

*Большое внимание в настоящее время уделяется реконструкции и техническому перевооружению зданий и сооружений (промышленного и жилого фонда) с максимальным их использованием. Реконструкция зданий и сооружений напрямую связана с проблемами усиления и восстановления конструкций зданий.*

*Усиление железобетонных элементов вследствие их монолитности и скрытности арматуры имеет своеобразную специфику и является достаточно сложным, дорогостоящим и трудоемким процессом. Поэтому выбираемый способ усиления должен быть простым и эффективным, без перерасхода материалов и с достаточной надежностью усиленных конструкций.*

УДК 624.012.45-413

## УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ АРМАТУРОЙ

*д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ, САЛЕХ АЛИ ХАМУД  
(Полоцкий государственный университет)*

*Представлена экспериментально апробированная методика расчета прочности, жесткости и трещиностойкости железобетонных многопустотных плит перекрытия, усиленных установкой дополнительной предварительно напряженной арматуры с наращиванием сжатой зоны бетонного сечения. Показано, что разработанная методика расчета учитывает напряженно-деформированное состояние конструкции в момент времени усиления, различные схемы работы конструкции до и после усиления и предварительное напряжение дополнительной арматуры.*

Многопустотные железобетонные панели являются самым массовым видом сборных конструкций, применяющихся как в гражданском, так и в промышленном строительстве. В процессе эксплуатации панели получают дефекты и повреждения - уменьшается прочность бетона; вследствие коррозии изменяется площадь поперечного сечения рабочей арматуры; снижается сцепление арматуры с бетоном и уровень предварительного напряжения, что существенно влияет на прочность, жесткость и трещиностойкость.

В практике для усиления многопустотных железобетонных плит перекрытия существуют различные способы усиления. Эффективным и широко распространенным способом усиления плит является метод усиления наращиванием поперечного сечения усиливаемых плит с установкой дополнительной арматуры в растянутой зоне.

Нами использовался комбинированный метод усиления, который заключается в установке дополнительной предварительно напряженной арматуры в растянутой зоне и в увеличении поперечного сечения наращиванием со стороны верхней грани.

Впервые в практике усиления принят и исследован метод усиления растянутой зоны изгибаемых железобетонных конструкций установкой предварительно напряженной высокопрочной арматуры в качестве дополнительной.

В приопорной зоне находящейся под нагрузкой сборной железобетонной многопустотной панели устраиваются щели, устанавливаются ограничительные пластины с прорезью для арматуры. Затем вдоль пустот вводятся арматурные стержни, отгибаются их концы и бетонируются пустоты в приопорных зонах. После выдержки бетона приопорных зон напрягается дополнительная арматура натяжными болтами, расположенными в отверстиях со стороны нижней грани, и устанавливается опалубка под отверстиями со стороны нижней грани и со стороны верхней грани для наращивания. Заполняется оставшееся пространство пустот и верхняя грань плит бетонной смесью. После ее выдержки снимают опалубку и обрезают выступающие концы натяжных болтов (рис. 1).

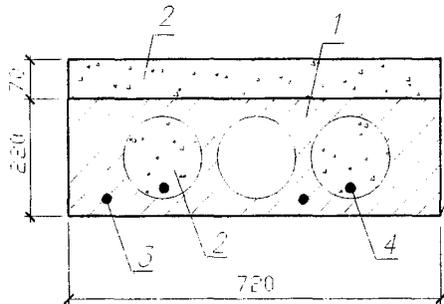


Рис. 1. Схема усиления многопустотной плиты:  
1 - усиливаемая конструкция; 2 - бетон наращивания;  
3 - продольная основная арматура; 4 - дополнительная арматура

При увеличении внешней нагрузки предварительно напряженная арматура усиления работает как имеющая сцепление с бетоном.

Поскольку в реальных условиях эксплуатации изгибаемых конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений возникает проблема невозможности ее полной разгрузки, следует учитывать действующую нагрузку при усилении.

Перед усилением железобетонные конструкции эксплуатируемых строительных сооружений, находящиеся под нагрузкой, имеют напряженно-деформированное состояние, отличное от первоначального - после их изготовления [1]. Усиленная плита перед загрузением превращается в многокомпонентную конструкцию, состоящую из основной части, находящейся в определенном напряженно-деформированном состоянии, и дополнительной части, находящейся в первоначальном напряженно-деформированном состоянии.

Из деформационной модели следует формулировка задачи расчета напряженно-деформированного состояния нормального сечения как задачи поиска такого расположения плоскости распределения деформаций в 2-мерном пространстве  $\varepsilon = \{\varepsilon_y, \varepsilon_z\}$ , которое бы соответствовало действию на элемент вектора нагрузки  $F = \{My\}$ . Таким образом, решение задачи находится в 2-мерном пространстве.

