

**Малиновский Василий Николаевич**, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры, УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест (Беларусь)

**Кривицкий Павел Васильевич**, аспирант, УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест (Беларусь)

**Vasiliy Malinovskiy**, PhD in Engineering Science, Professor, Brest State Technical University, Brest (Belarus)

**Pavel Krivitskiy**, postgraduate student, Brest State Technical University, Brest (Belarus)

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗГИБУ С ПОПЕРЕЧНОЙ СИЛОЙ ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С КАНАТНОЙ ОТОГНУТОЙ АРМАТУРОЙ**

## **EXPERIMENTAL RESEARCHES OF INFLUENCE ON RESISTANCE TO A FLEXURE WITH SHEAR FORCE OF PRESTRESSED CONCRETE BEAMS WITH BENT-UP SEVEN-WIRE STRANDS OF CONSTRUCTIONAL FACTORS**

### **АННОТАЦИЯ**

*В статье представлены результаты экспериментальных исследований влияния основных конструкционных факторов на сопротивление внешним воздействиям предварительно напряженных железобетонных балок с прямолинейной и отогнутой продольной канатной арматурой. Главной особенностью напряженно-деформированного состояния железобетонных балок с отогнутой преднапряженной арматурой является создание при обжатии бетона состояния, при котором векторы деформаций сжатия направлены к точке приложения усилий. Данный факт*

оказывает влияние на ориентацию и величины главных деформаций при загрузке внешней нагрузкой. По этой причине на стадии, предшествующей образованию наклонных трещин, в середине высоты сечений в балках с отогнутой арматурой главные растягивающие деформации бетона значительно меньше предельных. В балках с прямолинейной арматурой величины главных деформаций растяжения приближаются быстрее к предельным в средней части высоты сечения, что предопределяет в дальнейшем образование наклонных трещин в данной части сечения. Изменение степени обжатия бетона влияет на расположение и угол наклона магистральных наклонных трещин, изменение угла наклона отогнутого каната – на нагрузку образования в зоне среза нормальных и наклонных трещин с растянутой зоны сечения конструкции. При использовании канатов меньшего диаметра увеличивается длина зоны передачи преднапряжения и, как следствие, уменьшается уровень обжатия бетона в сечениях, что в последующем сказывается на величине нагрузки образования трещин и разрушения балок, а изменение прочности бетона влияет на последовательность образования и морфологию развития наклонных трещин и величину разрушающей нагрузки.

## **ABSTRACT**

*The results of experimental researches of influence of major constructional factors on resistance of prestressed reinforced concrete beams with rectilinear and bent-up longitudinal seven-wire strands by external action are presented in article. The main feature of the mode of deformation of prestressed reinforced concrete beams with bent-up reinforcement is to create condition at a pressing concrete stage, at which compression deformations vectors are inclined to a point of the application of prestress force. The given fact influences on orientation and sizes of main deformations from external loading. By this reason at a previous inclined cracks stage the main tensile strains of concrete in the middle of height of sections in beams with the bent-up reinforcement are less than limiting. Main tensile strains sizes approach limiting faster in average part of section height in beams with rectilinear reinforcement that predetermines further formations of the inclined cracks beginning*

*in this part of section. Changing of prestress force degree influences on location and angle of critical cracks, changing of bent-up seven-wire strands angle influences on normal and bending shear cracking load at nearsupport zone. The length of a zone of transfer prestressing increases by using seven-wire strands of smaller diameter and, as consequence, prestress force concrete decreases, that in the subsequent affects size of cracking loading and beams destruction, as well as concrete strength changing influences on propagation of inclined cracking and failure load.*

**Ключевые слова:** сжатие, растяжение, нагрузка, трещина, канат, деформации.

**Keywords:** compression, tension, load, crack, seven-wire strand, strains.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Основным направлением на современном этапе развития мировой технической политики в области строительства являются снижение энергоемкости, стоимости и трудоемкости при высокой надежности и долговечности зданий, повышение технологичности как отдельных элементов, так и зданий в целом. Внедрение железобетонных балочных конструкций с отгибом части продольной предварительно напрягаемой арматуры из нижней зоны в пролете в верхнюю на опорах позволяет значительно уменьшить расход металла и повысить эксплуатационную эффективность. Недостаточная изученность сопротивления таких элементов изгибу с поперечной силой и отсутствие уточненной методики расчета прочности наклонных сечений, учитывающей особенности армирования, является основным препятствием для широкого внедрения в практику строительства подобного рода конструкций. Анализ влияния основных факторов на сопротивление внешним воздействиям и экспериментальные исследования отличительных особенностей напряженно-деформированного состояния железобетонных балок с полого отогнутой

предварительно напрягаемой наиболее эффективной канатной арматурой рассматривается в данной работе.

