

УДК 624.012.36

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗГИБУ С ПОПЕРЕЧНОЙ СИЛОЙ ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПРЯМОЛИНЕЙНОГО И ЛОМАНОГО ОЧЕРТАНИЙ

*Н.В. МАТВЕЕНКО, канд. техн. наук, доц. П.В. КРИВИЦКИЙ  
(Брестский государственный технический университет)*

*По результатам экспериментальных исследований выполнен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния в зоне среза предварительно напряженных железобетонных балок прямолинейного и ломаного очертаний. Выявлены особенности трещинообразования экспериментальных балок в зависимости от очертания, а также влияние анкеровки арматуры на характер разрушения. По результатам испытаний в балках ломаного очертания наблюдается равномерное распределение растягивающих напряжений по нижней грани, что указывает на равную трещиностойкость нормальных сечений по всей длине конструкции. Проведение дополнительных конструктивных мероприятий для повышения анкеровки напрягаемой арматуры сказались на уменьшении угла наклона магистральной диагональной трещины и повышении сопротивления срезу независимо от очертания граней по длине опытных балок. При этом в момент разрушения балок прямолинейного и ломаного очертаний углы наклона магистральных диагональных трещин были практически равны.*

**Ключевые слова:** *предварительно напряженные железобетонные балки, напряженно-деформированное состояние, сопротивление, трещиностойкость, отгиб, ломаное очертание.*

**Введение.** В условиях постоянно увеличивающихся объемов строительства важным направлением исследований является поиск рациональных и экономически эффективных конструктивных решений несущих элементов зданий, которые бы обладали архитектурной выразительностью и соответствовали эстетико-психологическим требованиям.

Применение предварительного напряжения в железобетонных конструкциях позволяет, с одной стороны, уменьшить размеры элементов, что благоприятно сказывается не только на внешнем виде здания, но и на его архитектурно-планировочных решениях. С другой – предварительно напряженные конструкции обладают более высокой жесткостью и трещиностойкостью по сравнению с элементами без предварительного напряжения [1].

Вместе с тем предварительно напряженные конструкции имеют также ряд недостатков. К основным из них относятся увеличение трудоемкости изготовления конструкций, связанное с необходимостью предварительного натяжения арматуры, и повышение стоимости всей конструкции за счет использования более дорогих силовых форм и высокопрочной арматуры.

**Основная часть.** На протяжении XX в. исследователи из различных стран пытались решить сложности применения предварительно напряженных конструкций за счет более эффективного применения высокопрочной арматуры или уменьшения ее расхода при изготовлении конструкции. Как известно, в однопролетных свободно опертых балках изгибающие моменты в приопорных зонах пролета значительно меньше, чем в средней, но продольная рабочая арматура, подобранная в середине пролета, устанавливается постоянного сечения по всей длине элемента. На настоящий момент известно несколько способов повышения экономической эффективности предварительно напряженных конструкций.

Первый способ – применение смешанного армирования. Такой вариант армирования приемлем для конструкций, в которых сечение рабочей арматуры определяется требованиями прочности, а расчет по предельным состояниям эксплуатационной пригодности не является лимитирующим. В этом случае может быть уменьшена величина предварительного напряжения путем замены части напрягаемой арматуры на ненапрягаемую, устанавливаемую в соответствии с эпюрой изгибающих моментов в средней части пролета. Таким образом можно получить более рациональный вариант конструкции – конструкцию равного сопротивления [2; 3].

Второй способ связан с переводом определенного количества продольной напрягаемой арматуры из нижней растянутой зоны в пролете в верхнюю сжатую зону на опоре, где она не полностью используется для обеспечения прочности нормальных сечений. Благодаря такому отгибу части арматуры повышается трещиностойкость наклонных сечений, увеличивается сопротивление конструкции срезу, распределяется равномерно напрягаемая арматура по торцу балки, создается обжатие бетона опорных частей в вертикальном направлении и уменьшается вероятность образования горизонтальных трещин на ее концевых участках [4; 5].

Более эффективными могут стать конструкции, в которых сочетаются преимущества описанных выше способов [6]. Сопротивление подобных элементов в зоне действия максимальных изгибающих моментов обеспечивается продольной напрягаемой арматурой. В приопорной зоне выполняется отгиб всей высокопрочной арматуры, что позволяет повысить трещиностойкость наклонных сечений и сопротивление срезу балки. Для обеспечения сопротивления изгибу в приопорной зоне устанавливается ненапрягаемая арматура.

