

## УЧЁТ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЛОМАННОГО ОЧЕРТАНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕЗУ

*Н.В. Матвеевко<sup>1</sup>, П.В. Кривицкий<sup>2</sup>, В.Н. Малиновский<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *Магистр технических наук, старший научный сотрудник отраслевой лаборатории «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве» Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: nikifarych@yandex.ru*

<sup>2</sup> *К.т.н., доцент, заведующий отраслевой лабораторией «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве» Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: krivitskiyp@mail.ru*

<sup>3</sup> *К.т.н., доцент, профессор кафедры «Строительные конструкции» Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь*

---

### **Реферат**

Конструктивное решение балок ломанного очертания имеет ряд преимуществ, связанных с особенностями статической работы подобных элементов. В наклонной части балок ломанного очертания возникает продольное сжимающее усилие, которое повышает трещиностойкость наклонных сечений и сопротивление срезу. Для оценки величины сжимающего усилия и степени его влияния на напряженно-деформированное состояние приопорной зоны балок выполнены экспериментальные исследования. Проведены испытания балок прямолинейного очертания, предварительно напряженных канатной арматурой, часть которой отгибалась вблизи опоры, и балок ломаного очертания с прямолинейно расположенной напрягаемой арматурой. Создание осевых сжимающих усилий в приопорной зоне благодаря изменению очертания продольной оси балки позволяет снизить величину предварительного обжатия, создаваемого напрягаемой арматурой, и избежать его деструктивного влияния на контактный слой между бетоном и арматурой при сохранении требуемых трещиностойкости и сопротивления срезу.

**Ключевые слова:** предварительно напряженные железобетонные балки, напряженно-деформированное состояние, сопротивление срезу, трещиностойкость, отгиб, ломанное очертание, сцепление, анкеровка.

---

## CONSIDERATION OF DESIGN FEATURES OF CURVED ELEMENTS IN DETERMINING SHEAR RESISTANCE

**N. V. Matweenko, P. V. Krivitskiy, V. N. Malinovskiy**

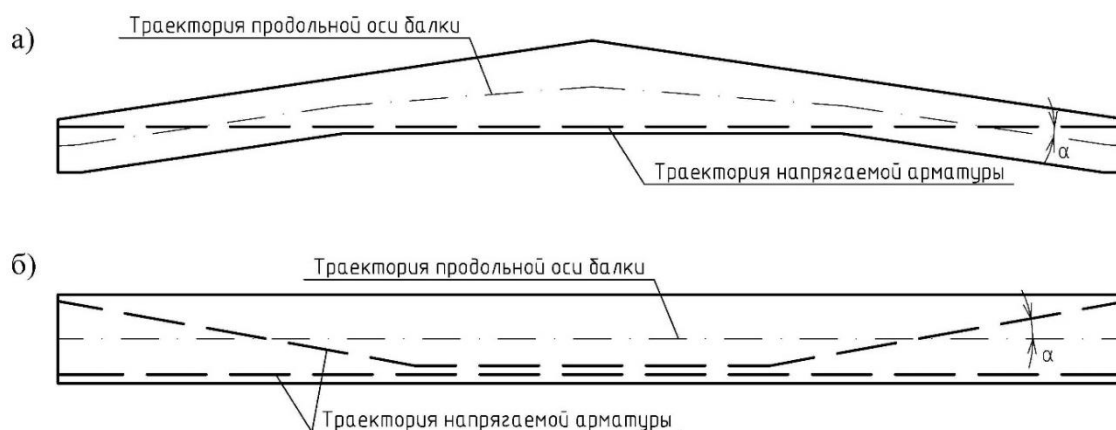
### **Abstract**

The constructive solution of curved beams has some excellence associated with the features of the static scheme of such elements. In the inclined part of the beams of a

curved elements, a longitudinal compressive action, which increases the crack resistance of the inclined sections and the shear resistance. To assess the magnitude of the compressive action and the degree of its influence on the stress-strain state of the support zone of the beams, experimental studies were carried out. Tests were carried out on beams of a rectilinear shape, prestressed with tendons, part of which was bent-up near the support, and curved beams with a rectilinearly located prestressing reinforcement. The creation of axial compressive action in the support zone due to a change in the shape of the longitudinal axis of the beam makes it possible to reduce the amount of precompression created by prestressing reinforcement and avoid its destructive effect on the contact layer between concrete and reinforce with conservation the required crack resistance and shear resistance.

