

Введение. Применение в изгибаемых элементах перевода (отгиба) части продольной предварительно напрягаемой арматуры из нижней зоны в пролете в верхнюю на опорах способствует значительному повышению трещиностойкости наклонных сечений и в ряде случаев позволяет отказаться в конструкциях от использования поперечного армирования или значительно его сократить. При отгибе арматуры не создаются благоприятные условия для экономии бетона и сокращения веса конструкции за счет придания им целесообразных форм, возникает возможность применения конструкций с ломаным нижним поясом и без утолщения ширины сечения у опор. Анализ технико-экономических показателей экспериментальных стропильных балок с отогнутой напрягаемой арматурой [1] показал, что применение отгиба части рабочей продольной арматуры позволяет снизить на 10% расход бетона за счет уменьшения толщины стенки у опорной части; за счет уменьшения количества поперечной арматуры в стенке и продольной арматуры в верхнем поясе достигается экономия стали на 5–21%. В совокупности себестоимость конструкций может быть снижена до 6% [3, 5]. Несмотря на рациональность и целесообразность применения железобетонных изгибаемых элементов с полого отогнутой предварительно напряженной стержневой арматурой, сопротивление таких элементов действию изгибающего момента с поперечной силой изучено недостаточно [2, 3].

В работах [2, 4] приведены и описаны с использованием конечно-элементного моделирования численные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) балок с прямолинейной (БП) и отогнутой (БО) арматурой. Для анализа напряженно-деформированного состояния принято сопоставление главных деформаций бетона балок с прямолинейной (БП) и отогнутой арматурой (БО) на двух стадиях загрузки: после окончания обжатия $2F=0$ и при нагрузке $2F=140$ кН, при которой происходит образование первых нормальных трещин в балках БП и БО. Исследования проводились с использованием вычислительного пакета «MSC.visualNastran for Windows» и специально составленная на языке «DELPHI» программы «BALKА».

При использовании вычислительного комплекса «MSC. visual Nastran for Windows» в численной модели балок задание предварительного напряжения обеспечивалось путём создания разности температур материалов – арматуры и бетона. Как показали результаты расчетов [2, 3, 4], данная методика моделирования не позволила объективно и точно оценить параметры НДС и получить в соответствии с правилами сопромата картину изменения деформаций в бетоне, точки которого находились на траектории трассировки отогнутой напрягаемой арматуры. Одной из причин данного обстоятельства является нечеткость моделирования сути преднапряжения путем задания разности температур бетона и арматуры и невозможность учесть использованным вычислительным комплексом такой важной особенности железобетона, как сцепление арматуры с бетоном. В этой связи и с целью выяснения влияния отмеченных параметров на напряженно-деформированное состояние рассчитываемых балок был разработан вариант моделирования, и составлена программа расчета балок на ПЭВМ на языке DELPHI, позволяющая компенсировать неучтенные особенности расчетной схемы, принятой применительно к вычислительному комплексу «MSC.visual Nastran for Windows» [4].

В составленной программе расчета расчетная схема балки представлена в виде совокупности различных конечных элементов – треугольных для бетона и линейных для арматуры. Арматура связана с бетоном при помощи специальных связующих элементов, допускающих взаимные сдвиги арматуры относительно бетона, имитирующих сцепление арматуры с бетоном. Усилия от предварительного натяжения арматуры прикладывались как внешняя сжимающая сила к крайнему КЭ у торца арматуры [3].

Результаты численных исследований различными подходами показали, что при обжатии бетона в нижней и средней частях сечения по всей длине балок БП с предварительно напряженной прямолинейной арматурой векторы главных деформаций сжатия имеют одинаковую величину и направлены горизонтально. С приложением внешней нагрузки изменение напряженно-деформированного состояния соответствует общим представлениям о работе балки: в средней части сечения при опорной зоне балки величины главных деформаций сжатия увеличиваются незначительно, однако направления их принимают вполне определенную ориентацию – «опора – пролётный груз», а угол наклона к продольной оси составляет $15,5^{\circ}$ – 16° . Значения главных деформаций растяжения в этих же точках увеличиваются с ростом нагрузки и, достигая предельных значений, создают условия для образования наклонных трещин, начинающихся в средней трети высоты сечения, так как величины главных деформаций растяжения в средней трети высоты сечения преобладают над одноименными деформациями нижней зоны.

