

УДК 693.56.624.073

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОПОРНЫХ ЗОН ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ С ПОДРЕЗКАМИ

канд. техн. наук, доц. А.С. АЛЬ НАХДИ, канд. техн. наук, доц. А.И. КОЛТУНОВ  
(Полоцкий государственный университет)

Представлены результаты экспериментальных исследований опорных зон предварительно напряженных многопустотных плит с подрезками. Плиты изготавливали на действующем оборудовании, причем каких-либо осложнений с устройством подрезки не возникло. В образцах варьировались схемы армирования подрезки и величины предварительного напряжения. Установлено, что образование трещин и разрушение зависят от конструктивного решения опорных зон: с увеличением сечения арматуры в подрезке линейно увеличивается прочность на действие изгибающего момента в наклонном сечении и при разрушении наблюдается текучесть как горизонтальной, так и сосредоточенной арматуры в подрезке. При этом предварительное напряжение не оказывает влияния на прочность плит. Наклонная арматура у подрезки увеличивает трещиностойкость и несущую способность по наклонному сечению внутреннего угла подрезки, но она создает условия для активного роста трещин в нижней её зоне. Установлено, что разрушение может происходить по наклонным трещинам из внутреннего угла подрезки или по нижней грани плит. Разработано предложение по конструированию опорных зон многопустотных плит с подрезками.

**Введение.** Применяемые в Республике Беларусь системы гражданских зданий, особенно выполненные из крупнопанельных элементов, отличаются простотой, высоким уровнем заводской готовности и достаточно высоким темпом возведения. Однако крупнопанельное домостроение в традиционном исполнении для создания гибкой конструктивной системы зданий непригодно. Оно характеризуется большой материалоемкостью, не обеспечивает разнообразия архитектурно-конструкторских и объемно-планировочных решений. Применение как альтернативной каркасной системы, которая хотя и обладает большой гибкостью в планировочных решениях, но ухудшает интерьер помещений из-за выступающих колонн и ригелей. Вместе с тем есть и достоинства каркасных зданий – относительно низкий расход материалов, возможность применения легких трансформируемых межкомнатных перегородок наряду с более свободной планировкой квартир. Из-за современных требований по снижению материалоемкости, себестоимости и трудоемкости изготовления конструкций простота их монтажа наряду с высоким качеством архитектурно-планировочных решений на базе минимального числа типоразмеров конструкций привлекает к себе внимание специалистов строительного комплекса.

Проектный институт «Белпромпроект» и Белорусский национальный технический университет разработали серии экспериментальных жилых зданий с плоскими перекрытиями для свободных планировочных решений в каркасном исполнении (рис. 1). При их разработке была поставлена задача – использовать только выпускаемые сегодня в республике железобетонные конструкции.

Пролеты ригелей от 5,1 до 6,9 м (кратно 0,3 м)

Пролеты плит до 7,2 м (кратно 0,3 м)

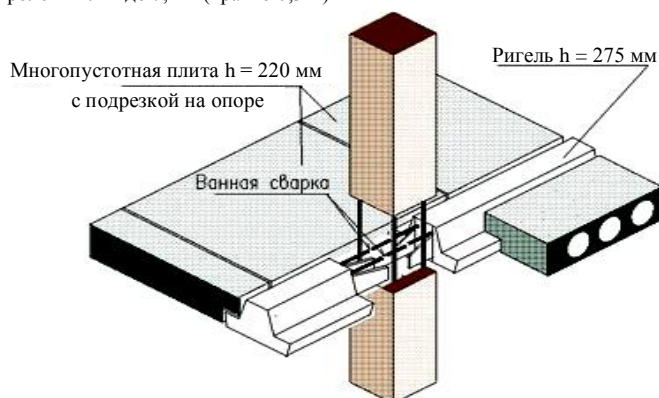


Рис. 1. Конструктивные решения каркасного здания с плоскими перекрытиями

Характерными особенностями данного каркаса являются:

- снижение высоты сечения ригелей с 450 до 260 мм, при этом автоматически снижается общая толщина междуэтажного перекрытия и, соответственно, высота здания в целом при сохранении неизменной высоты этажа в свету;
- многопустотные плиты перекрытия имеют подрезку в торце для скрытого опирания на полки ригелей, что позволяет получить гладкую потолочную поверхность;
- отсутствие железобетонных консолей в многоэтажных колоннах позволяют варьировать высоту этажа без переналадки опалубочных форм;
- крепление ригелей к колоннам скрытое на сварке с последующим замоноличиванием стыка, что обеспечивает восприятие фиксированного опорного изгибающего момента, создавая тем самым эффект неразрезности ригелей на опоре.