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

**Введение.** Как известно, применение балок ломанного очертания (рисунок 1, а) позволяет при прямолинейной напрягаемой арматуре сохранить положительные качества балок с отогнутой арматурой (рисунок 1, б) [1].



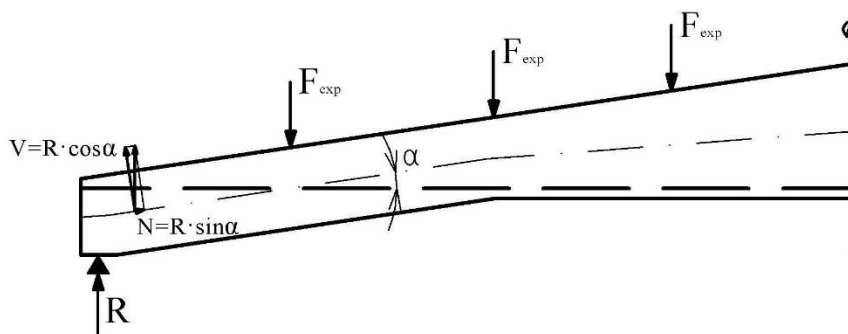
- а) балка ломанного очертания с прямолинейной арматурой;  
 б) балка прямолинейного очертания с отогнутой арматурой

**Рисунок 1 – Конструктивное решение предварительно напряженных балок**

Результаты экспериментальных исследований [2] подтверждают, что напряженно-деформированное состояние балок ломанного очертания в зоне среза в полной мере соответствует особенностям работы прямолинейных балок с отгибом части продольной арматуры. Однако в балках с ломанной нижней гранью в связи с особенностями конструктивного решения у опоры вся предварительно напряженная арматура переводится в верхнюю зону сечения, а сопротивление изгибу на данном участке обеспечивается ненапрягаемой арматурой. Таким образом, трещиностойкость нормальных сечений в приопорной зоне в подобных балках оказывается ниже по сравнению с балками прямолинейного очертания. В следствие этого может произойти формирование наклонных трещин первой группы, начинающихся с нижней растянутой зоны сечения, и, как следствие, разрушение по одной из них. Кроме этого перевод всей напрягаемой арматуры в

верхнюю зону сечения приводит к тому, что еще до приложения нагрузки возникают растягивающие усилия в зонах, подверженных растяжению на стадии эксплуатации. Это приводит к образованию нормальных трещин на более ранних этапах загрузки конструкции.

Данные негативные последствия могут быть компенсированы за счет продольного сжимающего усилия, возникающего в наклонной части балки от действия опорной реакции (рисунок 2). Благодаря принятому конструктивному решению балок опорная реакция делится на две составляющие: поперечную силу которая оказывается меньше, чем в балках прямолинейного очертания, и продольную, которая наряду с напрягаемой арматурой создает обжатие бетона.