Для решения поставленной задачи для варианта с усилением распределение деформаций определяется из выражения:

$$\varepsilon(y) = \varepsilon_z - \frac{1}{r_y}(y - y_0) + \varepsilon_1(y), \quad (1)$$

где  $\varepsilon(y)$  – деформация элементарной площадки;  $y$  – координата центра элементарной площадки;  $\varepsilon_z$  – деформация поперечного сжатия/растяжения;  $\varepsilon_1(y)$  – деформация в центре элементарной площадки, исходя из принципа суперпозиции для относительной деформации [2].

В методике расчета прогиб определяется с использованием кривизны в соответствии с требованиями СНБ 5.03.01-02:

- кривизна железобетонных многопустотных плит определяется по формуле

$$\left(\frac{1}{r}\right) = \frac{\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c2}}{h}; \quad (2)$$

- прогиб железобетонных многопустотных плит определяется из выражения

$$a_{k,m} = \int_0^1 \overline{M}(x) \frac{1}{r(x)} dx, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{c1}$  – относительная деформация крайнего сжатого волокна бетона;  $\varepsilon_{c2}$  – относительная деформация крайнего растянутого волокна бетона;  $h$  – расстояние между крайними волокнами бетона;  $\overline{M}(x)$  – изгибающий момент в сечении  $x$  от действия единичной силы;  $\frac{1}{r(x)}$  – кривизна плиты в сечении  $x$  от расчетной комбинации внешних нагрузок, при которой определяется прогиб.

Для определения изгибной жесткости усиленной плиты используется процедура численного интегрирования по высоте сечения. Известное значение кривизны продольной оси элемента при заданных усилиях позволит найти соответствующую изгибную жесткость из соотношения

$$\frac{1}{r_y} = \frac{M_y}{B_y}.$$

При заданном внешнем усилии элемента до усиления изгибная жесткость может иметь такой вид:

$$B = \iint_A E(\varepsilon(y)) \cdot (y - y_0)^2 \cdot dx dy. \quad (4)$$

Изгибная жесткость усиленного элемента определяется интегрированием по сечению жесткостей бетона и арматуры, найденных относительно центра тяжести приведенного сечения. При заданном усилии от внешней нагрузки ( $M_{Sd1} + M_{Sd2}$ ) в результате итерационного процесса определяются кривизна  $\frac{1}{r'}$  и центр тяжести приведенного сечения  $y'_0$ :

$$y'_0 = \frac{\iint_A E(y) y dx dy + \iint_A E_{ad}(y) y dx dy}{\iint_A E(y) dx dy + \iint_A E_{ad}(y) dx dy}. \quad (5)$$

Очевидно, что для усиления плиты путем установки дополнительной арматуры в растянутой зоне и увеличения высоты сечения сжатой зоны данное соотношение приводит к предложенной В.И. Мурашовым формуле для расчета жесткости нормального сечения под нагрузкой:

$$B_{ad} = \iint_A E(\epsilon(y)) \cdot (y - y'_0)^2 \cdot dx dy + \iint_A E_{ad}(\epsilon_{ad}(y)) \cdot (y - y'_0)^2 \cdot dx dy, \quad (6)$$

где  $E(\epsilon(y))$  – секущий модуль деформаций бетона или арматуры основного сечения, МПа;  $E_{ad}(\epsilon_{ad}(y))$  – секущий модуль деформаций бетона или арматуры дополнительного сечения;  $y'_0$  – расстояние от выбранной оси до центра тяжести приведенного сечения.

Для определения расчетной ширины раскрытия нормальных трещин усиленных многопустотных плит также возможно применение зависимости, как и для обычных элементов, предложенной в СНБ 5.03.01:

$$w_k = \beta \cdot s_{rm} \cdot \epsilon_{sm}, \quad (7)$$

где  $w_k$  – расчетная ширина раскрытия трещин;  $s_{rm}$  – среднее расстояние между трещинами;  $\epsilon_{sm}$  – средние деформации арматуры, определяемые при соответствующей комбинации нагрузок;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий отношение расчетной ширины раскрытия трещин к средней.

Средние относительные деформации растянутой арматуры  $\epsilon_{sm}$  определяются для сечения с трещинами путем решения расчетной системы уравнений деформационной модели, учитывая неравномерности распределения деформаций растянутой арматуры на участке между трещинами:

$$\epsilon_{sm} = \epsilon_s \cdot \psi_s, \quad (8)$$

где  $\epsilon_s$  – деформация растянутой арматуры в сечении с трещинами, определяемая в общем случае из решения расчетной системы уравнений деформационной модели от действия изгибающего момента и продольной силы;  $\psi_s$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения деформаций растянутой арматуры на участках между трещинами, величину которого допускается определять по формуле:

$$\psi_s = \left[ 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \left( \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right], \quad (9)$$

где  $\sigma_s$  – напряжения в растянутой арматуре от усилий, вызванных расчетной комбинацией нагрузок;  $\sigma_{sr}$  – напряжения в растянутой арматуре, рассчитанные для сечения с трещинами, от усилий, при которых образуются трещины;  $\beta_1$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от вида арматуры;  $\beta_2$  – коэффициент, учитывающий длительность действия нагрузки.

