению трещин и разрушений от растягивающих напряжений в верхней части плиты. По мере увеличения нагрева снизу плиты на контакте с колонной образовались очаги разрушения, которые на последнем десятом шаге привели к разрушению сечения колонны полностью (рис.4б).

Третий вариант, как это и происходит в действительности, предполагал последовательное приложение нагрузки от собственного веса, воздействие нагрева и продавливающей силы. Характер разрушения оказался подобен второму варианту, однако нагрев снизил продавливающую силу с 45 т до 27 т (рис.4в).

**Модель №2** принимается в виде прямоугольного фрагмента плиты с передачей нагрузки на верхнюю поверхность плиты сверху вниз, в центре нижней поверхности на площадь равную размеру сечения колонны накладываются связи, запрещающие перемещения и повороты по направлению всех координат. Могут быть также использованы железобетонные образцы в виде плит с колоннами по центру снизу и сверху; нагрузки передаются на верхнюю поверхность плиты сверху вниз, торец нижней колонны заземляется.

**Моделирование напряженно-деформированного состояния для модели № 2** проведено аналогично модели № 1. Приняты те же геометрические и физико-механические характеристики, изменены лишь граничные условия и характер загрузки. Использована расчетная схема опытного образца (рис.2) со следующими изменениями: а) снята нагрузка с



торца нижней колонны, б) закреплены все узлы торца нижней колонны, в) сняты связи с контура плиты, г) загружена равномерно распределенная нагрузка верхней поверхности плиты полезной нагрузкой **49,2 т/м<sup>2</sup>**,

соответствующей максимальной продавливающей силе  $F=90\text{т}$  в модели №1. Рассмотрено 3 варианта загрузки.

Получено, что для 1 варианта при нагружении собственным весом и распределенной полезной нагрузкой рестарт (останов) произошел на 6 шаге (в его середине), т.е. примерно при временной нагрузке  $49,5/2 = 24,75 \text{ т/м}^2$ , что соответствует продавливающей силе  $F_1=90/2=45 \text{ т}$ . Растяжение охватила 2,3 высоты верхней части контактного слоя. Визуально формирования призмы продавливания не наблюдалось, скорее всего, реализовался срез по периметру контакта (рис.5а).

Во втором варианте при нагрузке собственным весом и нагревом воздействие температуры привело к образованию растягивающей зоны в среднем слое плиты, затем образовались трещины и разрушение элементов. Рестарт процесса итерации произошел на 10 шаге (рис.5б).

В 3 варианте при нагрузке собственным весом, нагревом и полезной нагрузкой рестарт (останов) произошел на 4 шаге (из 10) локального нагружения временной нагрузкой, т.е. примерно при временной нагрузке  $49,5 \times 4/10 = 19,8 \text{ т/м}^2$ , что соответствует продавливающей силе  $F_2=90 \times 4/10=36 \text{ т}$ . К 4 шагу зона разрушения по периметру колонны на стыке с плитой составила примерно 0,7 толщины плиты.

Повидимому срез плиты произошел по этому периметру (рис.5в)

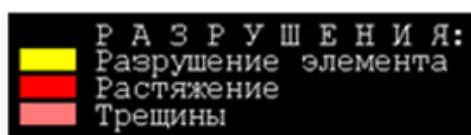
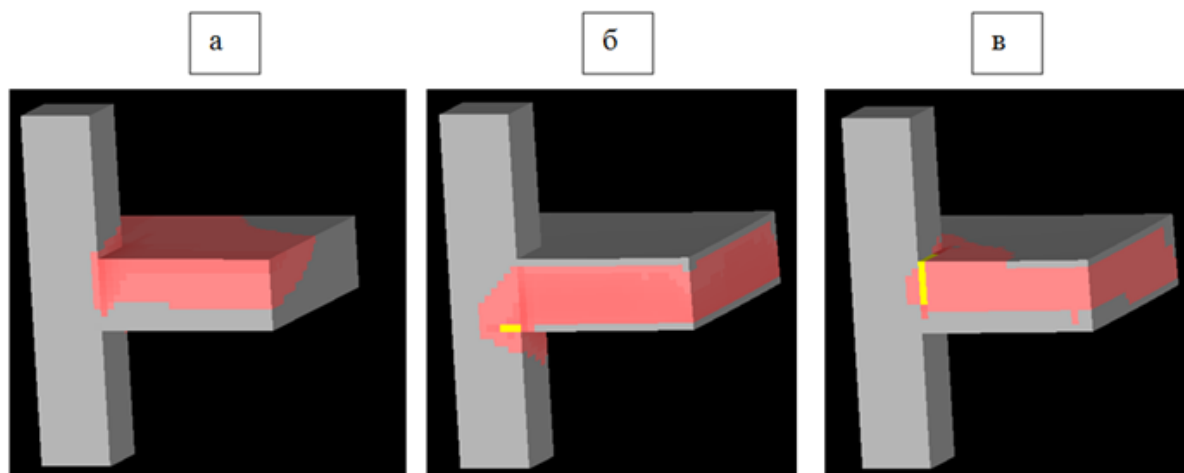