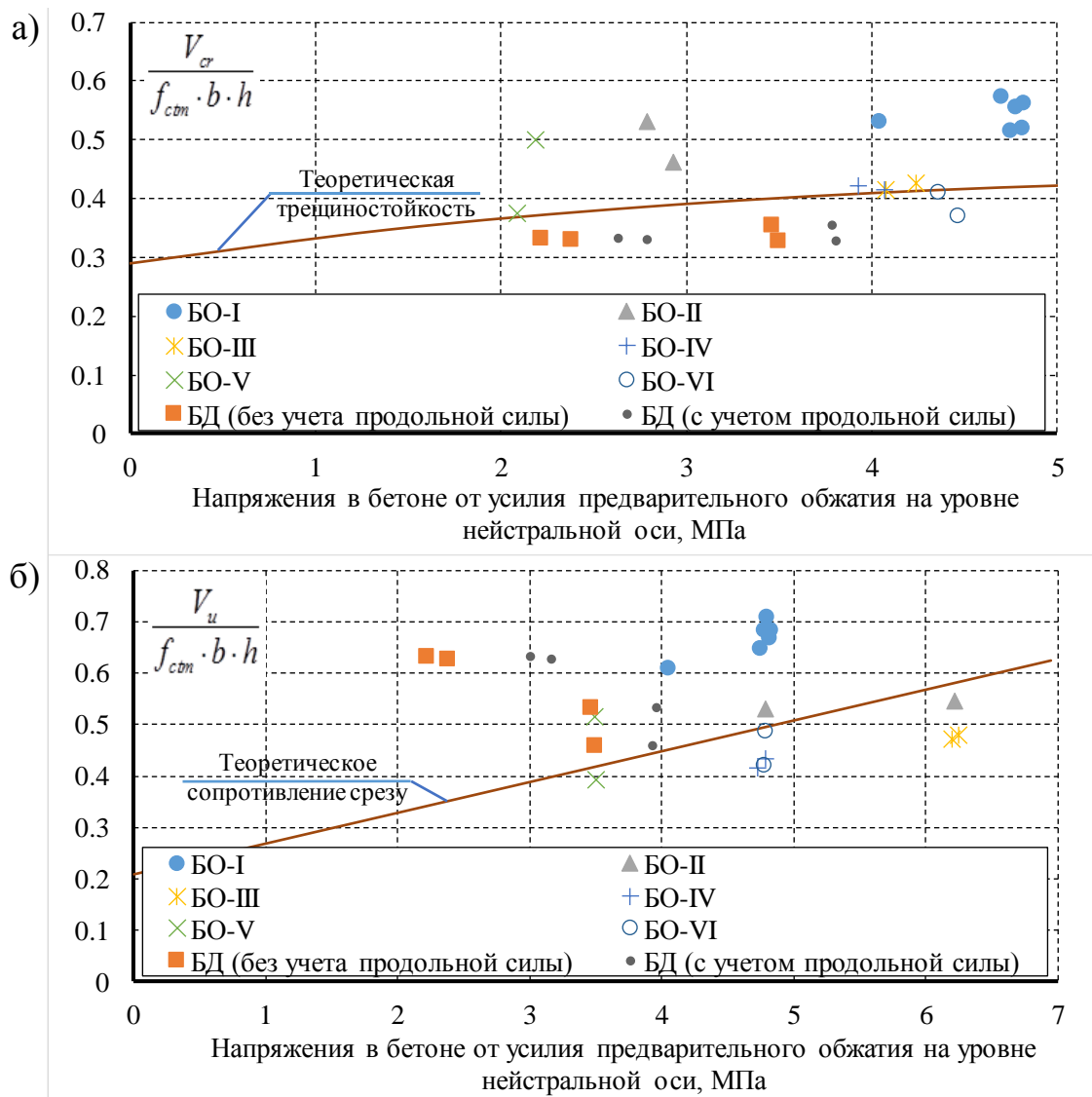


*Рисунок 2 – Схема внутренних усилий, действующих в наклонной части балки ломанного очертания*

Величина эффекта зависит от конструктивных параметров балки: угла наклона верхней и нижней грани, высоты сечения на опоре и в пролете, схемы нагружения, а также меняется в зависимости от величины приложенной нагрузки.

**Трещиностойкость наклонных сечений и сопротивление опытных образцов.** С целью оценки степени влияния продольного сжимающего усилия на напряженно-деформированное состояние приопорной зоны выполнен сравнительный анализ сопротивления образованию наклонных трещин и срезу предварительно напряженных балок двух типов: ломанного очертания и с параллельными поясами с отгибом у опоры части продольной напрягаемой арматуры [2].

По результатам экспериментальных исследований обоих типов балок отмечено, что сопротивление образованию наклонных трещин и срезу увеличивается с повышением степени обжатия бетона (рисунок 3). При этом изменение сопротивления в зависимости от величины продольного усилия имеет непропорциональную зависимость, что соответствует общим принципам работы изгибаемых конструкций, описанным *А. С. Залесовым* и *Ю. А. Климовым* [3]. Сопротивление срезу балок с параллельными поясами с достаточной точностью описывается кривой, полученной по результатам теоретических расчетов по известным зависимостям [4]. В случае, если при определении сопротивления срезу балок ломаного очертания учитывать только величину продольного сжимающего усилия, создаваемого напрягаемой арматурой, то прогнозируемое значение оказывается значительно ниже полученного экспериментально (на 40..45%). При учете продольной силы, возникающей от действия опорной реакции, разница в величинах теоретического и экспериментального сопротивления составляет не более 27%.