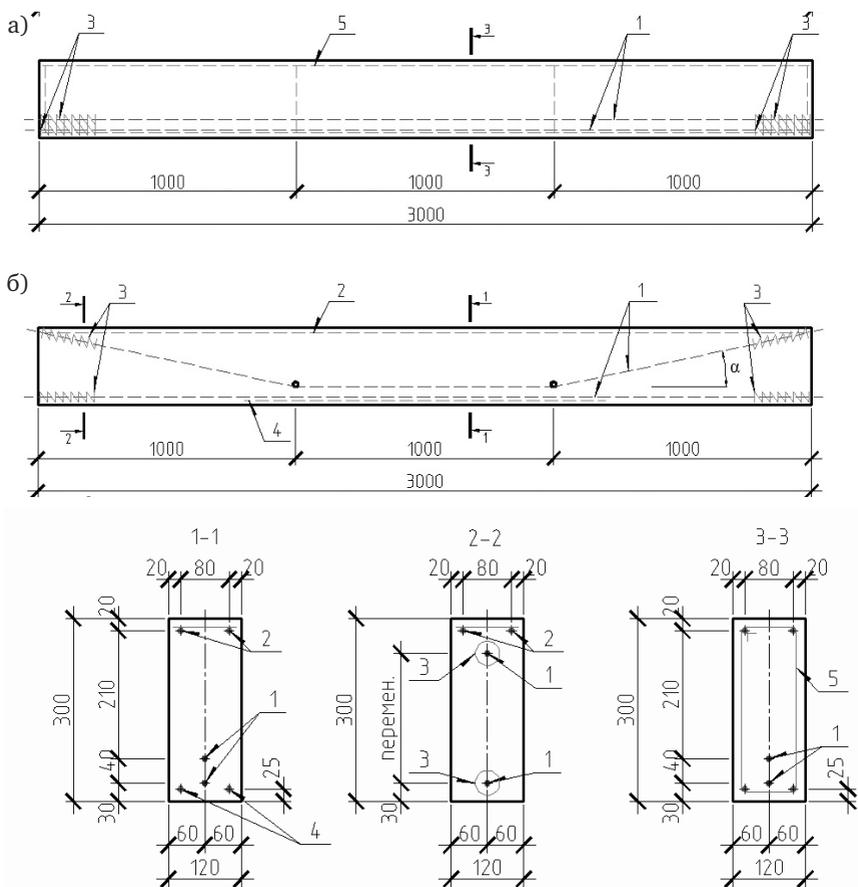
## ХАРАКТЕРИСТИКА ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ

Для решения поставленных задач в качестве опытных образцов применялись предварительно напряженные балки с отогнутой и прямолинейной напрягаемой канатной арматурой прямоугольного поперечного сечения с размерами  $b \times h = 120 \times 300$  мм длиной 3,0 м. Изготавливались балки из бетона со средней кубиковой прочностью, варьирующейся в пределах 26÷58 МПа, и армировались основной канатной арматурой диаметром 9 мм или 12,5 мм, соответствующей классу Y1860S7 [2]. Конструктивное решение опытных балок отражено на рисунке 1 и в таблице 1.

Таблица 1

### Основные конструктивные характеристики отдельных опытных балок

| Серия  | Марка балок | Диаметр напрягаемого каната, мм | Угол отгиба напрягаемого каната, град | Величина преднапряжения нижних канатов, МПа | Величина преднапряжения верхних канатов, МПа |
|--------|-------------|---------------------------------|---------------------------------------|---|--|
| БО-I   | БО-I-1      | 12,5                            | 9,0                                   | 946   | 928  |
|        | БО-I-2      | 12,5                            | 9,0                                   | 941   | 920  |
| БО-II  | БО-II-1     | 12,5                            | 9,0                                   | 940   | 924  |
| БО-III | БО-III-1    | 12,5                            | 12,0                                  | 1240  | 1205   |
|        | БО-III-2    | 12,5                            | 12,0                                  | 1231  | 1196   |
| БО-IV  | БО-IV-1     | 12,5                            | 12,0                                  | 937   | 912  |
|        | БО-IV-2     | 12,5                            | 9,0                                   | 945   | 920  |
| БО-V   | БО-V-1      | 9,0                             | 12,0                                  | 1285  | 1263   |
|        | БО-V-2      | 9,0                             | 9,0                                   | 1276  | 1256   |
| БО-VI  | БО-VI-1     | 12,5                            | 18,0                                  | 954   | 940  |
| БП     | БП-1        | 12,5                            | –                                     | 972   | 980  |



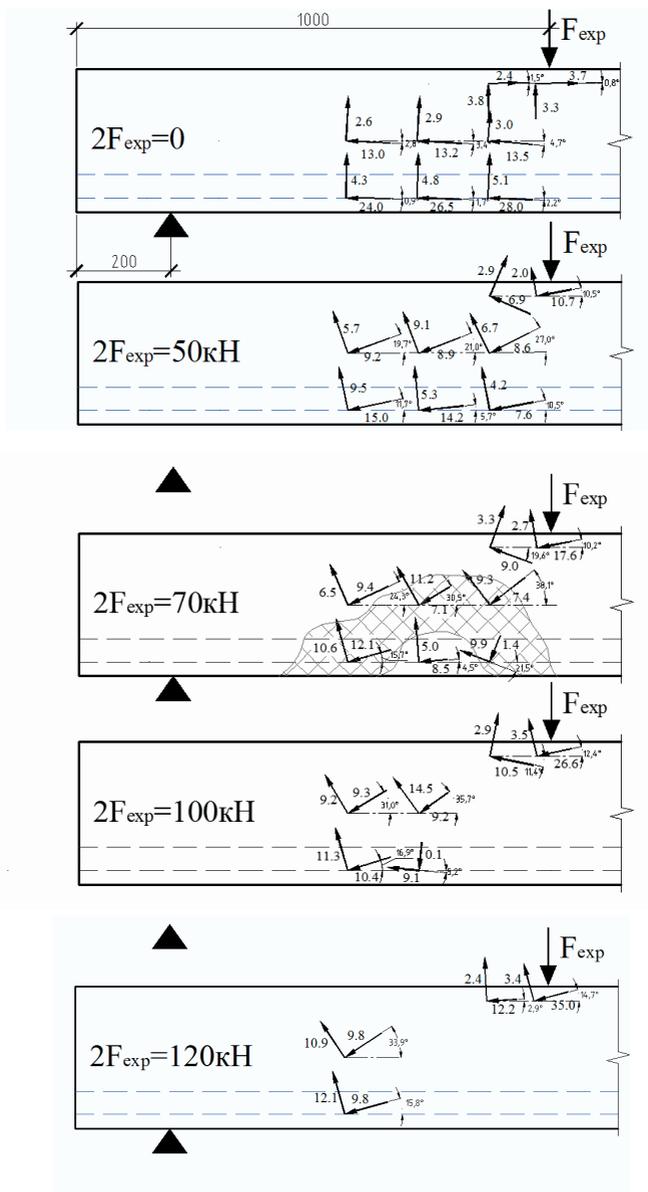
**Рисунок 1.** Армирование опытных образцов