Применение элементов с отогнутой напрягаемой арматурой сталкивается с определенными сложностями, связанными с трудоемкостью работ по натяжению арматуры и необходимостью наличия приспособлений,

обеспечивающих натяжение арматуры в отогнутом положении или оттяжку ее из первоначального горизонтального положения в проектное отогнутое.

В 50 гг. XX в. зарубежные исследователи [7; 8], а позднее и отечественные [9; 10], предложили вариант конструктивного решения, в котором благодаря ломаному очертанию по длине элемента прямолинейная предварительно напряженная арматура располагается под углом к продольной оси, создавая вертикальное обжатие приопорной зоны и повышая сопротивление срезу балки (рисунок 1).

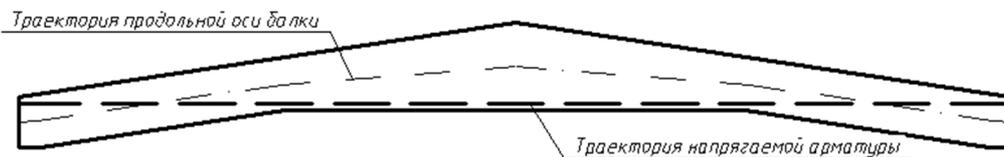


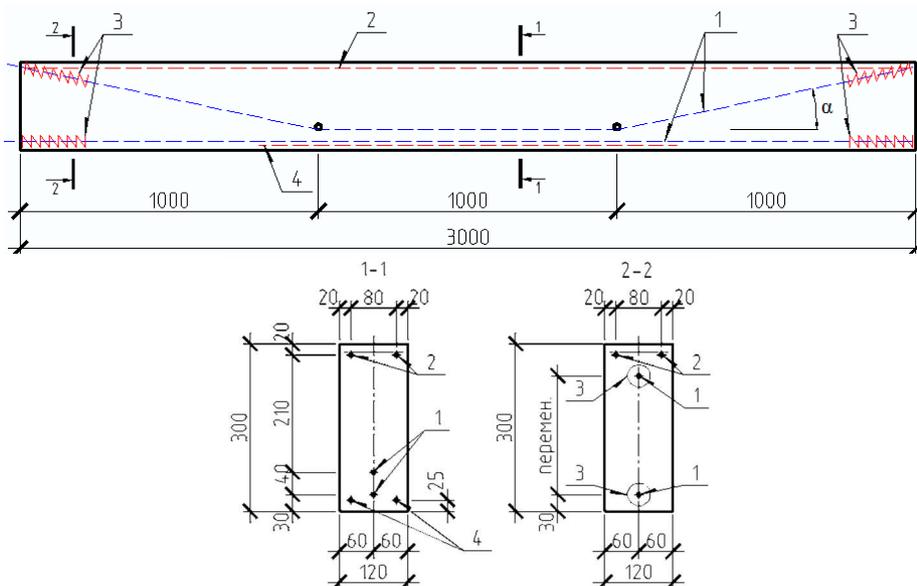
Рисунок 1. – Балка ломаного очертания с прямолинейной напрягаемой арматурой

Несмотря на очевидные преимущества конструкций криволинейного очертания они не нашли широкого применения в практике строительства, что связано с отсутствием достоверных экспериментально-теоретических данных о напряженно-деформированном состоянии элементов ломаного очертания, в т.ч. в зоне среза.

*Характеристика опытных образцов.* С целью выявления особенностей работы элементов ломаного очертания выполнен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния зоны среза балок с параллельными поясами и отгибом части продольной предварительно напряженной арматуры (серия БО) [11] и двускатных балок с ломаной нижней гранью и прямолинейно расположенной арматурой (серия БД).

В качестве опытных образцов применялись балки с параллельными поясами прямоугольного сечения с размерами  $b \times h = 120 \times 300$  мм длиной 3,0 м. Изготавливались балки из бетона со средней кубиковой прочностью в пределах 50,3–57,7 МПа и армировались основной канатной арматурой диаметром 12,5 мм, соответствующей классу Y1860 S7. Конструктивное решение и армирование балок прямолинейного очертания серии БО представлены на рисунке 2 и в таблице 1.