Рис.5 – Картины разрушения фрагментов узла соединения железобетонных плит с железобетонными колоннами по модели 2



Выявлен принципиально новый характер разрушения стыка колонны с плитой в результате перераспределения напряженного состояния при нагреве плиты снизу во время пожара. Таким образом, существующие методики расчета, основанные только на учете влияния температуры на физико-механические свойства материалов, не решают данную проблему.

### **Выводы**

Выявлены новые особенности напряженно-деформированного состояния железобетонных монолитных зданий с безригельным каркасом при альтернативной расчетной схеме, которая отражает действительную картину загрузения плиты и соответствует методике Еврокода 2.

### **Литература**

1. EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.
2. Мкртчян А.М., Аксенов В.Н. Аналитическое описание диаграммы деформирования высокопрочных бетонов // «Инженерный вестник Дона», 2013, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1818
3. Мкртчян А.М., Аксенов В.Н. О коэффициенте призмочной прочности высокопрочных бетонов // «Инженерный вестник Дона», 2013, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1817
4. Elstner, R.C. and Hognestad, E. (1956). "Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs." ACI, Struct. J., 53(7), pp. 29-59.



5. Theodorakopoulos, D. D. and Swamy R. N. (2002) "Ultimate Punching Shear Strength Analysis of Slab-Column Connections." Cement and Concrete Composites, V.24, pp. 509-521.
6. Moe J. (1961). "Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs and Footings under Concentrated Loads." Development Department Bulletin D 47, PCA Research and Development Laboratories, Illinois, 130 p.
7. Клованич С.Ф., Шеховцов В.И. Продавливание железобетонных плит. Натурный и численные эксперименты. Одесса: ОНМУ, 2011. 119 с. (УДК 624.04:624.073.4:539.3)
8. Wensheng Bu. Punching Shear Retrofit Method Using Shear Bolts for Reinforced Concrete Slabs Under Seismic Loading. University of Waterloo, 2008, 233 с.
9. Фомин С. Л., Астахов А.А., Резник П.А. Экспериментальное исследование железобетонных плит на продавливание при нагреве // Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво) / Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Мінрегіонбуд України. Вип.78: в 2-х кн.: Книга 1. -Київ, ДП НДІБК, 2013. С. 487-503.
10. Фомин С. Л., Астахов А.А., Резник П.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния во фрагментах узлов опирания плит и колонн при продавливании и нагреве // Науковий вісник будівництва. Вип. 73.- Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2013. - С. 63-71.

### References

1. 1. EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.
-

2. Mkrтчjan A.M., Aksenov V.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1818](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1818).
3. Mkrтчjan A.M., Aksenov V.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1817](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1817).
4. Elstner, R.C. and Hognestad, E. (1956). "Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs." ACI, Struct. J., 53(7), pp. 29-59.
5. Theodorakopoulos, D. D. and Swamy R. N. (2002) "Ultimate Punching Shear Strength Analysis of Slab-Column Connections." Cement and Concrete Composites, V.24, pp. 509-521.
6. Moe J. (1961). "Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs and Footings under Concentrated Loads." Development Department Bulletin D 47, PCA Research and Development Laboratories, Illinois, 130 p.
7. Klovanich S.F., Shekhovtsov V.I. Prodavlivanie zhelezobetonnykh plit. Naturnyy i chislennyye eksperimenty [Punching of reinforced concrete slabs. Natural and numerical experiments]. Odessa: ONMU, 2011, 119 p. (UDK 624.04:624.073.4:539.3)
8. Wensheng Bu. Punching Shear Retrofit Method Using Shear Bolts for Reinforced Concrete Slabs Under Seismic Loading. University of Waterloo, 2008. – 233 p.
9. Fomin S. L., Astakhov A.A., Reznik P.A. Mizhvidomchyy naukovy-tekhnichnyy zbirnyk naukovykh prats' (budivnitstvo) / Derzhavne pidpriemstvo «Derzhavnyy naukovy-doslidnyy institut budivel'nykh konstruktsiy» Minregionbud Ukraïni. Vip.78: v 2-kh kn.: Kniga 1. Kiïv, DP NDIBK, 2013. pp. 487-503.
10. Fomin S. L., Astakhov A.A., Reznik P.A. Naukoviy visnyk budivnitstva. Vip. 73.- Kharkiv: KhDTUBA, KhOTV ABU, 2013. pp. 63-71.