а) – сопротивление балок образованию наклонных трещин;  
 б) – сопротивление балок срезу

**Рисунок 3 – Зависимость сопротивления образованию наклонных трещин ( $V_{cr}$ ) и срезу ( $V_u$ ) элементов с отогнутой напрягаемой арматурой и ломанного очертания**

На начальных этапах загрузки (в том числе в момент образования наклонных трещин) продольная сила составляла не более 10..15% от усилия предварительного обжатия и не оказывала существенного влияния на трещиностойкость. С ростом нагрузки усилие сжатия возрастало и препятствовало раскрытию нормальных и наклонных трещин. В момент разрушения сжимающая сила в опорной отдельной достигала до 33% от усилия предварительного обжатия, что приводит к значительному увеличению сопротивления срезу (рисунок 3). Особенно явно данный эффект выражен в балках, у которых уровень предварительного обжатия бетона был ниже.

Следует также отметить, что из 4-ех испытанных балок ломаного очертания только две разрушились по наклонной трещине у опоры. Таким образом, фактическое сопротивление срезу балок выше указанного на рисунке 3, б. Следует также отметить, что разрушение балок прямолинейного и ломаного очертания в ряде случаев сопровождалось втягиванием каната по торцам балки, что свидетельствует о разрушении зоны контакта арматуры с бетоном в зоне анкеровки.

В предварительно напряженных конструкциях анкеровка напрягаемой арматуры тесно связана с длиной зоны передачи усилия обжатия бетона и зависит от надежности сцепления арматуры с бетоном, это является основным условием работы железобетона как комплексного строительного материала. При этом величины и качество данных факторов оказывают определяющее влияние на морфологию трещин (нормальных и наклонных) и как следствие – на сопротивление срезу.

Не вызывает сомнения, что величина предельного напряжения сцепления арматуры с бетоном зависит от деструктивных процессов, происходящих в бетоне, в том числе и в бетоне контактного слоя. Изменение структуры бетона, предшествующее разрушению материала, характеризуется тремя этапами: уплотнение, по мере появления микроразрушений разуплотнение и собственно разрушение в результате объединения микротрещин в магистральные трещины. Результаты опытов, проведенных по установлению влияния степени кратковременного обжатия бетона на его сцепление с арматурой [5], показывают, что величина сил сцепления функционально зависит от деструктивных процессов, происходящих в бетоне при силовом воздействии. Относительно небольшой уровень обжатия бетона (до  $0,2f_{cm}$ ) способствует уплотнению структуры материала, а это приводит к увеличению сцепления. Повышение уровня предварительного обжатия ( $0,2 \div 0,7f_{cm}$ ) вызывает снижение сцепления. Основной причиной отмеченного обстоятельства является нарастающее развитие деструктивных процессов в большей части объема бетона. Дальнейшее увеличение уровня предварительного обжатия (до  $0,95f_{cm}$ ) связано с резким падением величины сил сцепления. Это объясняется тем, что при указанных напряжениях микротрещины объединяются в магистральные трещины, и наиболее вероятное направление одной из них – по контакту арматуры с бетоном, что приводит к катастрофическому снижению сцепления и разрыву бетона от расклинивания [5].

Таким образом, конструктивное решение балок ломаного очертания позволяет уменьшить величину предварительного обжатия бетона, создаваемого напрягаемой арматурой, что благоприятно влияет на характеристики сцепления арматуры с бетоном. Дополнительное сжимающее усилие, возникающее в наклонной части балки от внешнего загрузения позволяет повысить трещиностойкость наклонных сечений и сопротивление срезу железобетонных элементов и при этом избежать деструктивного влияния на контактный слой вследствие предварительного напряжения арматуры.

#### **Выводы.**

1. Благодаря особенностям конструктивного решения в наклонном участке балок ломаного очертания от действия опорной реакции возникает дополнительная продольная сжимающая сила, которая благоприятно сказывается на трещиностойкости и сопротивлении срезу элемента.