В балках БО наличие преднапряженной отогнутой арматуры изменяет характер напряженно-деформированного состояния при предварительном обжатии, и это отражается на работе балки при действии внешней нагрузки. В нижней опорной зоне балки, после окончания обжатия, векторы главных деформаций сжатия направлены почти горизонтально, в то же время в средней трети высоты сечения векторы сжатия имеют направление к точке приложения усилия в отогнутой арматуре и угол их наклона к продольной оси балки составляет -8° ÷ -9° . С приложением внешней нагрузки в опорной зоне в середине высоты сечения величины главных деформаций сжатия и растяжения практически не изменяют своих значений. Данное обстоятельство значительно уменьшает возможность образования наклонных трещин, начинающихся в средней трети высоты сечения. С приложением внешней нагрузки происходит поворот главных площадок против часовой стрелки. Угол наклона к продольной оси деформаций сжатия при действии нагрузки в зоне возможного появления магистральной наклонной трещины составляет $8,5^{\circ}$ по данным вычислительного комплекса «MSC.visualNastran for Windows» и $10,1^{\circ}$ – $12,1^{\circ}$ – при использовании разработанной программы «BALKА». Исключения составляют величины и угол наклона главных деформаций бетона, находящегося на траектории отогнутой арматуры, где параметры НДС значительно отличаются по величине от одноименных параметров вне траектории арматуры. Тем не менее, поворот главных площадок в средней трети высоты сечения опорной зоны в балках с отогнутой арматурой практически соответствует углу поворота площадок с прямолинейной арматурой. Однако направление вектора главных деформаций сжатия в балках БО более пологое к продольной оси элемента, чем в балках БП [3, 4, 5].

Шалобьта Николай Николаевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Малиновский Василий Николаевич, кандидат технических наук, профессор кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Кривицкий Павел Васильевич, магистрант кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

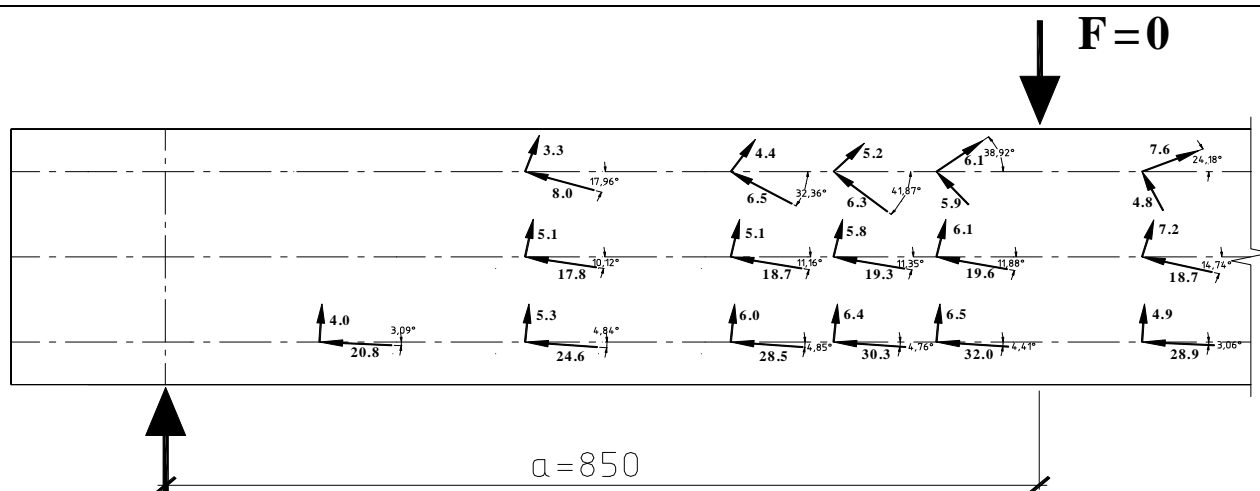


Рис. 1. Направление и величины главных деформаций ($\epsilon_b \cdot 10^{-5}$) в опытном образце на стадии предварительного обжатия бетона