В балках группы БО (табл. 1) преднапрягаемые верхние канаты в третях пролета отгибались из нижней зоны в пролете в верхнюю на опорах (угол наклона отгиба составил  $9^\circ$ ,  $12^\circ$  и  $18^\circ$ ) и характеризовались отсутствием поперечного армирования. В образцах группы БП предусматривалось поперечное армирование количеством больше и меньше минимального  $\rho_{sw, min}$ . Данная группа применялась для выявления отличий в напряженно-деформированном состоянии балок с отогнутой и прямолинейной канатной арматурой.

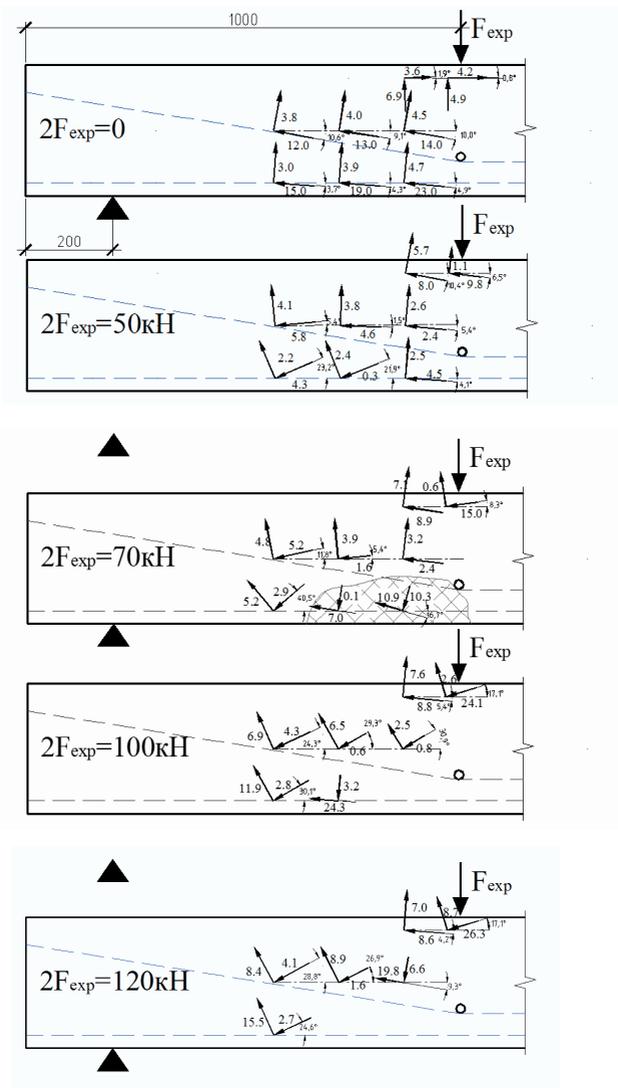
### **НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОПЫТНЫХ БАЛОК В ЗОНЕ СРЕЗА**

На рисунках 2 и 3 приведены величины и направления главных деформаций для балок серий БО-I-1 и БП-1 на пяти этапах загрузки: после окончания обжатия, при промежуточных загрузках до начала появления трещин, при нагрузке, соответствующей появлению первых нормальных трещин в зоне чистого изгиба, соответствующей появлению нормальных трещин в приопорной зоне и соответствующей работе балок с нормальными и наклонными трещинами. Отличия в картинах образования и распределения трещин в балках с прямолинейной и отогнутой канатной арматурой обусловлено особенностями напряженно-деформированного состояния бетона приопорных участков балок с разной траекторией расположения продольной преднапряженной арматуры.

В балке серии БП-1 с предварительно напряженной прямолинейной канатной арматурой (рисунок 2) при обжатии бетона в нижней и средней частях сечения векторы главных деформаций сжатия по всей длине балок направлены почти горизонтально, и их величины изменяются практически линейно по высоте сечения, а в верхней зоне наблюдается незначительное растяжение.