Поскольку многопустотные железобетонные плиты являются предварительно напряженными конструкциями, поэтому вводится дополнительный этап расчета, на котором рассматривается железобетонный элемент в момент отпуска предварительного напряжения. При этом внешней нагрузкой является усилие предварительного напряжения арматуры. Тогда для железобетонных элементов с предварительным напряжением отдельных стержней арматуры уравнения напряженно-деформированного состояния запишутся в виде:

$$\begin{cases} \iint_A \sigma(y)(y - y_0) dx dy = \sum_k \sigma_{pk} A_{pk} (y_{pk} - y_0) \\ \iint_A \sigma(y) dx dy = \sum_k \sigma_{pk} A_{pk} \\ \epsilon(y) = \frac{1}{r} (y - y_0) \\ \sigma(y) = \begin{cases} f_s(\epsilon(y)), & \text{если } X, Y \text{ точка находится в области арматуры} \\ f_c(\epsilon(y)), & \text{если } X, Y \text{ точка находится в области бетона} \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

где  $\sigma(y)$  – нормальные напряжения в бетоне и арматурном стержне;  $\sigma_{pk}$  – нормальные напряжения в  $k$ -том предварительно напряженном арматурном стержне в момент отпуска;  $y_0$  – координата центра изгиба сечения (нейтральной точки);  $y_{pk}$  – координата  $y$   $k$ -того предварительно напряженного арматурного стержня;  $\frac{1}{r}$  – кривизна продольной оси элемента относительно оси  $y$ ;  $A_{pk}$  – площадь  $k$ -той арматуры;  $\epsilon(y)$  – функция распределения деформаций.

На первом этапе расчета принимается первоначальная расчетная схема при заданном усилии от внешней нагрузки ( $M_{Sd1}$ ). Деформационная модель напряженно-деформированного состояния нормального сечения представляет собой систему сингулярных нелинейных уравнений интегрального вида:

$$\begin{cases} \iint_A \sigma(y)(y - y_o) dx dy - \sum_k \sigma_{pk} A_{pk} (y_{pk} - y_o) = -M_{Sd1} \\ \iint_A \sigma(y) dx dy - \sum_k \sigma_{pk} A_{pk} = 0 \\ \varepsilon_1 = \frac{1}{r_1} (y - y_o) + \varepsilon(y) \\ \sigma(y) = \begin{cases} f_s(\varepsilon(y)), & \text{если } X, Y \text{ точка находится в области арматуры} \\ f_c(\varepsilon(y)), & \text{если } X, Y \text{ точка находится в области бетона} \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

где  $M_{Sd1}$  – изгибающий момент от нагрузки до усиления;  $\varepsilon(y)$  – функция распределения деформаций на момент отпуска;  $\varepsilon_1(y)$  – функция распределения деформаций под нагрузкой этапа № 1 – этапа загрузки при  $M_{Sd1}$ .

Предварительное напряжение в дополнительной арматуре создается путем ее натяжения с помощью натяжных болтов с отклонением в пролете, с упором на плиту (рис. 2).