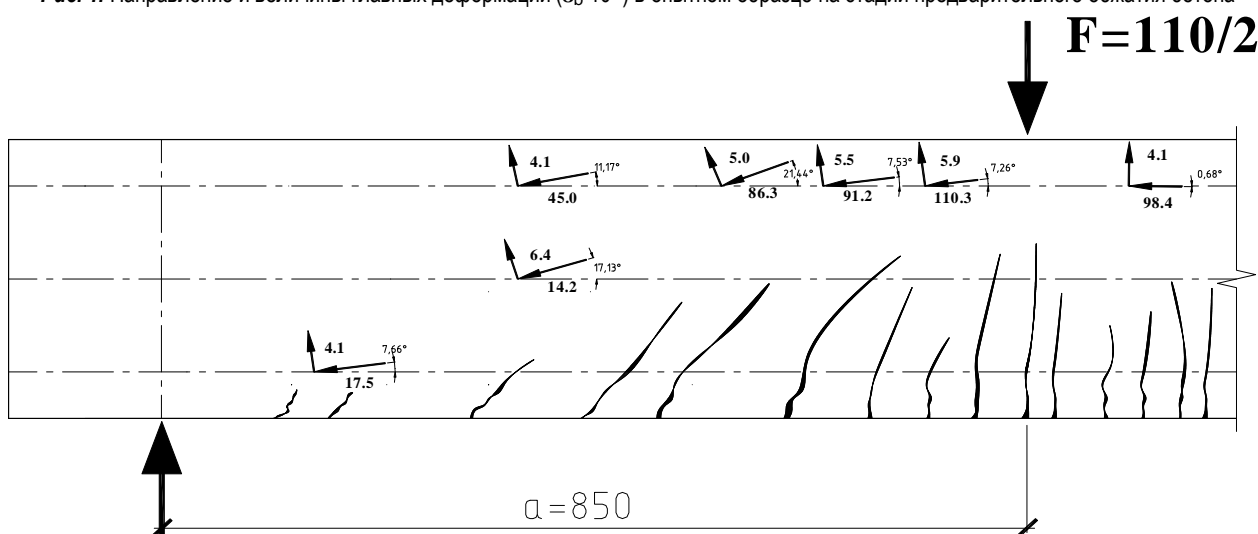


Рис. 2. Направление и величины главных деформаций ($\epsilon_b \cdot 10^{-5}$) в опытном образце в момент разрушения при $F=(110/2)$ кН

Численными методами также установлено, что изменение в балках БО степени обжатия бетона отогнутой арматурой и пролета среза при нагружении влияет только на величину нагрузок (моментов) появления нормальных и наклонных трещин. Так, в балках с небольшой степенью предварительного напряжения отогнутой арматуры имеются возможности для достижения главными деформациями растяжения как на нижней, так и в средней части высоты сечения своих предельных значений, что вызовет образование нормальных и наклонных трещин практически одновременно.

Анализ экспериментальных исследований НДС балок с пологим отгибом части продольной напрягаемой арматуры. Проведение экспериментальных исследований было вызвано необходимостью уточнения данных по напряженно-деформированному состоянию железобетонных балок, полученных численными методами на ЭВМ – с помощью вычислительного комплекса «MSC. visual Nastran for Windows», не учитывающей податливость сцепления арматуры с бетоном, а по разработанной программе «BALKA» невозможность проследить изменение направлений и величин деформаций после появления нормальных и наклонных трещин в балке.

Экспериментальные исследования особенностей изменения напряженно-деформированного состояния, а также прочности и трещиностойкости изгибаемых конструкций с отогнутой арматурой, выполнялись на двух балках, по виду подобных балкам, применяемых в моделях численных исследований: образцы балочного типа длиной 3,0 м, прямоугольного сечения высотой 300 мм и шириной 120 мм. Армирование экспериментальных балок состояло из двух преднапряженных стержней диаметром 14 мм класса S800, располагающихся в два ряда с рабочей высотой в середине пролета балки 250 мм. Стер-

жень верхнего ряда в третях пролета переводился из нижней зоны к верхней грани на опоре под углом 12° . Конструктивное решение опытных балок характеризовалось отсутствием ортогонального поперечного армирования по всей их длине. Загружались балки двумя сосредоточенными силами с пролетом среза 850 мм и 550 мм. Полное описание экспериментальных балок и методики их исследования приведено авторами в другой статье данного сборника.