Длина балок серии БД составила 3 м, высота сечения переменная: минимальная 270 мм для наклонной части балки у опоры, максимальная – 350 мм в коньке. Ширина сечения 120 мм по всей длине балки. В середине пролета было предусмотрено поперечное армирование в виде хомутов Ø6 мм класса S240 или S500, установленных с шагом 150 мм. В качестве напрягаемой арматуры в балке БД-1 был использован арматурный стержень Ø14 мм S800, в балке БД-2 – канат Y1860 S7 Ø12,5 мм, а ненапрягаемая продольная арматура представлена двумя стержнями Ø16 мм класса S500. В сжатой зоне было предусмотрено два стержня Ø12 мм класса S500. Информация о конструктивном решении балок ломаного очертания представлена на рисунке 3 и в таблице 2.



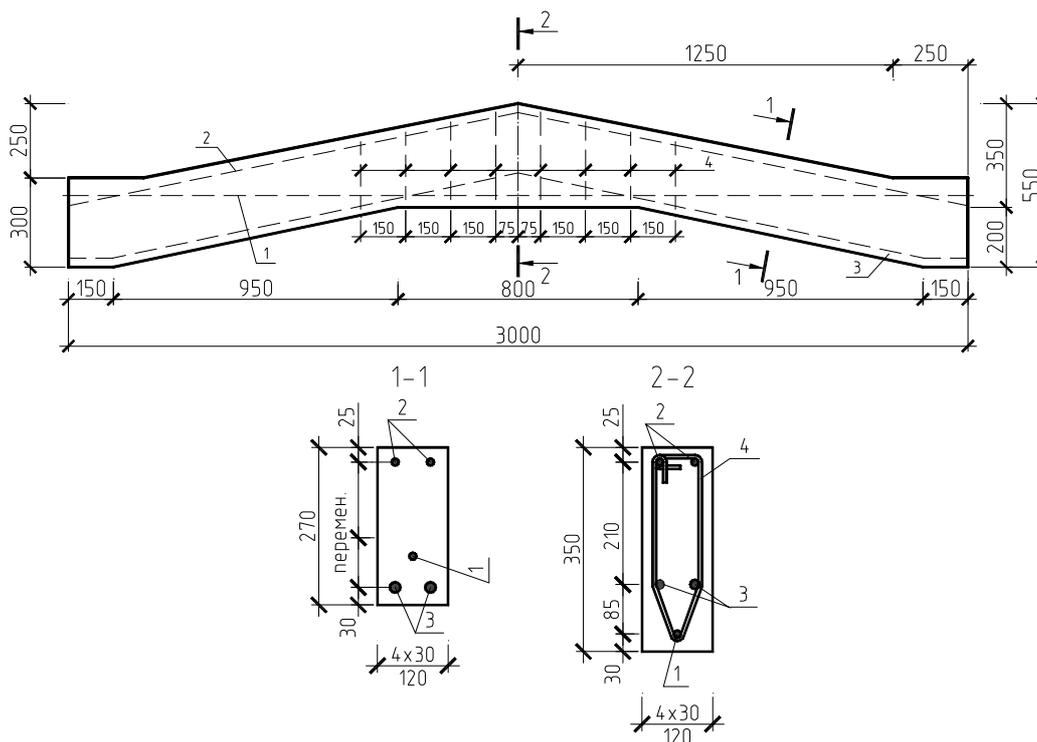
1 – напрягаемая арматура; 2 – ненапрягаемая арматура сжатой зоны; 3 – спирали косвенного армирования; 4 – ненапрягаемая арматура средней части пролета балки.

Рисунок 2. – Конструктивное решение и армирование балок серии БО

Таблица 1. – Основные характеристики балок серии БО

Марка балок	Размеры, см			$f_{cm}$ , МПа	Относительный пролет среза $a/h$	$\alpha$ , град	Величина преднапряжения нижних канатов, МПа	Величина преднапряжения верхних канатов, МПа
	$b$	$h$	$l_0$					
БО-1	12	30	260	57,7	2,67	9,0	946	928
БО-2	12	30	260	54,2	2,67	9,0	941	920
БО-3*	12	30	260	54,1	2,67	9,0	934	915
БО-4	12	30	225	55,8	2,04	9,0	958	921
БО-5	12	30	260	50,3	2,67	12,0	947	930
БО-6	12	30	260	51,9	2,67	9,0	796	780

Примечание. В опытном образце, помеченном знаком «\*», дополнительно устанавливались анкера.