**Рисунок 2.** Направление и величина главных деформаций ( $\epsilon_{1,2} \times 10^{-5}$ ) в балке БП-1 от действия внешнего нагружения и усилия предварительного обжатия



**Рисунок 3.** Направление и величина главных деформаций ( $\epsilon_{1,2} \times 10^{-5}$ ) в балке БО-І-1 от действия внешнего нагружения и усилия предварительного обжатия

С приложением внешней нагрузки ( $2F_{\text{exp}} = 50 \text{ кН}$ ) характер изменения напряженно-деформированного состояния соответствует общим представлениям о работе балочного элемента: в нижней части сечения горизонтальные главные деформации сжатия, вызванные усилиями предварительного обжатия, уменьшаются и переходят в деформации растяжения, в верхней – главные деформации растяжения сменяются деформациями сжатия, значения которых возрастают с увеличением усилия загрузки. В средней же части сечения приопорной зоны балки БП-1 с ростом внешней нагрузки ( $2F_{\text{exp}} = 70 \text{ кН}$ ) величины главных деформаций сжатия изменяются по величине незначительно, однако направления их принимают вполне определенную ориентацию от опоры к пролетному грузу. Угол наклона их к продольной оси в момент образования нормальных трещин на расстоянии  $l_x < d$  от точки приложения пролетной силы составляет  $30,5^\circ$  и на расстоянии  $l_x > d - 38,1^\circ$ . Значения главных деформаций растяжения в этих точках с ростом нагрузки увеличиваются интенсивнее, чем деформации сжатия, и превышают значения одноименных деформаций в нижней части сечения в зоне расположения канатов. На этапе промежуточного нагружения  $2F_{\text{exp}} = 70 \div 85 \text{ кН}$  в середине высоты сечения приопорной зоны на расстоянии  $l_x \approx d$  от точки приложения пролетной силы главные деформации растяжения достигают значений  $(11,2 \div 13,8) \times 10^{-5}$ , то есть приближаются к предельным, что и предопределяет в последующем образования наклонных трещин, начинающихся в средней части высоты сечения балок (заштрихованная зона рисунка 2). В момент появления трещин при экспериментальных исследованиях угол наклона в балках составлял  $34^\circ \div 35^\circ$ .

Несмотря на разное количество поперечного армирования ( $\rho_{\text{sw}} < \rho_{\text{sw, min}}$ ) и ( $\rho_{\text{sw}} > \rho_{\text{sw, min}}$ ), разрушение балок серии БП с предварительно напряженной прямолинейной канатной арматурой происходило по одинаковой схеме – по наклонной трещине, начинающейся в средней части высоты сечения.

Наличие преднапряженных отогнутых канатов в образцах серий БО изменило характер напряженно-деформированного состояния, получаемый в процессе предварительного обжатия бетона, и отразилось на работе этих балок под действием внешней

нагрузки. Если у нижней грани балки БО-I-1 после окончания обжатия векторы главных деформаций сжатия направлены практически горизонтально (рис. 3), то в средней трети высоты сечений векторы сжатия имеют направление к точке приложения усилий в отогнутом канате. Угол наклона к продольной оси главных деформаций в исследуемой зоне балки составляет  $9,1 \div 10,6^\circ$ . С приложением внешней нагрузки ( $2F_{\text{exp}} = 50$  кН) в верхней части сечения приопорной зоны балки увеличиваются главные деформации сжатия  $(-8,0 \div -9,8) \times 10^{-5}$  и увеличиваются главные деформации растяжения  $(5,7 \times 10^{-5})$  за пределами зоны влияния сил загрузки. В зоне действия нагружаемой силы значения главных деформаций растяжения уменьшаются. В середине высоты сечения при этом же уровне загрузки главные деформации сжатия на расстоянии  $l_x \approx d/2$  и ближе к опоре уменьшаются, а деформации растяжения практически не меняют своих значений за пределами зоны влияния вертикальных сил внешнего нагружения и заметно уменьшаются в зоне действия сил загрузки. С дальнейшим ростом нагрузки величины главных деформаций растяжения в этих точках в балке БО-I-1 увеличиваются незначительно и составляют при  $2F_{\text{exp}} = 70$  кН  $(3,9 \div 4,8) \times 10^{-5}$  (рисунок 3), что составляет меньше половины предельных растягивающих деформаций бетона. В свою очередь значения главных деформаций растяжения бетона в балке серии БП-1 при этой же нагрузке достигают  $(6,5 \div 11,2) \times 10^{-5}$  (рисунок 2) и близки к предельным, то есть создаются условия для образования наклонных трещин, начинающихся в средней трети высоты сечения. В нижней же части сечения балки БО-I-1 при нагрузке  $2F_{\text{exp}} = 50$  кН векторы главных сжимающих деформаций за пределами зоны влияния сил загрузки направлены под углом  $21,9 \div 23,2^\circ$ , а при дальнейшем увеличении нагрузки происходит значительный их поворот против часовой стрелки с одновременным ростом главных растягивающих деформаций.

На этапе загрузки после появления с растянутой грани вблизи приложения пролетного груза нормальных трещин ( $2F_{\text{exp}} = 70$  кН) в середине высоты сечения приопорной зоны балки БО-I-1 векторы главных сжимающих деформаций слегка наклонены к опоре. Угол наклона по траектории опоры пролетного груза

составляет около  $5^\circ$ , и с дальнейшим увеличением внешнего нагружения происходит значительный поворот главных площадок против часовой стрелки (рис. 3). В нижней части сечения балки БО-I-1 при нагрузке, соответствующей появлению нормальных трещин под пролетным грузом, векторы главных растягивающих деформаций на участке длиной, равной рабочей высоте сечения  $d$ , от отгиба верхнего каната, направлены под углом  $9,0 \div 16,7^\circ$ , а их значения находятся в пределах  $(7,0 \div 10,9) \times 10^{-5}$ , что близко предельным (заштрихованная зона на рисунке 3). При увеличении нагрузки с растянутой грани приопорной зоны балки появляются ближе к опоре новые нормальные трещины.

На этапе нагружения, предшествующему образованию наклонных трещин ( $2F_{\text{exp}} = 100 \text{ кН}$ ), главные деформации сжатия в середине высоты сечения по направлению от опоры к пролетному грузу направлены под углом  $24,3 \div 29,3^\circ$ , а значения главных растягивающих деформаций составляют  $(6,5 \div 6,9) \times 10^{-5}$ , что также меньше предельных для бетона балки БО-I-1.