На рисунке 1 приведены величины и направления главных деформаций балки при предварительном обжатии бетона и на этапах загрузки внешней нагрузкой при пролете среза 850 мм. После окончания обжатия у нижней грани балки в приопорной зоне векторы главных деформаций сжатия направлены под углом от $-3,09^\circ$ до $-4,85^\circ$, а в средней трети высоты сечения опорной зоны векторы сжатия имели направление к точке приложения усилия в отогнутой арматуре, и угол их наклона к продольной оси балки составлял от -10° до -12° . На верхней грани балки на большей части приопорной зоны (зоны расположения отгиба) главные деформации сжатия преобладали над деформациями растяжения, а в средней зоне пролета, где направление арматуры прямолинейное и на незначительном удалении к опоре от сечения с отгибом, деформации растяжения преобладали над деформациями сжатия.

При начальном нагружении с приложением внешней нагрузки общая картина напряженно-деформированного состояния изменялась: в нижней части сечения горизонтальные главные деформации сжатия, вызванные усилиями предварительного обжатия, уменьшались по величине и переходили в деформации растяжения, а в верхней – главные деформации растяжения сменялись деформациями сжатия, значения которых возрастали.

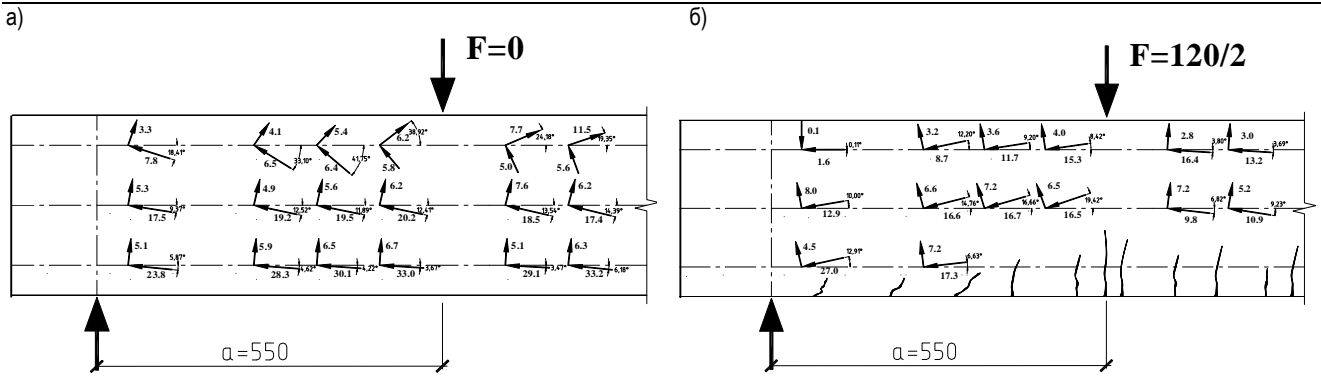


Рис. 3. Направление и величины главных деформаций ($\epsilon_b \cdot 10^{-5}$) в опытном образце: а) на стадии предварительного обжатия бетона; б) при загрузении $F=60$ кН