1 – напрягаемая арматура; 2 – ненапрягаемая арматура сжатой зоны;  
3 – ненапрягаемая арматура средней части пролета балки; 4 – ненапрягаемая арматура наклонных частей балки;  
5 – поперечная арматура.

Рисунок 3. – Конструктивное решение и армирование балок ломаного очертания (серия БД)

Таблица 2. – Основные характеристики балок серии БД

Марка балок	Размеры, см				Поперечная арматура в средней части	$f_{cm}$ , МПа	Напрягаемая арматура	Величина предварительного напряжения арматуры, МПа
	$b$	$h_k$	$h_n$	$l_0$				
БД-1	12	35	27	280	Ø6 S240 шаг 150 мм	57,46	Ø12,5 Y1860 S7	502,57
БД-2	12	35	27	280	Ø6 S500 шаг 150 мм	56,55	Ø14 S800	778,09

На рисунках 4 и 5 представлены величины и направления главных деформаций в зоне среза для балок БД-1 и БО-1 на четырех этапах загрузки: после окончания обжатия (до приложения внешней нагрузки); перед образованием нормальных трещин; на стадии, соответствующей работе балки с нормальными трещинами, – перед образованием наклонных трещин; на этапе, соответствующем работе балки с нормальными и наклонными трещинами.

Напряженно-деформированное состояние балок в зоне среза. В балках серии БД при обжатии бетона векторы главных деформаций сжатия по всей длине наклонной части балки ориентированы горизонтально – вдоль траектории предварительно напряженной арматуры. При этом характер распределения главных деформаций по высоте сечения изменяется в зависимости от расположения напрягающего элемента в рассматриваемом сечении. Вблизи места излома нижней грани балки усилие предварительного обжатия приложено в нижней части сече-

ния, в связи с чем деформации укорочения возникают в нижней и средней зонах сечения, а верхней отмечается незначительное растяжение. В середине длины наклонной части трасса напрягающего элемента проходит в пределах ядра сечения, что приводит к возникновению по всей высоте сечения деформаций укорочения приблизительно равной величины. В сечениях, расположенных на расстоянии до  $1,3d$  от торца балки, траектория напрягаемой арматуры проходит выше верхней ядровой точки сечения, что приводит к возникновению незначительных деформаций растяжения у нижней грани от действия усилия обжатия.