После появления наклонных трещин с растянутой грани балки ( $2F_{\text{exp}} = 120 \text{ кН}$ ) при дальнейшем нагружении векторы сжимающих деформаций в середине высоты сечения незначительно изменяли величину и направление, а векторы главных растягивающих деформаций увеличивались по величине в большей степени. Угол наклона главных площадок в месте пересечения с трассой каната составлял  $27 \div 29^\circ$ . Дальнейшее увеличение нагрузки не изменило ориентацию главных площадок, но способствовало выделению бетонных подкосов. При испытании балки БО-I угол наклона магистральной наклонной трещины в момент разрушения в зоне пересечения с трассой каната составлял  $26^\circ$ .

Уменьшение прочности бетона в балке серии БО-II-1 в сравнении с бетоном балки БО-I-1 практически не повлияло на направление главных деформаций сжатия и растяжения в рассматриваемых сечениях на стадии обжатия бетона, но сказалось на их величинах. Снижение преднапряжения бетона в рассматриваемых сечениях балки и уменьшение значения главных сжимающих деформаций в приопорной зоне балки БО-II-1 вызвано, по всей видимости, увеличением длины зоны передачи усилия обжатия бетона. Погашение сжимающих деформаций, возникающих

от обжатия предварительно напряженной канатной арматурой, и достижение предельных деформаций растяжения на нижней грани сечения происходило в балке БО-II-1 при меньших внешних нагрузках, в сравнении с балкой БО-I-1, и при большем угле поворота главных площадок против часовой стрелки в средней части высоты сечения. Данное обстоятельство сказалось на более раннем образовании нормальных, а затем и наклонных трещин в приопорной зоне со стороны растянутой грани. Следует отметить, что угол наклона главных площадок к продольной оси на этапе, предшествующем образованию нормальных трещин ( $2F_{\text{exp}} = 40 \text{ кН}$ ) с растянутой части сечения приопорной зоны на расстоянии  $l_x < d$  от точки приложения пролетной силы составляет  $30^\circ$ , а на расстоянии  $l_x > d$  векторы главных сжимающих деформаций направлены практически горизонтально. На верхней грани балки БО-II-1 после приложения внешней нагрузки главные сжимающие деформации были направлены практически горизонтально и при последующем увеличении нагрузки их величины росли интенсивнее по сравнению с балкой БО-I-1. При последующем нагружении при испытании балки БО-II-1 наблюдалось раздробление бетона сжатой зоны над магистральной диагональной трещиной.

Следует отметить, что на этапе, предшествующем появлению наклонной трещины с растянутой грани балки БО-II-1 ( $2F_{\text{exp}} = 50 \text{ кН}$ ), угол наклона главных площадок в месте пересечения с трассой каната в середине высоты сечения составлял  $22,9^\circ$ . Угол наклона диагональной трещины по результатам испытаний балки БО-II-1 в момент их появления в зоне прохождения трассы каната в середине высоты сечения составлял  $29^\circ$ .

Влияние степени обжатия бетона сжатой арматурой на изменение напряженно-деформированного состояния в нем рассматривалось на балках БО-III-1 и БО-IV-1. На стадии обжатия бетона изменение величины преднапряжения канатов отразилось на величинах главных сжимающих и растягивающих деформаций бетона, но не отразилось на их направлениях. С приложением внешнего нагружения ( $2F_{\text{exp}} = 20 \div 25 \text{ кН}$ ) в балке БО-IV-1, имевшей меньший уровень обжатия бетона по сравнению с балкой БО-III-1, происходит более интенсивный поворот против часовой стрелки

главных площадок в нижней части высоты сечения балки. Угол поворота главных площадок к моменту появления нормальных трещин  $2F_{\text{exp}} = 40$  кН составлял  $11,9 \div 19,8^\circ$ , а в балке БО-III-1 угол поворота главных площадок составлял  $2,8 \div 3,6^\circ$ . В сечении около точки перегиба отогнутого каната в балке БО-III-1 наблюдается незначительный поворот главных площадок по часовой стрелке. В средней же части высоты сечения в балках БО-III-1 и БО-IV-1 наблюдается поворот главных площадок против часовой стрелки на угол  $6,5 \div 13,5^\circ$  и  $1,8 \div 6,4^\circ$  соответственно.

В момент образования первых нормальных трещин в зоне чистого изгиба в балке БО-IV-1 ( $2F_{\text{exp}} = 40$  кН) угол наклона главных сжимающих деформаций в средней частях сечений приопорной зоны составлял  $30,8 \div 53,1^\circ$  вне зоны влияния внешнего нагружения и  $64,3^\circ$  в зоне влияния. При этом же уровне нагружения в балке БО-III-1, имевшей, по сравнению с балкой БО-IV-1, большие непогашенные до этого момента напряжения от обжатия бетона, наблюдались незначительные изменения в направлении и величинах главных деформаций за этап нагружения. Угол наклона главных сжимающих деформаций составлял  $0,2 \div 4,9^\circ$  вне зоны влияния внешнего нагружения.

За несколько этапов до появления наклонных трещин ( $2F_{\text{exp}} = 60 \div 65$  кН) в балке БО-IV-1 в нижней и средней частях высоты сечения поворот главных площадок практически отсутствовал, а изменялись лишь значения главных деформаций. Причем более интенсивно наблюдался прирост главных растягивающих деформаций в сравнении с главными сжимающими. При аналогичном уровне нагружения в образце БО-III-1 вплоть до образования диагональных трещин наблюдается поворот главных площадок против часовой стрелки.