Один из основных элементов предложенных каркасов – предварительное напряжение многопустотных плит с подрезками на опоре (рис. 2).



Рис. 2. Опирание многопустотных плит с подрезкой на ригели

Таким вопросам, как наличие подрезки, предварительное напряжение, форма поперечного сечения, отсутствие специальных опалубочных форм, сложность конструирования, и некоторым другим задачам расчета и конструирования подрезки и посвящена данная работа.

Цель – исследовать напряженно-деформированное состояние, прочность и трещиностойкость предварительно напряженных многопустотных плит с подрезками, разработать рекомендации по расчету и конструированию опорных зон для их применения в конструкциях покрытий и перекрытий предлагаемых многоэтажных каркасных зданий.

**Основная часть.** Образцы изготавливались на серийном оборудовании завода «Минскжелезобетон». Размер плиты  $6000 \times 1200 \times 2200$  мм, для устройства подрезки в плитах были изготовлены стальные вкладыши размером  $1250 \times 110 \times 120$  мм, имеющие шесть полукругов диаметром 159 мм для свободного движения пуансонов при формовке, а также четыре отверстия для размещения продольной рабочей арматуры. После создания предварительного напряжения в арматуре, вкладыши устанавливали в торцах формы по обеим сторонам. Вслед за этим перемещается пустотообразователь, затем устанавливается арматурный каркас в опорных зонах и бетоноукладчиком раскладывается подвижная бетонная смесь. Продольная арматура в экспериментальных образцах – предварительно напряженная, класс – S800, диаметр – 12 мм. Всего было испытано 12 опорных зон с подрезками, шесть многопустотных плит.

В эксперименте варьировались следующие параметры:

- горизонтальная арматура в подрезке  $A_{sc}$ ;
- поперечная арматура, сосредоточенная у подрезки  $A_{swl}$ ;
- поперечная арматура в короткой консоли подрезки  $A_{wc}$ ;
- величина предварительного напряжения  $\sigma_p$ .

С целью изучения влияния армирования продольных ребер опорного участка (подрезки) при действии изгибающих моментов и поперечных сил, т. е. прочности и трещиностойкости опорных зон по наклонным сечениям, образцы были разбиты на три серии, отличающиеся характером армирования опорных зон (рис. 3). В первой серии (рис. 3, а) в приопорных зонах были установлены по 4 вертикальных каркаса. Плоский каркас продольных ребер из класса S500 диаметром 4 мм. Нижняя продольная арматура каркаса принимается короче верхней из-за наличия подрезки. Поперечная арматура того же класса и диаметра. Напряжение в бетоне в момент обжатия на уровне центра тяжести арматуры – 3,18 МПа. Начальный уровень обжатия бетона составил в среднем  $0,226 f_{ck}$ . Призмная прочность  $f_{ck} = 24,46$  МПа.