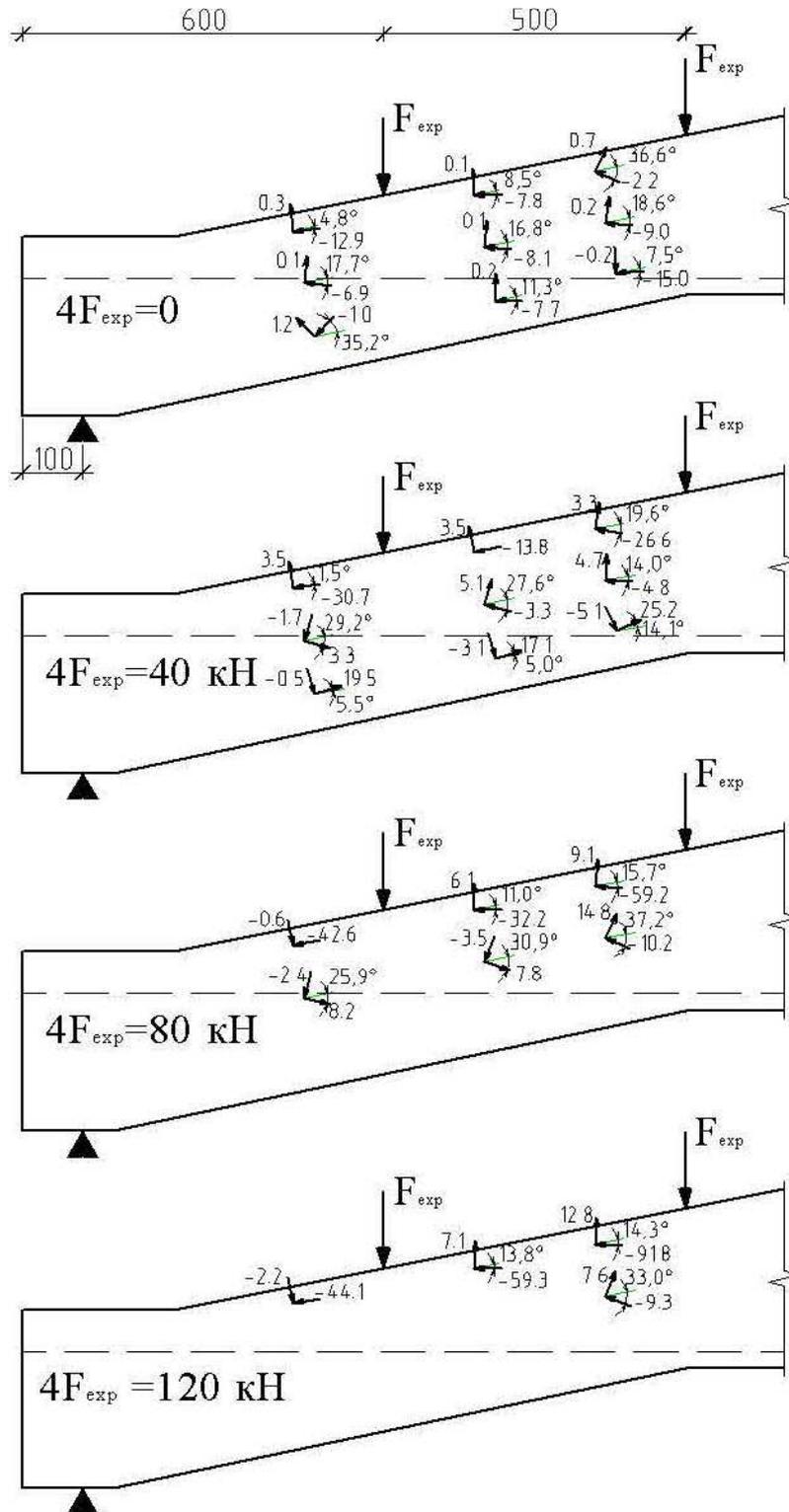


Рисунок 4. – Направление и величина главных деформаций ( $\epsilon_{1,2} \times 10^{-5}$ ) в балке БД-1 от действия внешнего нагружения и усилия предварительного обжатия