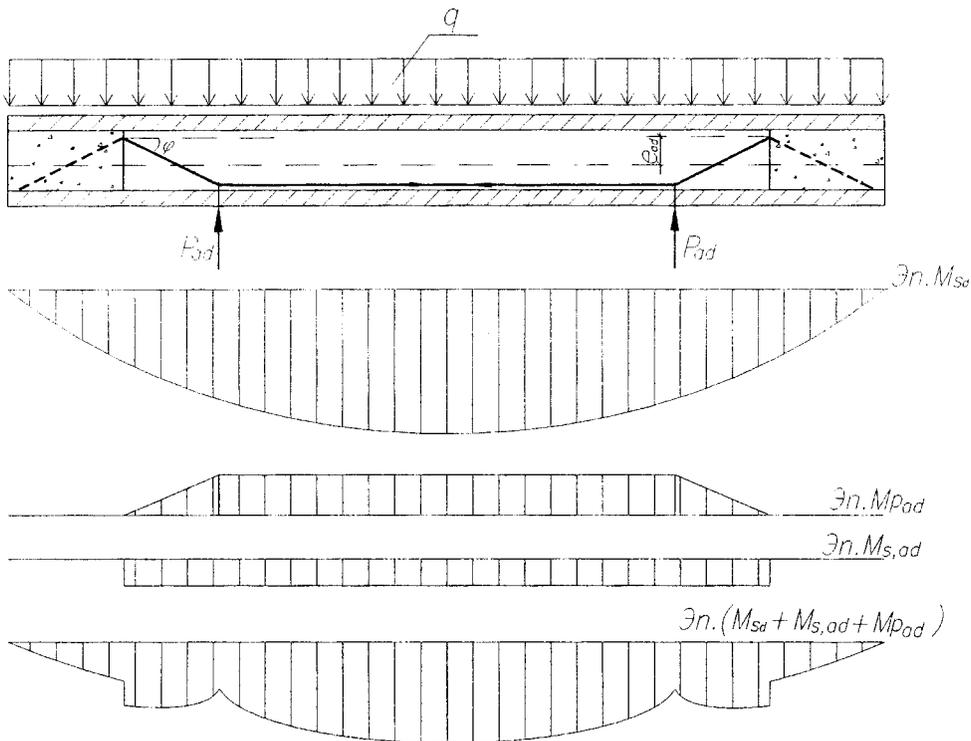


Рис. 2. Схема усиленной конструкции шпренгельной затяжкой

Усиливаемая плита дополнительной арматурой в момент усиления и до бетонирования пустот является плитой, усиленной шпренгельными затяжками. Устройство затяжек повышает степень внутренней статической неопределенности в усиленной плите и превращает ее в статически неопределимую комбинированную систему, состоящую из железобетона и затяжки.

При усилении конструкции под нагрузкой затяжка оказывает на элемент разгружающее действие за счет сосредоточенных сил в местах перегиба, а закрепление затяжки в верхнем уровне сечения усиливается догружает конструкцию изгибающим моментом  $M_{s,ad}$ .

$$P_{ad} = N_{ad} \operatorname{tg} \varphi, \quad (12)$$

$$N_{Pad} = \sigma_{s,ad} A_{s,ad} \cos \varphi. \quad (13)$$

Поскольку опорные давления от шпренгельной затяжки передаются на усиливаемую конструкцию внецентренно, то в конструкции, кроме сжатия, возникают концевые моменты, которые равны [4]:

$$M_{s,ad} = N_{ad} e_{ad} \tag{14}$$

где  $e_{ad}$  – расстояние между местом закрепления затяжки и осью, проходящей через центр тяжести сечения конструкции.

Уравнение напряженно-деформированного состояния нормального сечения в пролете изгибаемого железобетонного элемента, усиленного шпренгельной затяжкой в растянутой зоне, при действии изгибающего момента ( $M_{Sd1} + M_{pad} + M_{s,ad}$ ) будет иметь вид:

$$\begin{cases} \iint_A \sigma(y)(y - y_o) dx dy - \sum_k \sigma_{pk} A_{pk} (y_{pk} - y_o) + M_{Sd1} + M_{pad} + M_{s,ad} = 0 \\ \iint_A \sigma(y) dx dy - \sum_k \sigma_{pk} A_{pk} = N_{ad} \\ \varepsilon_1(y) = \frac{1}{r_1} (y - y_o) + \varepsilon(y) \\ \sigma(y) = \begin{cases} f_s(\varepsilon_1(y)), \text{ если } X, Y \text{ точка находится в области арматуры} \\ f_c(\varepsilon_1(y)), \text{ если } X, Y \text{ точка находится в области бетона} \end{cases} \end{cases} \tag{15}$$

Расчетное поперечное сечение элемента при натяжении дополнительной арматуры (затяжки) и распределение относительных деформаций представлено на рис. 3.

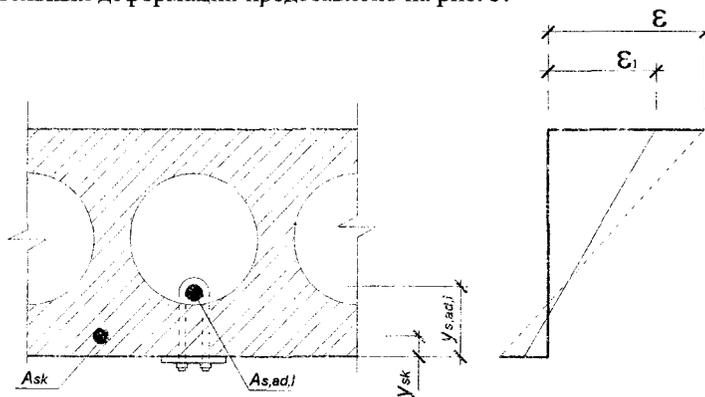


Рис. 3. Расчетное поперечное сечение элемента при натяжении дополнительной арматуры (затяжки) и распределение относительных деформаций

После наращивания сжатой зоны и заполнения пустот усиленной плиты бетоном усиленная конструкция подвергается дополнительной нагрузке от собственного веса дополнительного бетона. Усиленная конструкция на этом этапе усиления получает еще дополнительный изгибающий момент ( $M_{c,ad,self}$ ).