На этапе нагружения ( $2F_{\text{exp}} = 70$  кН), предшествующем появлению диагональных трещин, начинающихся с нижней грани балки БО-III-1, имевшей повышенный уровень обжатия бетона, угол наклона главных сжимающих деформаций в точке пересечения с трассой каната составил  $13,1 \div 17,4^\circ$ , в то время как в балке БО-IV-1, имевшей пониженный уровень преднапряжения, —  $29,5 \div 33,7^\circ$ . При этом главные растягивающие деформации на данных участках в балке БО-III-1 принимали значение в пределах

$(3,8 \div 4,8) \times 10^{-5}$ , а в балке БО-IV-1 –  $(1,4 \div 5,0) \times 10^{-5}$ . Таким образом, независимо от степени обжатия бетона балок полого-отогнутой арматурой не создаются условия к образованию наклонных трещин в средней части высоты сечения опорных зон.

В момент появления магистральной диагональной трещины при испытании опытных балок угол наклона ее в точке пересечения с трассой каната в образце БО-III-1 составлял  $27^\circ$ , а в образце БО-IV-1 –  $39^\circ$ . Следует отметить, что на всех этапах загрузки в верхней зоне балки БО-IV-1 наблюдается более интенсивный рост главных деформаций сжатия, чем в балке БО-III-1.

В балке БО-V-2 уменьшение диаметра канатов при сохранении такой же величины усилия обжатия, как в балке БО-IV-1, отразилось на увеличении зоны передачи преднапряжения и уменьшении уровня обжатия бетона в сечениях приопорной зоны пролета. До момента появления первых нормальных трещин ( $2F_{\text{exp}} = 40 \text{ кН}$ ) в балке БО-V-2 главные деформации сжатия преобладали над растягивающими по всей высоте сечения. После появления нормальных трещин ( $2F_{\text{exp}} = 50 \text{ кН}$ ) в сечениях расположенные вблизи к силе загрузки векторы главных площадок в середине высоты сечения не изменили существенно свое направление, а у нижней грани на расстоянии  $l_x < d$  от точки приложения пролетной силы главные растягивающие деформации были направлены под углом  $35,5^\circ$ , а при  $l_x > d - 47,2^\circ$ . На этапе, предшествующем появлению наклонных трещин у нижней грани балки в зоне влияния сил загрузки и за ее пределами, угол поворота главных растягивающих деформаций составлял  $22,1^\circ$  и  $22,8^\circ$  соответственно. При этом величина главных растягивающих деформаций в данных сечениях находилась в пределах  $(4,9 \div 8,9) \times 10^{-5}$ , что превышает величины главных деформаций в середине высоты сечения  $(0,7 \div 3,2) \times 10^{-5}$ . Данное обстоятельство предопределяет появление трещин с растянутой зоны сечения, что и было получено при испытании балки БО-V-2.

Следует отметить, что в сечении на расстоянии около 150 мм от сечения перегиба напряженного каната на всех этапах загрузки наблюдался поворот главных площадок по часовой стрелке, и вызвано это особенностями напряженно-деформированного состояния на участке балки около отгиба арматуры. По нашему

мнению, данное обстоятельство объясняется наличием в месте отгиба зоны двухосного напряженного состояния, формируемой горизонтальными и вертикальными сжимающими усилиями и результирующей усилий в напрягаемой арматуре, а по граням этой зоны имеют место сдвигающие усилия, влияющие на характер трещинообразования и механизм разрушения.

Следует отметить, что в сечениях балки, расположенных на расстоянии около 400 мм от опоры (середина приопорной зоны) и 150 мм от пролетного груза, по всей высоте балки БО-V-2 после появления нормальных трещин изменения положения и значений главных деформаций практически не наблюдались, что вызвано, по всей видимости, нарушением сцепления канатов с бетоном на данном участке.

### **ВЛИЯНИЕ АНКЕРОВКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ**

В предварительно напряженных конструкциях анкеровка напрягаемой арматуры тесно связана с длиной зоны передачи усилия обжатия бетона [3,5]. Основным фактором, оказывающим влияние на длину анкеровки, является вид армирования. Для стержневой арматуры характерны три вида механизма передачи напряжений: заклинивающий, сдвигающий и сминающий. Для канатной арматуры характерен только заклинивающий механизм передачи напряжений с отличительной особенностью, заключающейся в эффектах «ввинчивания» каната, возникающего на концевых участках после приложения усилия обжатия (эффект Хойера) [1, 3, 5], и «вывинчивания» (эффект замыкания) [3] при действии внешней нагрузки.

Несмотря на разное толкование процессов, происходящих в приопорной зоне преднапряженных конструкций, авторы сходятся в одном, что величина анкеровки канатов и длина зоны передачи преднапряжения влияет на морфологию трещин и, как следствие, – на прочность наклонных сечений.

Выполненные экспериментальные исследования балок с прямолинейной и частью отогнутой преднапряженной канатной арматурой указывают на определенные изменения в характере

трещинообразования по длине трассы канатов, а также в напряженно-деформированном состоянии бетона в зоне анкеровки. Так, в большинстве опытных балок серии БО-I при загрузении по установленным на концевых участках канатов индикаторам и тензодатчикам, наклеенным на бетон по трассе канатов, втягивания и нарушения сцепления по длине приопорного участка не наблюдалось. В образцах с меньшей прочностью бетона (БО-II, таблица 1) на стадии обжатия бетона наблюдалось незначительное втягивание прямолинейных и отогнутых канатов относительно торца балок на величину до 0,5 мм, что незначительно сказалось на характере сцепления бетона и арматуры и фактической длине анкеровки канатов. Следует также отметить, что в образце БО-II-2 за несколько этапов до разрушения на участке между диагональными трещинами на нижней растянутой грани образовалась продольная трещина, а в момент разрушения наблюдались раскол бетона и даже незначительное расплетание прямолинейного каната.