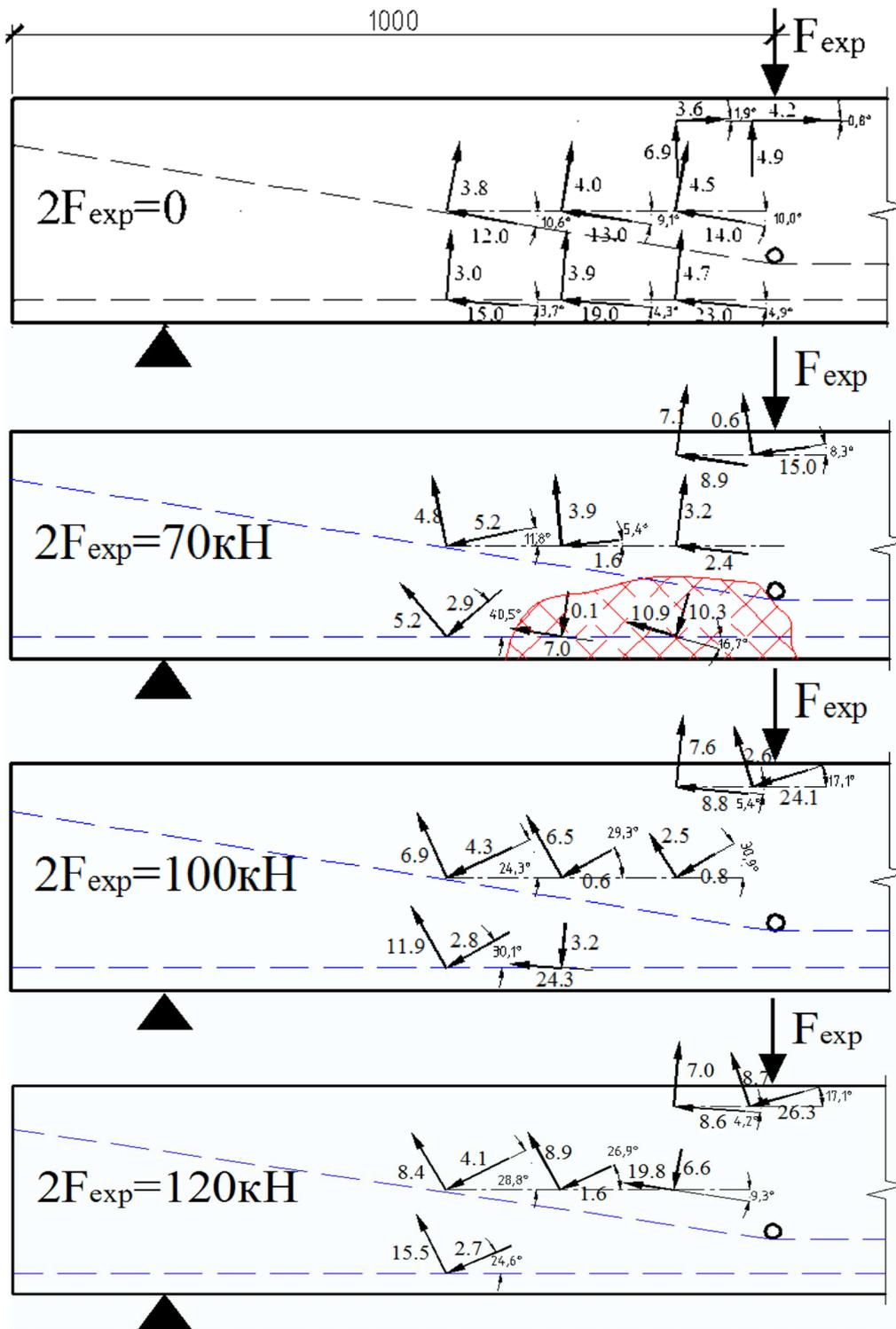


Рисунок 5. – Направление и величина главных деформаций ( $\epsilon_{1,2} \times 10^{-5}$ ) в балке БО-I-1 от действия внешнего нагружения и усилия предварительного обжатия

На этапе перед образованием нормальных трещин ( $4F_{exp} = 40 \text{ кН}$ ) в нижней части сечения возникают деформации растяжения, ориентированные вдоль нижней грани. При этом по всей длине наклонной части балки величина главных деформаций удлинения находится в пределах  $(17,1-25,2) \times 10^{-5}$ . Равная величина продольных деформаций растяжения у нижней грани является признаком одновременного образования нормальных трещин по всей длине конструкции, что и было зафиксировано на следующем этапе нагружения при проведении эксперимента.

Одновременно с увеличением деформаций растяжения в нижней части сечения отмечен рост главных сжимающих деформаций у верхней грани, ориентированных вдоль наклонной части балки. При этом в сечении

у опоры величины деформаций укорочения больше, чем в сечении у места излома нижней грани, где изгибающий момент согласно принятой схеме загрузки имеет большее значение. Такое распределение главных деформаций является результатом совместного действия внешней нагрузки и усилия предварительного обжатия и обусловлено особенностями конструктивного решения двускатной балки, а именно переводом продольной напрягаемой арматуры из нижней зоны сечения в пролете в верхнюю на опоре.

В средней части сечения главные деформации сжатия имеют незначительную величину, но приобретают вполне определенную ориентацию от опоры к первому пролетному грузу и направлены под углом  $27,6\text{--}29,2^\circ$  к продольной оси.

На стадии после образования нормальных трещин ( $4F_{exp} = 80$  кН) в середине высоты сечения векторы главных деформаций сжатия сохраняют свою ориентацию от опоры к пролетному грузу, но приобретают более пологий наклон  $25,9\text{--}27,2^\circ$ .

После появления наклонных трещин ( $4F_{exp} = 120$  кН) векторы сжимающих деформаций в середине высоты сечения незначительно изменяли величину и направление, векторы главных деформаций удлинения увеличивались в большей степени. Угол наклона главных площадок деформаций в месте пересечения с трассой напрягающего элемента составлял  $25\text{--}27^\circ$ , что в последствии предопределило угол наклона магистральной наклонной трещины. Угол наклона трещины в балке БД-1 составил  $36^\circ$ , в балке БД-2 –  $28^\circ$ . Более пологий угол наклона диагональной трещины в балке БД-2 обусловлен лучшими условиями сцеплениями с бетоном стержневой напрягаемой арматуры в сравнении с канатной, использованной в балке БД-1.

Разрушение балки БД-1 произошло по наклонной трещине в приопорной зоне и сопровождалось втягиванием каната в торце балки. Благодаря надежной анкерровке напрягаемой арматурой в балке БД-2 ее сопротивление срезу оказалось существенно выше и разрушение произошло по нормальным сечениям в середине пролета.