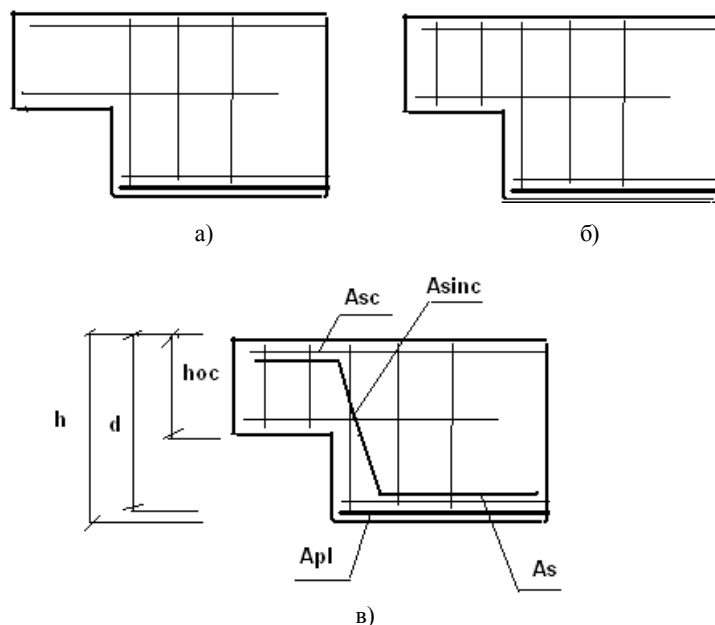


Рис. 3. Армирование опытных образцов

Во второй серии (рис. 3, б) каркас из класса S500 диаметром 6 мм, длиной 840 мм в сжатой зоне и длиной 715 мм в растянутой зоне. Продольная рабочая арматура короткой консоли подрезки из стали класса S500 диаметром 8 мм. Поперечная арматура из стали класса S500 диаметром 6 мм. Предварительное напряжение арматуры назначалось менее условного предела прочности 479,4...653 МПа. Начальный уровень обжатия бетона составил 0,243...0,19  $f_{ck}$ . Фактическая отпускная прочность бетона 20,6 МПа.

В третьей серии (рис. 3, в) плоский каркас отличается от каркаса К-2 наличием отгиба в зоне подрезки из арматуры класса S500 диаметром 6 мм, длиной 510 мм; арматура короткой консоли подрезки S500 диаметром 6 мм. Величина предварительного напряжения составила 460...710 МПа, начальный уровень обжатия бетона – 0,196...0,23  $f_{ck}$ , призматическая прочность бетона  $f_{ck} = 24,42...26,1$  МПа. Фактическая прочность бетона 20,1...21,3 МПа. Для изучения работы опорных зон плит была разработана методика испытаний, которая позволила изучить напряженно-деформированное состояние на всех этапах нагружения конструкций, вплоть до разрушения. Первоначально экспериментальные исследования опытных образцов проводились на действие равномерно распределенной нагрузки по балочной схеме (рис. 4).



Рис. 4. Загружение опытных образцов равномерно распределенной нагрузкой

В качестве испытательной нагрузки использовались чугунные грузы массой 20 кг и блоки размером 0,28 × 15 × 1,18 м, массой 360...460 кг.

Бетонные блоки устанавливались на распределительные подкладки. Испытание опытных образцов по схеме однопролетной шарнирно-опорной конструкции с равномерно распределенной нагрузкой показало, что предельное состояние наступает от текучести рабочей арматуры в нормальном сечении середи-

ны пролета. При этом в зоне подрезки была отмечена упругая работа бетона без видимых трещин, поэтому получить необходимые результаты по характеру разрушения опорных участков панелей в зоне подрезки не представилось возможным. Чтобы вызвать образование наклонных трещин и разрушение по наклонным сечениям, оценить величину соответствующих разрушающих усилий, было принято решение о дальнейшем испытании образцов двумя сосредоточенными симметрично приложенными в пролете силами на расстоянии «а» от опоры (рис. 5).

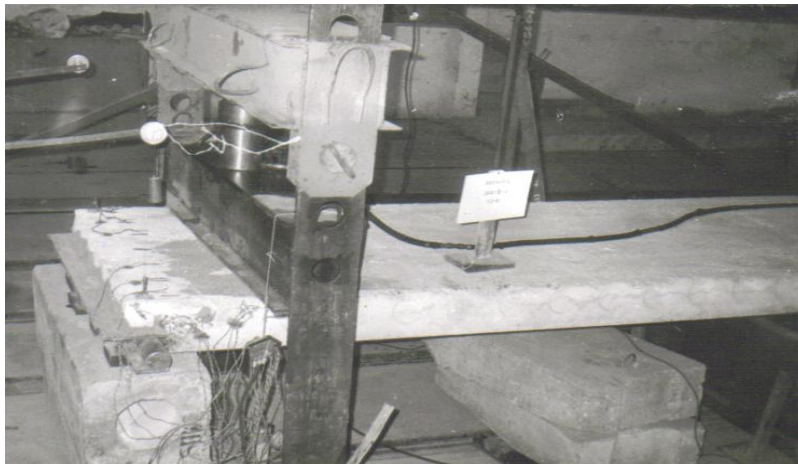


Рис. 5. Загрузка опытных образцов сосредоточенной нагрузкой

В случае если один из опорных участков панели оказался разрушенным, а во втором трещины не открывались, для увеличения числа экспериментальных данных производили повторное испытание второй опорной зоны, при этом длина пролета панелей за счет сближения опор уменьшилась, а пролет среза остался без изменений.

