

Известия вузов. Строительство. 2022. № 7. С. 26–38.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (7): 26–38.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 624.046

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-763-7-26-38

**РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ПО НАКЛОННЫМ СЕЧЕНИЯМ  
ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАГРАММЫ  
ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОДОЛЬНОЙ АРМАТУРЕ  
ОТ ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА**

**Часть 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ  
И ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА РАСЧЕТА**

**Иван Николаевич Старишко**

Вологодский государственный университет, Вологда, Россия

**Аннотация.** Методы расчета прочности изгибаемых железобетонных элементов по наклонным сечениям, заложенные в действующие нормативные документы, а также некоторые другие методы, разработанные как отечественными, так и зарубежными исследователями, дают результаты расчетов, не всегда согласующиеся с опытными данными, в частности из-за недостатков ряда экспериментальных исследований, использованных при разработке указанных методов. В предлагаемой теории расчета прочности по наклонным сечениям изгибаемых железобетонных элементов используется взаимосвязь в развитии напряженно-деформированного состояния балок при действии нагрузки как в нормальных, так и в наклонных к продольной оси элемента сечениях, вплоть до разрушения, полученная в результате экспериментально-теоретических исследований. Это обеспечивает близкое совпадение опытных и расчетных данных, повышает надежность, долговечность и экономичность конструкций в процессе их эксплуатации.

**Ключевые слова:** изгибаемые элементы, метод расчета, наклонные сечения, критерии прочности бетона, длины зон среза

**Для цитирования:** Старишко И.Н. Расчет прочности по наклонным сечениям изгибаемых железобетонных элементов с использованием диаграммы зависимости напряжений в продольной арматуре от изгибающего момента. Часть 1. Состояние вопроса, результаты опытов и основные положения предлагаемого метода расчета // Известия вузов. Строительство. 2022. № 7. С. 26–38. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-763-7-26-38.

Original article

## **CALCULATION OF STRENGTH BY INCLINED SECTIONS OF BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS USING A DIAGRAM OF THE DEPENDENCE OF STRESSES IN LONGITUDINAL REINFORCEMENT ON THE VALUE OF THE BENDING MOMENT**

### **Part 1. THE STATE OF THE ISSUE, THE RESULTS OF EXPERIMENTS AND THE MAIN PROVISIONS OF THE PROPOSED CALCULATION METHODOLOGY**

**Ivan N. Starishko**

Vologda State University, Vologda, Russia

**Abstract.** Methods for calculating the strength of bent reinforced concrete elements along inclined sections, laid down in the current regulatory documents, as well as some other methods developed by both domestic and foreign researchers, give calculation results that do not always consistent with experimental data, in particular due to the shortcomings of a number of experimental studies used in the development of these methods.

The proposed theory of strength calculation based on inclined sections of bent reinforced concrete elements uses the relationship in the development of the stress-strain state of beams under the action of load both in normal and inclined to the longitudinal axis of the section element up to destruction, obtained as a result of experimental and theoretical studies. This ensures a close match of experimental and calculated data, increases the reliability, durability and cost-effectiveness of structures during their operation.

**Keywords:** flexible elements, calculation method, inclined sections, concrete strength criteria, shear areas

**For citation:** Starishko I.N. Calculation of strength by inclined sections of bent reinforced concrete elements using a diagram of the dependence of stresses in longitudinal reinforcement on the value of the bending moment. Part 1. The state of the issue, the results of experiments and the main provisions of the proposed calculation methodology. *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2022; (7): 26–38. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-763-7-26-38.

**1. Введение.** 1.1. *Краткий анализ исследований, выполненных в России по рассматриваемой теме в последние годы.* В экспериментальной работе [1] была исследована прочность изгибаемых железобетонных элементов с продольной арматурой класса А500 при различных видах периодического профиля арматуры с разрушением балок по наклонным сечениям. Выявлены преимущества использования в изгибаемых железобетонных элементах арматуры класса А-500СП (серповидный четырехсторонний вид периодического профиля растянутой арматуры) по сравнению с арматурой класса А-500С (серповидный двухсторонний вид периодического профиля). Характер развития трещин на боковых поверхностях балок показывает их зависимость от длины зон среза. Часть продольной арматуры на приопорных участках балок для экономии стали в соответствии с эпюорой изгибающих моментов подвергалась обрыву. Следует отметить особенности развития трещин на нижней грани балок в зоне обрыва среднего (из трех) арматурного стержня.