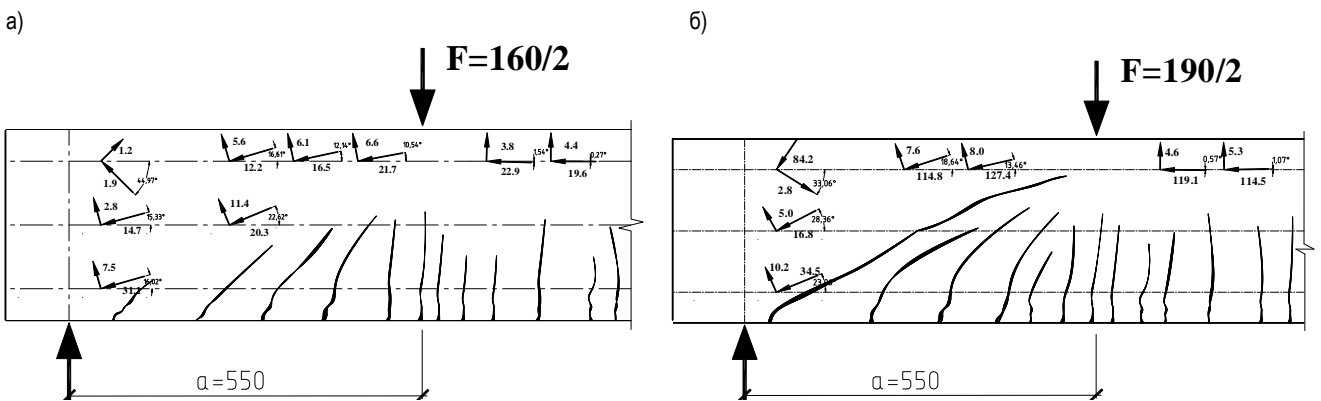


Рис. 4. Направление и величины главных деформаций ($\epsilon_b \cdot 10^{-5}$) в опытном образце: а) при загрузении $F=80$ кН; б) в момент разрушения

При дальнейшем загрузении до момента образования трещин в средней трети высоты сечения зоны максимальных изгибающих моментов величины главных деформаций сжатия незначительно уменьшались, в такой же степени изменялись и перпендикулярные им деформации растяжения, не изменяя своего направления. В приопорной зоне в середине высоты сечения при нагужении главные деформации сжатия и растяжения практически не изменились.

При нагрузке $F=30$ кН образовались первые нормальные трещины в зоне чистого изгиба, затем – нормальные трещины на небольшом участке приопорной зоны, слегка искривляясь в сторону сосредоточенного груза с дальнейшим увеличением нагрузки. На последующих этапах загрузения при $F=40-50$ кН в балке сформировались слабовыраженные наклонные трещины, являясь, в большей степени, продолжением нормальных трещин. Наклонные трещины, дойдя до отогнутой арматуры, в своем развитии тормозились.

На ступенях загрузения, предшествовавших исчерпанию несущей способности (рис. 2), в нижней части сечения в приопорной зоне произошел поворот главных площадок против часовой стрелки с изменением угла наклона главных деформаций от значения $-4^{\circ} \div -5^{\circ}$ до $+8^{\circ} \div +9^{\circ}$, а в середине высоты сечения угол поворота составил $24^{\circ} \div 26^{\circ}$, изменяясь от значения $-10^{\circ} \div -11^{\circ}$ до $14^{\circ} \div 15^{\circ}$. Разрушение балки произошло по нормальному сечению вследствие интенсивного развития неупругих деформаций арматуры, при суммарной нагрузке $2F=110$ кН.

На рис. 3, 4 приведены величины и направления главных деформаций на всех этапах загрузения для второй экспериментальной балки, у которой пролет среза составлял 550 мм. На стадии предварительного обжатия бетона этой балки параметры напряженно-деформированного состояния практически не отличались от аналогичных параметров ранее рассмотренной балки (рис. 3). На стадии загрузения балки в средней трети высоты сечения в зоне максимальных изгибающих моментов величины главных деформаций сжатия уменьшались как и перпендикулярные им деформации растяжения, не изменяя своего направления. В приопорной же зоне в середине высоты сечения с приложением нагрузки главные деформации сжатия и растяжения изменились незначительно.

При нагрузке $F=60$ кН образовались первые нормальные трещины в зоне чистого изгиба (рис. 3б), а с дальнейшим увеличением нагрузки возникли подобные трещины на небольшом участке приопорной зоны, слегка искривляясь с повышением нагрузки в сторону сосредоточенного груза. На последующих этапах загрузения при $F=80-90$ кН в балке возникли слабовыраженные наклонные трещины (рис. 4), являясь продолжением нормальных трещин, которые, дойдя до отогнутой арматуры, в своем развитии тормозились.