При испытании образцов использовали два гидравлических домкрата. Нагружение проводилось при кратковременном режиме со ступенчатым увеличением нагрузки на 10 % от расчетной разрушающей и выдержкой между ступенями 10...12 минут. На каждом этапе фиксировалось перемещение характерных точек, появление и ширина раскрытия трещин, характер их развития, деформация бетона и прогибы панелей. При размещении измерительных приборов использовались методы и средства, обеспечивающие исследование фактической картины напряженно-деформированного состояния, включая момент разрушения. В результате испытания определялась несущая способность опытных образцов на действие изгибающего момента в наклонном сечении, исходящего из внутреннего угла подрезки и по всей высоте сечения, момента образования трещин, их развития и характера разрушения.

Результат исследований позволил выявить закономерности в образовании и развитии трещин в приопорных зонах. Подрезка вызывает ряд особенностей напряженно-деформированного состояния опорной зоны. Поэтому целесообразно рассматривать напряженно-деформированное состояние не только консоли, но и зоны соединения, т.е. приопорного участка плиты в целом. В связи с разновариантным расположением, различным количеством и видом хомутов, сосредоточенных у подрезки, и горизонтальной арматуры в подрезке характер образования и развития трещин в каждом случае имел свои особенности.

Рассмотрим первоначально общий характер образования трещин, а затем частный случай. При нагрузке, составляющей 0,5...0,6 от разрушающей, образовалась наклонная трещина, проходящая через вершину угла подрезки. Ее развитие зависело от количества сосредоточенных поперечных наклонных хомутов у подрезки, и продольной арматуры консоли. При небольшом количестве указанной арматуры, находящейся в вершине входящего угла подрезки, наклонная трещина пересекает почти всю высоту опорной консоли. Траектория трещины при этом имела ломаный характер, смещаясь вверх относительно линии, соединяющей вершину угла и центр приложения силы, либо относительно линии, проходящей под углом 45° через вершину угла подрезки. При уровне нагружения, примерно равном 0,7...0,75 от разрушающей нагрузки, в рассматриваемом случае образуется вторая характерная наклонная трещина. Ее начало – в зоне нижнего угла подрезки, а наклон – более пологий. В случае большого количества сосредоточенной арматуры (вертикальная и наклонная) в подрезке и продольной арматуры в консоли наблюдалось появление серии коротких наклонных трещин в опорной консоли, в зоне внутреннего угла подрезки, в зоне нижнего угла подрезки и в растянутой зоне плиты. Область образования коротких прерывистых трещин, как правило, не распространялась на всю высоту или большую часть высоты плит. Такова общая

картина образования трещин приопорного участка. Анализ результатов экспериментов и напряженно-деформированного состояния приопорных зон позволил предложить классификацию характерных трещин. Характерными являются два вида трещин, которые мы назовем Crc-1, Crc-2, начинающихся в вершине входящего и нижнего угла подрезки. Трещина Crc-2 является как бы границей между опорной консолью плит, за пределом которой напряженное состояние плит соответствует обычным плитам без подрезки. Другая характерная особенность – появление серии наклонных прерывистых трещин, расположенных на участке между Crc-1 и Crc-2 (рис. 6).