2. Величина продольной сжимающей силы зависит от конструктивных параметров балки (угла наклона верхней и нижней грани, высоты сечения на опоре и в пролете), а также возрастает пропорционально увеличению внешней нагрузки.

3. Наиболее выражено влияние дополнительного сжимающего усилия на напряженно-деформированное состояние приопорной зоны в балках с невысоким уровнем предварительного обжатия бетона ( $0,1 \cdot f_{cm}$ ) и при нагрузках близких

к разрушающим. Увеличение степени обжатия бетона благодаря конструктивному решению балок ломанного очертания в момент разрушения составляет до 33%.

4. Создание преднапряжения в арматуре оказывает влияние на характеристиках контактного слоя бетона и арматуры: при величине предварительного обжатия бетона до  $0.2f_{cm}$  сцепление увеличивается, при величине от  $0.2f_{cm}$  до  $0.7f_{cm}$  предельные напряжения сцепления снижаются, а увеличение до  $0.95f_{cm}$  приводит к резкому падению сил сцепления.

5. Создание осевых сжимающих усилий в приопорной зоне благодаря изменению очертания продольной оси балки позволяет снизить величину предварительного обжатия, создаваемого напрягаемой арматурой, и избежать его деструктивного влияния на контактный слой при сохранении требуемых трещиностойкости и сопротивления срезу.

#### Список цитированных источников

1. Малиновский, В. Н. Усовершенствованный вариант конструктивного решения железобетонных стропильных балок / В. Н. Малиновский, П. В. Кривицкий, Н. В. Матвеевко // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2013. – № 1 (79) : Строительство и архитектура. – С. 128–131.

2. Матвеевко, Н. В. Экспериментальные исследования сопротивления изгибу с поперечной силой преднапряженных железобетонных балок прямолинейного и ломаного очертаний / Н. В. Матвеевко, П. В. Кривицкий // Вестник Полоцкого государственного университета.. – 2021. – №8 : Серия F. – С. 87–93.

3. Залесов, А.С. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил / А. С. Залесов, Ю. А. Климов. – К. : Будивэльник, 1989. – 104 с.

4. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020. – Введ. 16.11.2020. – Минск : М-во архит. и строит. РБ, 2020. – 244 с.

5. Рочняк, О. А. Влияние степени кратковременного обжатия бетона на его сцепления с арматурной / О. А. Рочняк, В. Н. Малиновский // IX конференция молодых ученых и специалистов Прибалтики и Белоруссии по проблемам строительных материалов и конструкций : тез. докл., г. Брест, 21-25 ноября 1977 г. / Брестский политехн. ин-т ; редкол. : Н. П. Блещик (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 1977. – С. 36–38.

#### References

1. Malinovskij, V. N. Uovershenstvovannyj variant konstruktivnogo resheniya zhelezobetonnyh stropil'nyh balok / V. N. Malinovskij, P. V. Krivickij, N. V. Matveenko // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2013. – № 1 (79) : Stroitel'stvo i arhitektura. – S. 128–131.

2. Matveenko, N. V. Eksperimental'nye issledovaniya soprotivleniya izgibu s poperechnoj siloj prednapryazhennyh zhelezobetonnyh balok pryamolinejnogo i lomanogo ochertanij / N. V. Matveenko, P. V. Krivickij // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta.. – 2021. – №8 : Seriya F. – S. 87–93.

3. Zalesov, A.S. Prochnost' zhelezobetonnyh konstrukcij pri dejstvii poperechnyh sil / A. S. Zalesov, YU. A. Klimov. – K. : Budivel'nik, 1989. – 104 s.

4. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii : SP 5.03.01-2020. – Vved. 16.11.2020. – Minsk : M-vo arhit. i stroit. RB, 2020. – 244 s.

5. Rochnyak, O. A. Vliyanie stepeni kratkovremennogo obzhatiya betona na ego scephleniya s armaturnoj / O. A. Rochnyak, V. N. Malinovskij // IX konferenciya molodyh uchenyh i specialistov Pribaltiki i Belorussii po problemam stroitel'nyh materialov i konstrukcij : tez. dokl., g. Brest, 21-25 noyabrya 1977 g. / Brestskij politekhn. in-t ; redkol. : N. P. Bleshchik (otv. red.) [i dr.]. – Minsk, 1977. – S. 36–38.