В момент разрушения балки ($F=110/2$ кН) сформировалась явно выраженная наклонная трещина (рис. 4б) с общим направлением от опоры к пролетному грузу и шириной раскрытия в месте пересечения с отогнутой арматурой значительно меньшей, чем в зонах над и под трассой напрягаемой отогнутой арматуры. Необходимо заметить, что угол наклона трещин непосредственно у опоры был близок к углу 45° и на высоте примерно 1/4 высоты балки принимал более пологую траекторию ($\alpha = 21^{\circ} \div 23^{\circ}$).

Заключение

1. На основании сравнения расчетных данных, полученных по результатам расчета по вычислительному комплексу «MSC. visualNastran for Windows» и по разработанной программе, выявлены сходство и отличия в напряженно-деформированном состоянии балок с полого отогнутой преднапряженной арматурой. Общая картина по направлению и величинам главных деформаций в балке с отогнутой арматурой, полученных по результатам расчета по разработанной программе и по вычислительному комплексу «MSC. visualNastran for Windows» как на стадии предварительного обжатия бетона, так и при загрузении внешней нагрузкой при совместном действии сил обжатия бетона, соответствуют общим принципам работы балки, но и имеются отличия, связанные, прежде всего, с особенностями принятой расчетной модели.

2. Лучшая сходимость параметров напряженно-деформированного состояния, полученных численными методами, с экспериментальными данными наблюдается при исследовании специально разработанной программой «BALKА». Полученные данные численных расчетов и экспериментальных исследований позволили опре-

делить важные и необходимые при составлении расчетной схемы параметры – траекторию и место расположения магистральной наклонной трещины [3, 4, 5].

3. Из результатов экспериментальных и ранее проведенных исследований следует, что изменение пролета среза при нагружении балки с отогнутой преднапряженной арматурой влияет только на величину нагрузок (моментов) появления первых нормальных трещин и не оказывает существенного влияния на общую картину напряженно-деформированного состояния. Также, согласно численным исследованиям, установлено, что изменение степени обжатия бетона отогнутой арматурой не влияет на характер распределения главных деформаций сжатия и растяжения, а сказывается лишь на их величинах.

4. Согласно полученным экспериментальным данным, угол наклона главных площадок в зоне возможного появления наклонной трещины для балок принятой конструкции находится в пределах $21^\circ \div 23^\circ$, а магистральная наклонная трещина имеет более пологое направление к продольной оси балки в сравнении с балками с прямолинейной арматурой. Данное обстоятельство характеризует отличительные особенности деформирования балок с полого отогнутой предварительно напряженной арматурой в сравнении с балками, имеющими прямолинейное направление арматуры.

5. Наличие полого отгиба стержневой арматуры в пределах пролета среза (в опытах максимальное значение $a/h = 2,83$) исключает возможность разрушения элемента одновременно с образованием магистральной наклонной трещины. В опытах отгиб части продольной рабочей арматуры из нижней зоны в пролете в верхнюю на опорах предотвратил разрушение по наклонному сечению, несмотря на отсутствие поперечной арматуры. Достаточная несущая способность по поперечной силе таких балок достигается за счет эффективной работы отогнутых стержней.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Малиновский, В.Н. Сопротивление предварительно напряженных железобетонных балок из высокопрочного бетона с отогну-

той стержневой арматурой при изгибе с поперечной силой: автореф. дис. на соиск. учёной степени канд. техн. наук. – Л., 1988.

2. Малиновский, В.Н. Влияние предварительно напряженной полого отогнутой арматуры на напряженно-деформированное состояние железобетонных балок / В.Н. Малиновский, Н.Н. Шалобыта, Б.Г. Холодарь // Вестник БрГТУ. – 2008. – № 1(49): Строительство и архитектура. – С. 74–77.

3. Малиновский, В.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния и разработка методики расчета в соответствии с СНБ 5.03.01-02 железобетонных балок с пологим отгибом части продольной предварительно-напряженной арматуры / В.Н. Малиновский, Н.Н. Шалобыта, Б.Г. Холодарь // Сборник научных трудов II международного научно-практического семинара по реализации задач ГПОФИ «Строительство и архитектура», Минск, 19-21 сентября 2007 г. – В 3 т. – 2008. – Т. 1.