В балках прямоугольного очертания серии БО после окончания обжатия у нижней грани векторы главных деформаций сжатия направлены практически горизонтально, а 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 балок составляет  $9,1\text{--}10,6^\circ$ .

Несмотря на разные пролеты среза, усилия обжатия бетона и дополнительную анкерровку напрягаемой арматуры, первыми образовывались по всей длине зоны «чистого» изгиба трещины, нормальные к продольной оси элемента. Уровень загрузки балок при образовании трещин составлял  $2F_{exp} = 60\text{--}70$  кН. На данном этапе загрузки в середине высоты сечения приопорной зоны балки БО-1 векторы главных сжимающих деформаций слегка наклонены к опоре. Угол наклона по траектории от опоры к пролетному грузу составляет  $5,4^\circ$ , и с дальнейшим увеличением внешнего нагружения происходит значительный поворот главных площадок против часовой стрелки (см. рисунок 5). В нижней части сечения балки БО-1 векторы главных растягивающих деформаций на участке, длина которого равна рабочей высоте сечения  $d$  от отгиба верхнего каната, направлены под углом  $9,0\text{--}16,7^\circ$ , а их значения находятся в пределах  $(7,0\text{--}10,9)\times 10^{-5}$ , что близко предельным (заштрихованная зона, см. рисунок 5).

При последующем возрастании внешней нагрузки ( $2F_{exp} = 90\text{--}100$  кН) с удалением от точки перегиба каната в сторону опоры на длине  $d/2\text{--}d$  образовывались новые нормальные трещины, которые при дальнейшем увеличении нагрузки «переходили» в слабонаклонные к вертикали, и их развитие, дойдя до уровня отогнутого каната, вначале приостанавливалось, а затем в месте пересечения трассировки отогнутого каната они изменяли направление на более пологое. Главные деформации сжатия в середине высоты сечения по направлению от опоры к пролетному грузу (за пределами зоны влияния силы загрузки) направлены под углом  $24,3\text{--}29,3^\circ$ , а значения главных растягивающих деформаций составляют  $(6,5\text{--}6,9)\times 10^{-5}$ , что также меньше предельных для бетона балки БО-1.

После появления слабонаклонных трещин с растянутой грани балки БО-1 ( $2F_{exp} = 120$  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  $26,9\text{--}28,8^\circ$ . Дальнейшее увеличение нагрузки не изменило ориентацию главных площадок, но способствовало выделению бетонных подкосов.

В результате в опорных зонах ранее и вновь появившиеся наклонные трещины развивались как к верхней, так и к нижней граням, образуя явно выраженные диагональные трещины. По одной из диагональных трещин (магистральной) происходило разрушение балок с раздроблением сжатого бетона в конце магистральной наклонной трещины (в балках БО-1–БО-3) или срезом бетона сжатой зоны (в балках БО-4–БО-6). Угол наклона магистральных трещин в зоне пересечения с отогнутым канатом составлял  $26\text{--}36$ .

Уменьшение относительного пролета среза для образца БО-4 повысило нагрузку трещинообразования, а снижение усилия обжатия бетона в балке БО-6 привело к более раннему появлению нормальных трещин. Незначительное увеличение угла отгиба верхнего каната в балке БО-5 не сказалось существенно на общей картине расположения трещин и характере разрушения образца, в отличие от постановки в балке БО-3 дополнительных анкеров, повлиявшей на угол наклона магистральной диагональной трещины и сопротивлении срезу.

**Заключение.** По результатам анализа напряженно-деформированного состояния балок ломаного и прямолинейного очертаний можно сделать следующие выводы:

1. В балках ломаного очертания с прямолинейной напрягаемой арматурой главные деформации растяжения у нижней грани достигают предельных значений одновременно по всей длине наклонной части балки. Это свидетельствует о равной трещиностойкости нормальных сечений по всей длине конструкции.

2. Угол наклона магистральной трещины в балках серии БД составил 28–36°, в балках серии БО – 26–36°. Таким образом, напряженно-деформированное состояние балок ломаного очертания в зоне среза в полной мере соответствует особенностям работы прямолинейных балок с отгибом части продольной арматуры на опоре. Следует также отметить, что полученные в балках серий БД и БО значения углов наклонов диагональных трещин в момент разрушения не велики (пологие углы), что свидетельствует о включении в сопротивление всего участка среза.