В опытных образцах с более высоким усилием предварительного обжатия бетона (БО-III, таблица 1), по сравнению с остальными сериями БО, на стадии обжатия бетона зафиксировано втягивание прямолинейных канатов относительно торца балок на величину до 0,6 мм. В свою очередь в отдельных образцах серий БО-III÷БО-VI за один, два этапа до разрушения наблюдалось втягивание прямолинейных и за редким случаем отогнутых канатов относительно бетона торца балки. Кроме этого, в опытных образцах БО-III-1, БО-IV-2 за этап до разрушения и балках серии БО-VI в момент разрушения на участках между смежными наклонными трещинами на нижней грани балок были зафиксированные продольные трещины. При последующем загрузении в данных балках происходило откалывание бетона и оголение арматуры. В отличие от остальных балок серий БО, в образцах БО-V втягивание канатов наблюдалось практически с начала загрузения и увеличивалось на каждом последующем этапе загрузения. Объяснением этого обстоятельства, по всей видимости, можно считать уменьшение поверхности сцепления канатов меньшего диаметра в балках БО-V по сравнению с балками БО-IV при одинаковом усилии обжатия. Однако, как показывают результаты

проведенных экспериментальных исследований, с увеличением номинала диаметра в большей степени проявляется эффект расплетания, в связи с чем уменьшается поверхность сцепления канатов с бетоном. Постановка гильзовых зажимов в теле бетона на опорах балки БО-VI-2 и инвентарных зажимов по торцам балки БО-IV-2 повысило анкеровку канатов. Втягивание прямолинейных канатов относительно торцов балок происходило на более высоких уровнях загрузки, втягивание отогнутых канатов не наблюдалось.

Формирование продольной трещины на нижней грани отдельных балок серий БО говорит о необходимости постановки косвенного армирования не только на участке передачи усилия обжатия с арматуры на бетон, но и далее по длине приопорной зоны. При этом косвенное армирование может заменяться с достаточной степенью надежности объемными хомутами.

Наличие косвенного армирования в виде спиралей во всех образцах серий БО предотвратило появление продольных трещин при передаче усилия обжатия, однако в полной мере не обеспечило достаточное сцепление канатов с бетоном на более поздних этапах внешнего нагружения. Постановка анкеров на концах канатов повысило анкеровку и повлияло на характер разрушения и величину разрушающей нагрузки.

Серия образцов БП дополнительно снабжалась ненапрягаемой арматурой в приопорной зоне в виде пространственного вязаного каркаса. Силовая обойма, созданная каркасом, предотвратила расплетание канатов независимо от коэффициента поперечного армирования.

Результатами проведенных экспериментальных исследований установлено, что в балках серий БО в большей степени наблюдалось втягивание прямолинейных канатов, и только в отдельных балках отогнутых. На наш взгляд, это говорит об уменьшении зоны анкеровки отгибаемых канатов по сравнению с зоной анкеровки прямолинейных канатов. Схожие результаты были получены в работе [4] при испытании балок длиной 4 м, армированных канатами диаметром 9 и 15 мм. Автор [4] утверждает, что более явно уменьшение зоны анкеровки отгибаемых канатов наблюдается в балках с канатами диаметром 15 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ выполненных экспериментальных и теоретических исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. В балках с предварительно напряженной прямолинейной канатной арматурой в средней части высоты сечений приопорной зоны с ростом внешней нагрузки величины главных деформаций растяжения увеличиваются интенсивнее, чем деформации сжатия, и превышают значения одноименных деформаций в нижней части сечения в уровне расположения канатов. На более поздних этапах загрузки направление векторов главных деформаций сжатия принимает ориентацию от опоры к пролетному грузу. За несколько этапов до появления наклонных трещин величины главных деформаций растяжения приближаются к предельным, а главные деформации сжатия направлены под углом  $30,5 \div 38,1^\circ$ , что предопределяет образование наклонных трещин, начинающихся в средней части высоты сечения балок. Разрушение балок происходит по наклонной трещине. Изменение количества поперечного армирования не влияет на схему разрушения.
2. В балках с частично отогнутыми предварительно напряженными канатами на стадии обжатия бетона в средней трети высоты сечений приопорной зоны векторы деформаций сжатия направлены к точке приложения усилий в отогнутом канате под углом  $9,1 \div 10,6^\circ$ . В нижней части сечения при нагрузке, соответствующей появлению нормальных трещин под пролетным грузом, на участке длиной, равной рабочей высоте сечения от отгиба, главные сжимающие деформации направлены под углом  $9,0 \div 16,7^\circ$ , а значения растягивающих близки к предельным, в то время как в середине высоты сечения значения главных растягивающих деформаций составляют  $(6,5 \div 6,9) \times 10^{-5}$ , что меньше предельных для бетона экспериментальных балок.
3. Уменьшение прочности бетона в среднем с  $f_{cm, cube} = 55$  МПа до 25 МПа на стадии обжатия бетона не повлияло на направление главных деформаций, но сказалось на их

величинах в результате увеличения длины зоны передачи и, как следствие, уменьшения усилия обжатия бетона. Погашение сжимающих деформаций от обжатия преднапряженной арматурой и достижение предельных деформаций растяжения на нижней грани сечения происходило при меньших внешних нагрузках и при большем угле поворота против часовой стрелки главных площадок в средней части высоты сечения. Данное обстоятельство сказалось на более раннем образовании нормальных, а затем и наклонных трещин в приопорной зоне со стороны растянутой грани.