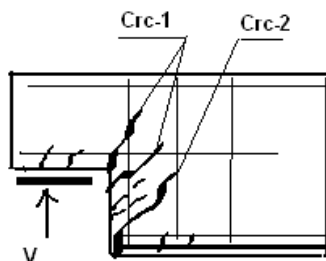


Рис. 6. Схема классификации трещин и виды разрушения многопустотных плит с подрезками

По трещине из входящего угла подрезки были разрушены образцы первой и второй серии, наклонные трещины в опорной зоне появились при нагрузке, которая составила  $(0,52...0,67)V_{exp}$ ; при нагрузке  $(0,64...0,78)V_{exp}$  ширина раскрытия трещин составила 0,4 мм. Характерно, что при слабой арматуре в зоне подрезки образовалась только одна трещина. После достижения трещинами ширины раскрытия 0,4 мм эта нагрузка была зафиксирована как контрольная разрушающая, хотя при дальнейшем нагружении плит удалось поднять нагрузку еще на 10 %. При разрушении образцов второй серии наблюдалось значительное раскрытие наклонных трещин, текучесть сосредоточенной у подрезки арматуры с последующим раздроблением бетона сжатой зоны над этими трещинами.

Экспериментальные образцы третьей серии были разрушены по нижней зоне. Цель этих испытаний – исследование влияния наклонной арматуры, расположенной за подрезкой, на прочность и трещиностойкость по наклонным сечениям в зоне входящего угла подрезки. В плитах этих серий при нагрузке  $(0,52...0,58)V_{exp}$  образовывалась угловая трещина из входящего угла подрезки. При дальнейшем нагружении эта трещина незначительно раскрывалась и развивалась под углом  $45^\circ$ , затем при нагрузках  $(0,56...0,64)V_{exp}$  образовывалась трещина в нижней части торца плиты в случае, если эти трещины не образовывались в момент обжатия. Затем наклонная трещина из входящего-угла развивалась и раскрывалась уже совсем незначительно, а нижняя трещина получала развитие и раскрывалась. По этой трещине происходило разрушение плит.

Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет сделать вывод, что сечение горизонтальной арматуры в подрезке, а также сосредоточенной у подрезки арматуры оказывает заметное влияние на несущую способность. Вертикальная арматура, сосредоточенная у подрезки  $A_{swl}$ , наклонная арматура  $A_{s,inc}$  принималась только в экспериментальных плитах, армированных по третьей схеме, определялась зависимость предельной поперечной силы от предельных усилий, воспринимаемых этой арматурой, т.е. чем больше арматуры  $A_{sc}$ ,  $A_{swl}$ ,  $A_{swlnc}$ , тем выше несущая способность наклонного сечения. Этот рост будет происходить до тех пор, пока не произойдет переход от данного вида разрушения к другому, т.е. к разрушению по нижней зоне. Прочность по наклонным сечениям у подрезки по всей высоте зависит от конструктивного решения опорных зон.

Испытание показало, что конструктивное решение в виде объединенной загнутой арматуры, верхняя часть которой используется в качестве горизонтальной арматуры  $A_{sc}$ , расположенной в сжатой зоне подрезки, а нижняя часть – в качестве арматуры  $A_s$  (образцы третьей серии), увеличивает трещиностойкость и несущую способность плит по наклонному сечению, исходящему из внутреннего угла подрезки по сравнению с конструктивным решением образцов второй схемы армирования, но она создает условия для активного роста трещин в нижней зоне подрезки, так как образовывается малоармированный участок плит. Если в первом случае разрушение наступило до достижения предельного сопротивления арматуры  $A_s$ , то во втором случае разрушение наступило при деформации в арматуре соответствующей напряжениям текучести.

При испытании экспериментальных образцов коэффициент запаса для второй серии составил  $V_{exp}/V_{расч} = 1,12...1,26$ , для третьей серии  $1,1...1,2$ . Из этих сравнений видно, что конструктивное решение армирования приопорных зон (подрезок), т.е. с дополнительной наклонной арматурой менее эффективны. Кроме того, при их изготовлении возникают определенные трудности, а также увеличивается



расход арматурной стали. Установлено, что предварительное напряжение оказывает отрицательное влияние на трещиностойкость верхней зоны многопустотных плит с подрезками при действии внешней поперечной нагрузки. В плитах с малым уровнем обжатия предварительное напряжение оказывает незначительное влияние на образование трещин из входящего угла. В таких плитах образуются трещины, имеющие наклон к продольной оси плиты. В плитах с более высоким уровнем обжатия поперечная нагрузка образования трещин из входящего угла уменьшается. При этом в начале трещины имеется горизонтальный участок. При еще большем уровне обжатия трещины образуются в момент отпуска напрягаемой арматуры и развиваются при приложении поперечной нагрузки. Исследования позволили также установить, что разрушение плит может происходить по трещине, образовавшейся на нижней грани плиты. Трещина может иметь свое начало даже из внешнего угла подрезки. При этом наклонная трещина пересекала горизонтальную арматуру в подрезке  $A_{sc}$ .