Уравнение напряженно-деформированного состояния нормального сечения в пролете изгибаемого железобетонного элемента при действии изгибающего момента ( $M_{Sd1} + M_{pad} + M_{s,ad} + M_{c,ad,self}$ ) будет иметь вид:

$$\begin{cases} \iint_A \sigma(y)(y - y_o) dx dy - \sum_k \sigma_{pk} A_{pk} (y_{pk} - y_o) + M_{Sd1} + M_{pad} + M_{s,ad} + M_{c,ad,self} = 0 \\ \iint_A \sigma(y) dx dy - \sum_k \sigma_{pk} A_{pk} = N_{ad} \\ \varepsilon_{ad,self}(y) = \frac{1}{r_{ad,self}} (y - y_o) + \varepsilon_1(y) \\ \sigma(y) = \begin{cases} f_s(\varepsilon_1(y)) \text{ если } X, Y \text{ точка находится в области арматуры} \\ f_c(\varepsilon_1(y)) \text{ если } X, Y \text{ точка находится в области бетона} \end{cases} \end{cases}$$

где  $M_{c,ad,self}$  – изгибающий момент от собственного веса бетона наращивания;  $\varepsilon_{ad,self}$  – функция распределения деформаций после наращивания.

Как известно, усиливаемая плита состоит из двух частей: основной и дополнительной. Поэтому гипотеза плоских сечений для относительных деформаций всего сечения усиленного под нагрузкой железобетонного элемента не выполняется.

Поскольку при усилении в основной части сечения уже имеются начальные деформации от воздействия внешней нагрузки и усилия предварительного обжатия, принимаем гипотезу плоских сечений в постановке В.И. Мурашова - Я.М. Немцовского [3] отдельно для наращивания и для приращений относительных деформаций основной части сечения конструкции.

Относительные деформации бетона основного сечения конструкции определяются как сумма относительных деформаций до усиления и относительных деформаций после усиления.

На втором этапе расчета после усиления (с учетом наличия основной и дополнительной частей сечения, условия равновесия усилий и условия совместности деформирования) уравнения напряженно-деформированного состояния нормального сечения в пролете изгибаемого железобетонного элемента, усиленного дополнительной предварительно напряженной арматурой в растянутой зоне и наращиванием поперечного сечения бетона сжатой зоны железобетонного элемента, при действии изгибающего момента ( $M_{Sd1} + M_{Sd2} + M_{pad} + M_{s,ad}$ ) имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \iint_A \sigma(y)(y-y_0) dx dy - \sum_k \sigma_{pk} A_{pk} (y_{pk} - y_0) + \iint_{A,ad} \sigma_{ad}(y)(y-y_0) dx dy - \\ - \sum_k \sigma_{pad,l} A_{pad,l} (y_{s,d,l} - y_0) + M_{Sd1} + M_{Sd2} + M_{pad} + M_{s,ad} = 0 \\ \iint_A \sigma(y) dx dy - \sum_k \sigma_{pk} A_{pk} + \iint_{A,ad} \sigma_{ad}(y) dx dy - \sum_k \sigma_{pad,l} A_{pad,l} = N_{ad} \\ \varepsilon_2(y) = \frac{1}{r_2} (y - y_0) + \varepsilon_{c,ad,eff}(y) \\ \sigma(y) = \begin{cases} f_s(\varepsilon_2(y)), & \text{если } X, Y \text{ точка находится в области арматуры} \\ f_c(\varepsilon_2(y)), & \text{если } X, Y \text{ точка находится в области бетона} \end{cases} \\ \varepsilon_{2,ad}(y) = \frac{1}{r_2} (y - y_0) \\ \sigma_{ad}(y) = \begin{cases} f_{s,ad}(\varepsilon_{2,ad}(y)), & \text{если } X, Y \text{ точка в области дополн. арматуры} \\ f_{c,ad}(\varepsilon_{2,ad}(y)), & \text{если } X, Y \text{ точка в области дополн. бетона} \end{cases} \end{array} \right. \quad (16)$$

где  $M_{Sd2}$  – дополнительный изгибающий момент от нагрузки после усиления;  $\sigma_{ad}(y)$  – нормальные напряжения в дополнительном бетоне и дополнительном стержне арматуры;  $\sigma_{pad,l}$  – нормальные напряжения в  $l$ -том предварительно напряженном дополнительном арматурном стержне в момент отпуска;  $y_{s,d,l}$  – координата  $y$   $l$ -того предварительно напряженного дополнительного арматурного стержня.