4. Изменение величины преднапряжения канатов в балках с примерно одинаковой прочностью бетона отразилось не только на величинах и направлениях главных деформаций бетона на стадии обжатия, но и на всех этапах внешнего нагружения балок. Так, на этапе нагружения, предшествующем появлению диагональных трещин, начинающихся с нижней грани, в балке, имевшей повышенный уровень обжатия бетона, угол наклона главных сжимающих деформаций в точке пересечения с трассой каната составил  $13,1 \div 17,4^\circ$ , в то время как в балке с пониженным уровнем преднапряжения –  $29,5 \div 33,7^\circ$ . Главные растягивающие деформации на данных участках балки с повышенным уровнем обжатия бетона принимали значения в пределах  $(3,8 \div 4,8) \times 10^{-5}$ , а с пониженным –  $(1,4 \div 5,0) \times 10^{-5}$ . Таким образом, независимо от степени обжатия бетона балок полого-отогнутой арматурой не создаются условия к образованию наклонных трещин, начинающихся в средней части высоты сечения опорных зон.
5. Использование канатов меньшего диаметра отразилось на увеличении зоны передачи преднапряжения и уменьшении уровня обжатия бетона в сечениях приопорной зоны пролета. На этапе, предшествующем появлению наклонных трещин с нижней грани балки в зоне влияния сил нагружения и за ее пределами, угол поворота главных сжимающих деформаций составлял  $22 \div 23^\circ$ . Максимальная величина главных растягивающих

деформаций  $(4,9 \div 8,9) \times 10^{-5}$  в нормальных сечениях находилась у нижней грани балки и превышала величину главных деформаций растяжения в середине высоты сечения  $(0,7 \div 3,2) \times 10^{-5}$ , что и предопределяет появление трещин с растянутой зоны сечения.

6. Результаты проведенных экспериментальных исследований, а также ранее выполненных работ [4] свидетельствуют об уменьшении длины анкеровки отгибаемых канатов по сравнению с длиной анкеровки прямолинейных канатов в предварительно напряженных балках.
7. Специфика механизма сцепления канатной арматуры с бетоном, а также результаты выполненных экспериментальных исследований указывают на необходимость установки анкерных устройств при использовании канатной арматуры диаметром 12 мм и более. В случае применения канатов меньшего диаметра постановка анкеров носит рекомендательный характер.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Briere, V. Dilation behavior of seven-wire prestressing strand – The Hoyer effect / V. Briere, K. A. Harries, J. Kasan, C. Hager // Construction and Building Materials. – 2013. – No 40. – Pp. 650–658.
2. Арматура напрягаемая канатная для железобетонных конструкций. Технические условия: СТБ EN10138–3–2009. – Введ. 16.09.09. – Минск: М-во архит. и строит. РБ, 2009. – 13 с.
3. Миловидов, В.И. Исследование анкеровки арматурных канатов диаметром 20 К3х7(3) в опорных узлах железобетонных ферм: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / В.И. Миловидов; Челябинский техн. унив-т. – Челябинск, 1975. – 292 с.
4. Сасонко, Л.В. Исследование изгибаемых предварительно напряженных железобетонных конструкций с отогнутой арматурой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Л.В. Сасонко; НИИЖБ. – М, 1974. – 22 с.

5. Соловьёв, Б. В. Исследование работы косвенной арматуры в бетоне на участке анкеровки каната К3х7(3): дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Б. В. Соловьёв; Челябинский техн. унив-т.– Челябинск, 1973.– 258 с.

## REFERENCES

1. Briere V. (2013) Dilation behavior of seven-wire prestressing strand–The Hoyer effect. *Construction and Building Materials*. 2013. No. 40. pp. 650–658.
2. *Арматура напругаемая канатная для железобетонных конструкций. Технические условия: STB EN10138–3–2009* [Seven-wire prestressing strands for reinforced concrete constructions. Specifications: STB EN10138–3–2009].– Introduced 16.09.09. Minsk: M-vo arhit. i stroit. RB, 2009. 13 p. (rus)
3. Milovidov V. I. *Issledovanie ankerovki armaturnyh kanatov diametrom 20 K3x7(3) v opornyh uzлах zhelezobetonnykh ferm* [Research of anchoring wire rope with a diameter of 20 K3x7 (3) in supporting nodes of reinforced concrete farms]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.01; Chelyabinskii tehn. univ-t. Chelyabinsk, 1975. 292 p. (rus)
4. Sasonko L. V. *Issledovanie izgibaemykh predvaritelno napryazhennykh zhelezobetonnykh konstruktsiy s otognutoy armaturoy* [Study of flexure prestressed concrete constructions with bent-up reinforcement]: avtorev. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.01; NIIZHB. M, 1974. 22p. (rus)
5. Solovyev B. V. *Issledovanie raboty kosvennoi armatury v betone na uchastke ankerovki kanata K3x7 (3)* [Research of operation of hooped reinforcement in concrete on the site of anchoring of a wire rope 20 K3x7 (3)]: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.23.01; Chelyabinskii tehn. univ-t. Chelyabinsk, 1973. 258 p. (rus)

*Статья поступила в редколлегию 21.11.2016.*