В экспериментах не наблюдалось образование трещин, огибающих эту арматуру. Раскрытие трещин на уровне нижней рабочей арматуры было больше раскрытия трещин на уровне горизонтальной арматуры в подрезке. Эти факты позволяют сделать вывод о том, что горизонтальная арматура в подрезке участвует в работе наклонного сечения, но ее прочностные характеристики не полностью используются.

По результатам показаний тензодатчиков было построено поле деформаций в бетоне при опорных участках многопустотных плит с подрезками. Анализ экспериментальных исследований показывает, что главные сжимающие напряжения концентрируются в наклонный поток, направленный от силы к опоре. Растягивающие напряжения концентрируются в пучок у вершины входящего угла подрезки, затем рассеиваются в обе стороны. Изменение армирования опорной зоны качественно не меняет картины напряженно-деформированного состояния в бетоне опорной зоны. Характерными являются наклонные сечения, одно из которых проходит через вершину угла примыкания консоли к плите, а другое через вершину нижнего угла подрезки. Характер распределения деформаций (напряжений) для этих сечений одинаков. Максимальные значения располагаются в вершинах входящего и нижнего угла подрезки, т.е. в месте концентрации растягивающих деформаций и наибольших деформаций перемещения плиты при прогибах. Распределение главных напряжений, полученное численным методом, имеет одинаковый характер с распределением, полученным опытным путем.

**Конструирование опорных зон предварительно напряженных многопустотных плит с подрезками.** Принцип армирования опорных зон предварительно напряженных многопустотных плит с подрезками определяется характером их работы и видами разрушения. Он заключается в том, что в растянутой зоне короткой консоли подрезки располагается продольная арматура, а за подрезкой по всей высоте плит предусматривается установка сосредоточенных вертикальных хомутов. По низу плит располагается предварительно напряженная арматура. Применение отгибов, расположенных у вершины угла подрезки, оказалось нецелесообразно, так как они незначительно повышают несущую способность при опорной зоне, но вместе с тем возникают определенные трудности при их изготовлении. Наиболее эффективной поперечной арматурой являются вертикальные хомуты. При продольном обжатии бетона предварительно напряженных плит возникают поперечные растягивающие напряжения, которые вызывают в некоторых опорных зонах (внутреннем и нижнем угле подрезки) образование продольных трещин. При разрушении в некоторых опорных зонах наблюдалось проскальзывание продольной арматуры. Для предотвращения образования трещин при обжатии бетона многопустотных плит с подрезками и проскальзывании продольной арматуры рекомендуется снижать растягивающее напряжение в продольных сечениях. Можно также принимать в зоне передачи напряжения подстановку спиралей. Предотвращение образования продольных трещин при обжатии имеет важное значение, так как экспериментально установлено, что раскрытие трещин при нагружении плит без продольных трещин при обжатии было меньше ширины раскрытия аналогичных трещин, в которых при обжатии возникали продольные трещины.

**Заключение.** Проведенные нами экспериментальные исследования предварительно напряженных многопустотных плит с подрезками позволили предложить наиболее эффективный вид армирования подрезки, представленный на рисунке 7.