На основе вышепредложенной методики расчета разработана программа для расчета усиленных железобетонных многопустотных плит перекрытий. Для определения внутренних усилий и перемещений выделяются два этапа расчета:

1. Определение напряженно-деформированного состояния в неусиленной железобетонной плите в момент усиления с учетом постоянной и временной нагрузки при первоначальном расчетном сечении (рис. 4, а).
2. Определение напряженно-деформированного состояния в усиленной железобетонной плите с учетом увеличения сечения и армирования (рис. 4, б).

Методика расчета прочности, жесткости и трещиностойкости железобетонных предварительно напряженных плит перекрытия, усиленных установкой дополнительной предварительно напряженной арматуры с наращиванием сечения сжатой зоны, подтверждались результатами экспериментальных исследований.

В качестве варьируемых факторов были приняты:

- класс дополнительной арматуры: S500 (I серия) и S800 (II серия);
- уровень предварительного напряжения дополнительной арматуры: шах, mid, min.

Испытывали 7 железобетонных многопустотных плит перекрытия размером 220(h) x 740 x 5980 мм, изготовленных по типовой серии Б1.0411-1.2000.

Все опытные образцы испытывались по однопролетной балочной схеме с приложением четырех сосредоточенных сил с помощью металлических траверс и подвесных грузов (рис. 5).

На первом этапе испытания производилось загрузение опытной плиты в неусиленном состоянии нагрузкой, соответствующей эксплуатационному уровню - примерно 40 % от расчетной нагрузки.

Перед загрузением первого этапа все дополнительные стержни арматуры были смонтированы в плиту, но находились в ненапряженном состоянии. Загрузение осуществлялось поэтапно путем подвешивания штучных грузов.

Затем производилось натяжение дополнительных арматурных стержней с последующим бетонированием пустот и наращиванием со стороны верхней грани.

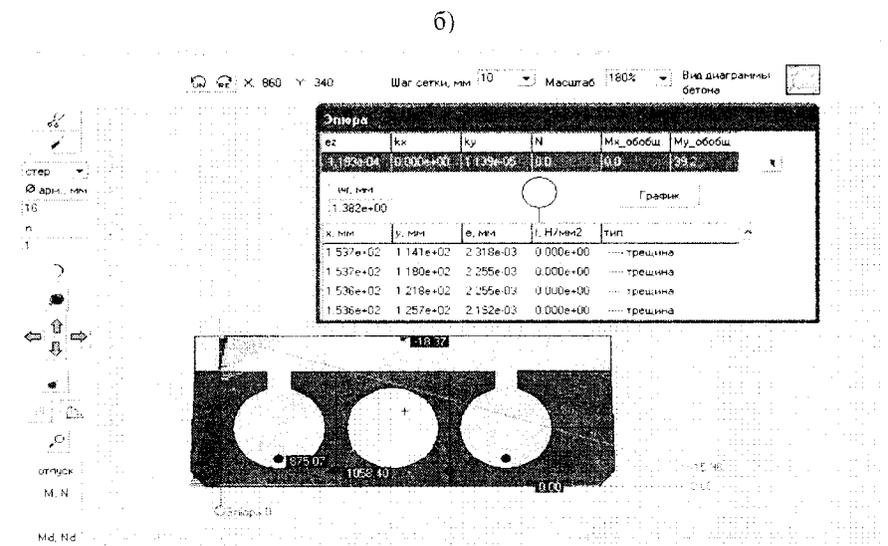
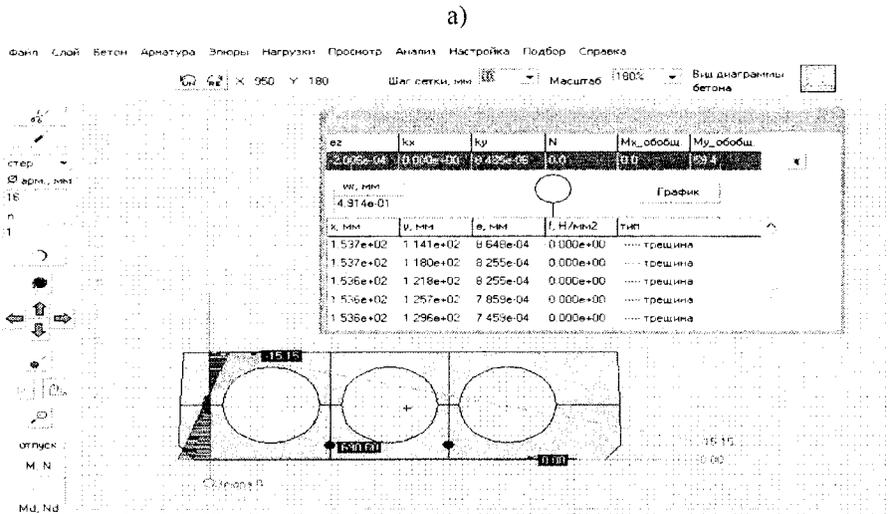


Рис. 4. Схема методики расчета усиленных многопустотных плит:  
а - расчет до усиления; б) расчет после усиления



Рис. 5. Общий вид испытательной установки опытных плит

После набора прочности дополнительным бетоном продолжалось нагружение опытной плиты сосредоточенными силами от гидравлического домкрата через траверсы.