3. Независимо от конструктивного решения балки наибольшее влияние на характер разрушения оказывает анкеровка продольной напрягаемой арматуры. В образцах, у которых анкеровка арматуры (канатной или стержневой) обеспечивалась конструктивными мероприятиями, угол наклона магистральной трещины оказался более пологим, а сопротивление срезу – выше.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов, В.В. Предварительно напряженные железобетонные конструкции (Теория, расчет и подбор сечений) / В.В. Михайлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1978. – 383 с.
2. Михайличенко, А.В. Напряженно-деформированное состояние, расчет и оптимизация изгибаемых элементов со смешанным армированием : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / А.В. Михайличенко. – Киев, 1993. – 22 с.
3. Хуранов, В.Х. Железобетонные конструкции равного сопротивления с комбинированным преднапряжением и смешанным армированием : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / В.Х. Хуранов ; Рост. гос. строит. ун-т. – Ростов на/Д, 2004 – 24 с.
4. Малиновский, В.Н. Сопротивление предварительно напряженных балок из высокопрочного бетона с отогнутой стержневой арматурой при изгибе с поперечной силой : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / В. Н. Малиновский. – Л., 1988. – 153 л.
5. Сасонко, Л.В. Исследование изгибаемых предварительно напряженных железобетонных конструкций с отогнутой арматурой : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Л.В. Сасонко. – М., 1974. – 146 л.
6. Малиновский, В.Н. Эффективность железобетонных конструкций при смешанном армировании / В.Н. Малиновский, Н.В. Матвеевко // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / РУП «Институт БелНИИС» ; редкол.: О.Н. Лешкевич (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – Вып. 8. – С. 155–171. DOI: 10.23746/2016-8-9.
7. Маньель, Г. Предварительно напряженный железобетон / Г. Маньель. – М. : Госстройиздат, – 1958. – 412 с.
8. Leonhardt, F. Continuous Prestressed Concrete Beams / F. Leonhardt // Journ. of ACI. – Mar., 1953. – Vol. 22, № 7. – P. 617–634.
9. Горожанский, Ю.Ф. Преимущества замены статической схемы сборных железобетонных рам для одноэтажного промышленного строительства / Ю.Ф. Горожанский // Респ. науч.-техн. конф. : тез. докл., Брест, 26–28 нояб. 1968 г. / Брест. инж.-техн. ин-т ; редкол.: П.Н. Макарук (отв. ред.) [и др.]. – Брест, 1968. – С. 42–47.
10. Малиновский, В.Н. Усовершенствованный вариант конструктивного решения железобетонных стропильных балок / В.Н. Малиновский, П.В. Кривицкий, Н.В. Матвеевко // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Строительство и архитектура. – 2013. – № 1 (79). – С. 128–131.
11. Малиновский, В.Н. Экспериментальные исследования влияния конструктивных факторов на сопротивление изгибу с поперечной силой предварительно напряженных железобетонных элементов с канатной отогнутой арматурой / В.Н. Малиновский, П.В. Кривицкий // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / РУП «Институт БелНИИС» ; редкол.: О. Н. Лешкевич (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – Вып. 8. – С. 134–154. DOI: 10.23746/2016-8-8.

Поступила 01.06.2021

#### EXPERIMENTAL STUDIES OF THE FLEXURE WITH SHEAR FORCE RESISTANCE OF STRAIGHT AND BROKEN CONFIGURATION PRESTRESSED CONCRETE BEAMS

*N. MATWEENKO, P. KRIVITSKIY*

*In the article, based on the results of experimental studies, a comparative analysis of the stress-strain state in the shear zone of prestressed concrete beams of straight and broken configuration is carried out. The features of experimental beams cracking are revealed depending on the configuration, as well as the influence of reinforcement anchoring on the nature of destruction. According to the test results in the beams of a broken configuration, a uniform distribution of tensile stresses along the lower face is observed, which indicates an equal crack resistance of normal sections along the entire length of the structure. Additional structural measures to increase the anchoring of prestressing reinforcement resulted in a decrease in the angle of inclination of the critical diagonal crack and an increase in shear resistance regardless of the faces configuration along the length of the test beams. At the same time, at the moment of the beams destruction of the straight and broken configuration, the angles of inclination of the critical diagonal cracks were practically equal.*

**Keywords:** prestressed concrete beam, stress-strain state, resistance, fracture strength, bend, broken configuration.