Расположение трещин в виде елки с вершиной у конца обрываемого стержня и основанием в месте расположения сосредоточенной нагрузки, а также значительное раскрытие продольной трещины по продольной оси убедительно указывает на наличие раскалывающих усилий в этой зоне. Такой характер разрушения оказывается возможным даже при сильном поперечном армировании. Несомненно, образующиеся трещины способствуют освобождению от бетона концевых участков арматурных стержней обрываемых в зоне действия поперечных сил, и нарушению сцепления с ними в стадии разрушения балок. В процессе испытаний оказалось, что эффективность сцепления с бетоном профиля поверхности продольной арматуры активно влияет на сцепление стержней, обрываемых в зоне действия поперечных сил.

На основании выполненного эксперимента, с учетом установленных преимуществ, при использовании продольной арматуры, анализа образования и развития трещин автором статьи [1] разработаны рекомендации по анкеровке продольной арматуры.

В работе [2] для определения влияния внешней поперечной нагрузки на напряженное состояние изгибаемых железобетонных балок использована аналогия между аркой с затяжкой и траекторией главных сжимающих напряжений (арочный эффект). Справедливо отмечается, что одним из основных регуляторов надежности железобетонных элементов является расчетное значение сопротивления сдвигу бетона в наклонной трещине и даны предложения по решению указанной проблемы для балок без поперечной арматуры – по схеме арки с затяжкой. Однако в практике строительства балки без поперечной арматуры, как правило, не применяются (за исключением балок небольшой высоты ( $h \leq 15$  см)). Использование в расчетах поперечной арматуры вносит существенные корректизы и усложнения в методику расчета.

Следует заметить, что в [2] отсутствуют ссылки на исследования Г.Н.И. Кани [3], который является одним из первых авторов арочного метода расчета изгибаемых железобетонных балок по наклонным сечениям как с поперечной арматурой, так и без нее.

В экспериментальных исследованиях [4] установлено, что с повышением продольного обжатия балки ее реакция на поперечное динамическое воздействие увеличивается независимо от стадии работы податливых опор. При этом с ростом пластической составляющей деформирования опорных устройств в виде круглых цилиндров время сопротивления конструкций по наклонному сечению значительно увеличивается, т.е. динамическое деформирование по наклонным сечениям изгибаемых конструкций с продольным обжатием происходит более пластично. Борьба с хрупким разрушением изгибаемых железобетонных элементов по наклонным сечениям при действии нагрузки, особенно при проектировании балок мостовых сооружений, является одной из важнейших задач при их проектировании. Эта задача решена путем создания трехосного предварительного напряжения арматуры в изгибаемых железобетонных балках таврового профиля, что впервые выполнено в опытах автора данной статьи. Однако опыты проф. О.Г. Кумпяка [4] показали, что влияние хрупкого разрушения изгибаемых железобетонных элементов можно также несколько понизить за счет исследуемой им конструкции опорных частей. Полезно было бы продолжить вышеуказанные исследования, включая балки с большими длинами зон среза, что особенно

важно при проектировании балок мостовых сооружений, у которых длина зон среза постоянно меняется при движении транспортных средств. При этом желательно усилие обжатия балок перенести с центральной части поперечного сечения ближе к нижней растянутой грани, что в большей степени соответствовало бы реальным конструкциям разрезных предварительно напряженных изгибающихся железобетонных элементов.