Для опытных образцов величина разрушающего изгибающего момента с учетом бетона наращивания и собственного веса плиты определялась максимальным значением нагрузки, при которой арматура достигла условного или физического предела текучести.

Из результата испытания опытных многопустотных плит, усиленных установкой дополнительной арматуры в растянутой зоне, отмечено увеличение прочности по сравнению с прочностью неусиленной (эталонной) плиты в 2 - 2,7 раза. В плитах с максимальным предварительным натяжением дополнительная арматура достигает предела текучести раньше основной арматуры. В плитах со средним предварительным натяжением дополнительная и основная арматуры достигают предела текучести почти одновременно. В плитах с минимальным предварительным натяжением основная арматура достигает предела текучести раньше дополнительной арматуры.

В процессе испытаний опытных плит были получены данные о характере образования и развития трещин, ширине их раскрытия и прогибах. Сопоставление опытных и расчетных данных по жесткости производилось для уровня эксплуатационных нагрузок. Величину этих нагрузок получали путем деления значения максимальной нагрузки на коэффициент надежности по нагрузке, равный 1,25.

При натяжении дополнительной арматуры под нагрузкой наблюдалось уменьшение прогиба (участок 2-3, рис. 6). Очевидно, что уменьшение прогиба связано с увеличением жесткости усиленной конструкции. Величина уменьшения прогиба прямо пропорционально связана с величиной предварительного напряжения в дополнительной арматуре.

После устройства наращивания сжатой зоны бетона в опытных плитах под нагрузкой наблюдался рост прогиба при неизменной нагрузке (участок 3-4, рис. 6).

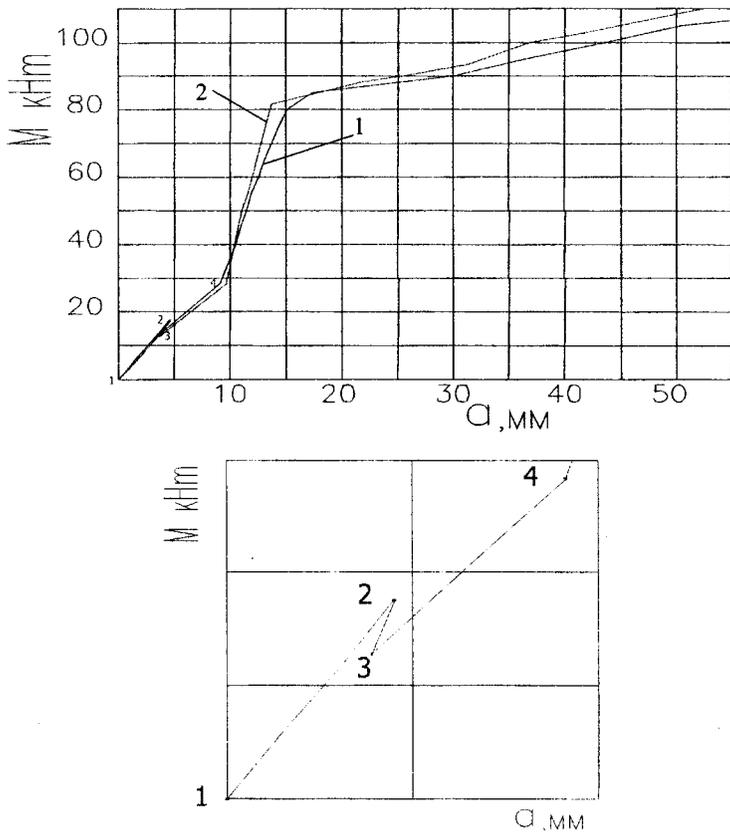


Рис. 6. Зависимость прогибов в середине пролета от изгибающего момента:  
1 - по опытным данным; 2 - по расчетным данным

Для опытных образцов при постоянном увеличении нагрузки деформации арматуры постепенно возрастали до значений, соответствующих пределу текучести, в результате чего наблюдалось интенсивное нарастание прогиба без заметного увеличения нагрузки.