4. Малиновский, В.Н. Численное исследование напряженно-деформированного состояния в железобетонных балках с предварительно напряженной полого отогнутой арматурой / В.Н. Малиновский, Н.Н. Шалобыта, П.В. Кривицкий // Вестник БрГТУ. – 2009. – № 1(55): Строительство и архитектура. – С. 64–68.

5. Малиновский, В.Н. Напряженно-деформированное состояние железобетонных балок с пологим отгибом части продольной предварительно напряженной арматуры / В.Н. Малиновский, Н.Н. Шалобыта, Б.Г. Холодарь // Сб. науч. трудов XVI международного научно-методич. семинара «Перспективы развития новых технологий в строит-ве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь», Брест, 28–30 мая 2009 г. – В 2 т. – 2009. – Т. 1. – С. 58–65.

6. Кривицкий, П.В. Влияние обжатия бетона предварительно напряженной полого отогнутой арматурой на напряженно-деформированное состояние железобетонных балок / П.В. Кривицкий, В.Н. Малиновский, Н.Н. Шалобыта // Сборник конкурсных работ студентов и магистров. БрГТУ, Брест. – 2009. – Ч. 1. – С. 36–39.

20.01.10

SHALOBYTA N.N., MALINOVSKY V.N., KRIVITSKY P.V. Experimental researches of the is intense-deformed condition of ferro-concrete beams with flat отгибом parts longitudinal preliminary the intense armature

In clause results of experimental researches by definition of the is intense-deformed condition in concrete preliminary strained ferro-concrete with prestrained hollow the unbent armature are resulted.

624.014.2

. .

. .

. .

-

Введение. В ранее опубликованных авторами статьях [1, 2, 3, 4, 5] приводились методика моделирования и результаты исследований численными методами напряженно-деформированного состояния железобетонных балок с пологим отгибом части продольной рабочей арматуры в зонах возможного разрушения по наклонным сечениям. На основании сравнения расчетных данных, полученных по результатам расчета по вычислительному комплексу «MSC. visualNastran for Windows» и по разработанной программе, выявлены сходство и отличия в напряженно-деформированном состоянии балок с полого отогнутой преднапряженной арматурой. Общая картина по направлению и величинам главных деформаций в балке с отогнутой арматурой, полученная по результатам расчета по разработанной программе и по вычислительному комплексу «MSC. visualNastran for Windows*», как на стадии предварительного обжатия бетона, так и при загрузке внешней нагрузкой при совместном действии сил обжатия бетона, соответствуют общим принципам работы балки, но и имеются отличия, связанные, прежде всего, с особенностями принятой расчетной модели балок. Проведение экспериментальных исследований было вызвано необходимостью

уточнения данных по напряженно-деформированному состоянию железобетонных балок, полученных численными методами на ЭВМ – с помощью вычислительного комплекса «MSC. visual Nastran for Windows», не учитывающей податливость сцепления арматуры с бетоном, и по разработанной программе «BALKA», не позволяющей проследить изменение направлений и величин деформаций после появления нормальных и наклонных трещин в балке.

Конструкция опытных образцов и материалы. Экспериментальные исследования особенностей изменения напряженно-деформированного состояния бетона, а также прочности и трещиностойкости изгибаемых конструкций с отогнутой арматурой, выполнялись на образцах балочного типа длиной 3,0 м, прямоугольного поперечного сечения следующих размеров: высота 300 мм, ширина 120 мм (рис. 1). Образцы армировались преднапряженной арматурой, состоящей из двух стержней периодического профиля диаметром 14 мм, класса S800 (1), которые располагались в два ряда с рабочей высотой в средней части пролета балки, равной 250 мм. Стержень нижнего ряда располагался прямолинейно по всей длине балки, а верхний стержень – в третях пролета переводился из нижней зоны в пролете к верхней грани на опоре с выходом через торцевую грань. Угол наклона отгиба составлял 12° . В верхней зоне

* Использовалась демонстрационная версия программного комплекса.