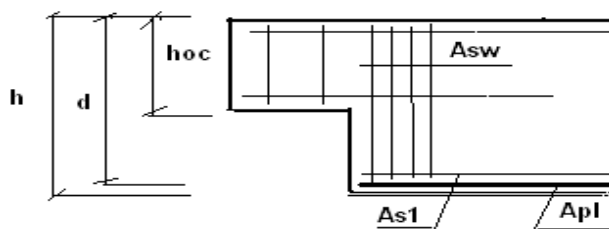


Рис. 7. Предлагаемое конструктивное решение опорных зон  
предварительно напряженных многопустотных плит с подрезками

Этот вид армирования подрезки заключается в том, что сосредоточенные за подрезкой хомуты объединены в пакет. Такой вид армирования увеличивает несущую способность опорных зон (подрезки) в 1,1...1,2 раза по сравнению с образцами с одиночными сосредоточенными хомутами. На основе данного предложения институтом «Белпромпроект» разработаны рабочие чертежи предварительно напряженных многопустотных плит перекрытий с подрезками, рассчитанными на применение их в составе многоэтажных жилых и общественных зданий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аль Нахди, А.С. Напряженно-деформированное состояние, трещиностойкость и прочность опорных зон предварительно напряженных многопустотных плит с подрезками: дис. ... канд. техн. наук / А.С. Аль Нахди. – Минск, 1996. – 143 с.
2. ТКБ EN 1992-1-2: 2009 Euro code 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings (Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила).
3. Залесов, А.С. Особенности работы приопорных участков балок / А.С. Залесов, В.Н. Банков // Бетон и железобетон. – 1984. – № 7. – С. 20 – 22.
4. Залесов, А.С. Расчет прочности поперечных участков балок на основе двухблочной модели / А.С. Залесов, Г.И. Попов, Б.У. Усенаев // Бетон и железобетон. – 1986. – № 2. – С. 34 – 35.
5. Баранова, Т.И. Короткие железобетонные элементы (Экспериментально-теоретические исследования, методы расчета, конструирование): дис. ... д-ра техн. наук / Т.И. Баранова. – М., 1986. – 473 с.
6. Баранова, Т.И. Новый метод расчета поперечной арматуры в коротких элементах / Т.И. Баранова // Бетон и железобетон. – 1987. – № 3. – С. 22 – 24.
7. Комаров, В.А. Прочность консольных опор (с подрезкой) железобетонных балок при статическом нагружении: дис. ... канд. техн. наук / В.А. Комаров. – М., 1986. – 222 с.
8. Рекомендации по расчету и конструированию опорных зон ригелей с подрезками серии 1.020-1/83 / НИИЖБ, ЦНИИЭПТБз.ТК. – М., 1988.
9. Расчет железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям / А.С. Залесов [и др.]. – М.: Стройиздат, 1988. – 320 с.
10. Сигалов, Э.Е. Влияние предварительного напряжения на прочность по наклонным сечениям железобетонных изгибаемых элементов / Э.Е. Сигалов, И.Н. Старишко // Сб. тр. МИСИ. – 1981. – № 990. – 2007. – № 185. – С. 108.
11. Залесов, А.С. Условия образования наклонных трещин в стенках железобетонных балок из тяжелого и облегченного бетонов / А.С. Залесов, Г.С. Алиев, Р.Л. Маглян // Совершенствование методов расчета и исследования новых железобетонных конструкций. – Л., 1997. – С. 66 – 75.

Поступила 02.11.2011

#### THE STRESS-STRAIN STATE OF THE REFERENCE ZONES THE PRE-STRESSED HOLLOW CORE SLABS WITH TRIMMING

A.C. AL NAHDI, A. KOLTUNOV

*The results of experimental research of reference zones of the pre-stressed hollow core slabs with trimming. Plates were made in existing equipment and no complications with the device trimming not there. In the samples varied horizontal and focused reinforcing steel in the trimming and the value of preliminary tension. It is established, that the formation of cracks and destruction depend on constructive solution of the reference zones, with increase of the cross section of the reinforcing steel in pruning linearly increases the strength of the effect of bending moment in an oblique cross-section and in the destruction of the observed fluctuation of both horizontal and concentrated in the trimming. The pre-voltage does not affect the strength of the plates. Tilting steel has trimming increases crack resistance and load-bearing capacity on the inclined cross-section of the internal angle of the cutting, but it creates the conditions for the active growth of cracks in the bottom zone of trimming. It is established, that destruction may occur on inclined cracks from the inner trimming or on the bottom edge of the plates. Proposal for construction of bearing zones of hollow-core slabs with trimming.*