Результаты сопоставления опытных и расчетных значений разрушающего изгибающего момента для опытных образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Опытные и расчетные характеристики прочности нормальных сечений опытных образцов

Серия	Марка образца	$M_{sd}^{ex}$ , кН·м	$M_{sd}^{clc}$ , кН·м	$M_{sd}^{ex} / M_{sd}^{clc}$	$M_{sd}^{ex} / M_{sd}^{et}$
I	П-I-min	102	97	1,05	2,04
	П-I-mid	100	96	1,04	2
	П-I-max	100	96	1,04	2
II	П-II-min	131	121	1,08	2,62
	П-II-mid	127	122	1,04	2,54
	П-II-max	125	122	1,02	2,5

Условные обозначения:  $M_{sd}^{ex}$  – изгибающий момент, соответствующий разрушающей нагрузке по результатам испытаний;  
 $M_{sd}^{clc}$  – теоретическое значение разрушающего изгибающего момента;  
 $M_{sd}^{et}$  – изгибающий момент эталонного образца.

Испытания показали, что уровень предварительного напряжения дополнительной арматуры влияет на ширину раскрытия трещин и прогибы изгибаемых элементов при кратковременном нагружении.

При минимальном предварительном напряжении дополнительной арматуры средняя ширина раскрытия трещин в опытных плитах в 1,6 раза, а прогиб в 1,4 раза больше, чем при максимальном предварительном напряжении.

Зависимость прогиба от изгибающего момента при эксплуатационной нагрузке для I и II серий представлена на рис. 7, результаты сопоставления опытных и расчетных характеристик жесткости и трещиностойкости опытных образцов - в табл. 2.

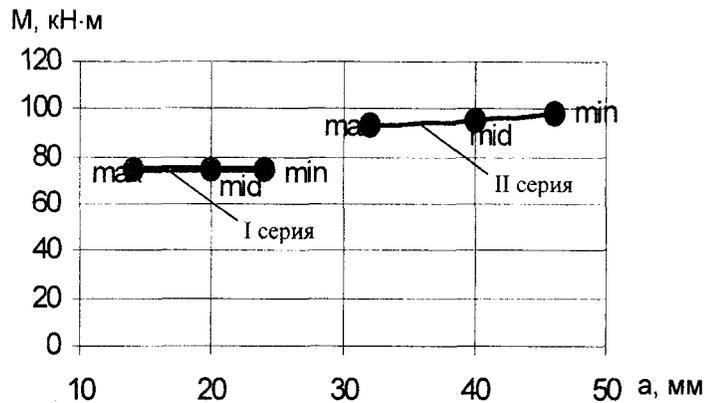


Рис. 7. Зависимость прогиба от изгибающего момента при эксплуатационной нагрузке для I и II серий

Таблица 2

Опытные и теоретические характеристики жесткости и трещиностойкости опытных образцов

Серия	Марка образца	Ширина раскрытия трещин, мм		$w_k^{ex} / w_k^{th}$	Прогиб, мм		$a_k^{ex} / a_k^{th}$
		$w_k^{ex}$	$w_k^{th}$		$a_k^{ex}$	$a_k^{th}$	
I	П-I-min	0,4	0,4	1	23	21	1,095
	П-I-mid	0,3	0,32	0,94	20	18	1,1
	П-I-max	0,25	0,29	0,86	14	13	1,08
II	П-II-min	0,35	0,47	0,74	46	42	1,095
	П-II-mid	0,3	0,38	0,8	40	37	1,08
	П-II-max	0,2	0,25	0,8	32	30	1,1

**Заключение.** Усовершенствована методика расчета прочности нормального сечения, жесткости и трещиностойкости многопустотных железобетонных плит перекрытия, усиливаемых под нагрузкой дополнительной предварительно напряженной арматурой.

Разработанная методика расчета учитывает напряженно-деформированное состояние конструкции в момент усиления, различные схемы работы конструкции до и после усиления и предварительное напряжение дополнительной арматуры.

Впервые произведены экспериментальные и теоретические исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных под нагрузкой установкой дополнительной предварительно напряженной высокопрочной арматуры.

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования подтвердили эффективность метода усиления сборных многопустотных железобетонных плит перекрытия путем установки дополнительной предварительно-напряженной арматуры.

Экспериментально установлено, что величина предварительного напряжения дополнительной арматуры не оказывает существенного влияния на прочность, но с ее увеличением повышается жесткость и трещиностойкость усиливаемой конструкции.

На основании результатов экспериментальных исследований выявлена эффективность использования высокопрочной арматуры в качестве дополнительной при усилении. Экономия от применения высокопрочной арматуры составляет 15,4 % материала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лазовский Д.Н. Теория расчета и конструирование усиления железобетонных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений: Автореф. дис.... д-ра техн. наук. - Мн., 1998. - 40 с.
2. Лазовский Д.Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений. - Новополоцк: ПГУ, 1998. - 280 с.: ил.
3. Немировский Я.М. Жесткость изгибаемых железобетонных элементов при кратковременном и длительном нагружении // Бетон и железобетон. - 1955. - № 5. - С. 172 - 176.
4. Пособие П1-98 по усилению железобетонных конструкций (к СНиП 2.03.01-84\*). - Мн., 1998.