В [5, 6] представлена серия испытаний железобетонных балок для проверки разработанного авторами нового метода расчета железобетонных балочных конструкций по наклонным сечениям. С целью проверки основных положений предлагаемой ими теории расчета проведены статические и динамические испытания изгибающихся железобетонных балок сечением  $b \times h = 25 \times 16$  см в средней части и  $b \times h = 18 \times 16$  см на приопорных участках. Продольная арматура балок – 2 Ø 12 класса А-I (A240). Консоли балок (приопорные участки) армировались хомутами Ø 6 мм с шагом 60 мм с каждой стороны. Для оценки влияния разворота усилий в продольной арматуре (авторы рассматривают это как альтернативу концепции сил зацепления) в каждой серии часть образцов армировали традиционным образом, т.е. продольная арматура на всем протяжении элемента находилась внутри бетона (образцы типа 1), в остальных элементах (образцы типа 2) продольная арматура на приопорных участках располагалась вне бетонного сечения. Это исключило возможность искривления стержней в зоне пересечения их наклонной трещиной, а также разворота усилий в арматуре и нагельного эффекта. В этих элементах, вместо бетона, совместная работа с арматурой обеспечивалась стальными полосами, приваренными к арматуре и утопленными в бетон. По изложенному частично материалу можно судить о недостатках как в экспериментах, так и в теоретической части:

- ширина поперечного сечения опытных образцов больше их высоты, поэтому в эксперименте это уже не балки, а плиты, и напряженное состояние в них в зоне действия поперечных сил при действии нагрузки отличается от балочного, но в практике строительства рекомендуемые отношения размеров поперечных сечений балок составляют  $b/h = 0,25 \div 0,5$ ;
- в экспериментальной части принята самая неэффективная для изгибающихся железобетонных балок продольная рабочая арматура из стали класса А-I (A-240) (круглая, гладкая с малой прочностью и большой площадкой текучести), рекомендации к применению которой в качестве несущей рабочей арматуры для балок в нормативных документах не существуют;
- при определении значения поперечной силы, воспринимаемой продольной арматурой, пересеченной наклонной трещиной (нагельного эффекта), нельзя приравнивать образцы типов 1 и 2, так как их конструктивные решения на приопорных участках существенно отличаются;
- в выводах по результатам статьи (пункт 4) авторы правильно указывают, что не удалось достаточно оценить влияние разворота арматуры из-за ограниченного числа опытов и малой длины зоны среза.

Имеются и другие причины, позволяющие оценить этот эксперимент как неудачный.

В [7] в процессе исследований образования и развития трещин в железобетонных конструкциях прямоугольного, квадратного и коробчатого сечений, находящихся под действием крутящего и изгибающего моментов, уста-

новлено, что разрушение конструкций из высокопрочного железобетона и фиброжелезобетона обычно происходит по единственной или одной из немногих трещин. Причем после образования трещин в конструкциях диапазон нагрузок от соответствующей начальной трещины до разрушающей для разных типов сечений был различным. В балках сплошного прямоугольного сечения из высокопрочного железобетона этот диапазон составлял 13–15 % от разрушающей нагрузки, в балках коробчатого сечения разрушение происходило при незначительном увеличении нагрузки после образования трещин. В балках из высокопрочного фиброжелезобетона диапазон был более значительным и составлял 39–41 % от разрушающей нагрузки.

Установлено, что при относительно большом количестве продольной арматуры по сравнению с поперечной, напряжение в ней в стадии III может не достигать предела текучести при разрушении сжатого бетона, в то время как напряжение в поперечной арматуре равно пределу текучести. Обратная картина может иметь место при большом количестве поперечной арматуры по сравнению с продольной. Разработана методика расчета ширины раскрытия пространственных трещин при изгибе с кручением, а также новая методика испытаний железобетонных конструкций квадратного и коробчатого сечений из обычного и высокопрочного бетона при действии крутящего и изгибающего моментов и получены новые экспериментальные данные о прочности по пространственным сечениям.

Однако в исследованиях не установлено, какую часть предельной нагрузки воспринимает продольная арматура, а какие части – поперечная и бетон сжатой зоны, что является основными факторами при исследовании прочности железобетонных элементов, работающих на изгиб с кручением. В экспериментальных исследованиях принята самая неэффективная продольная рабочая арматура из стали класса A240C Ø 10 мм; рекомендаций по применению ее как несущей рабочей арматуры в нормативных документах нет. В качестве поперечной арматуры приняты сварные каркасы из стержней Ø3-ВрI, несмотря на то что в элементах, работающих на изгиб с кручением, поперечная арматура должна применяться в виде замкнутых вязанных хомутов, а при применении сварных каркасов необходимо использовать мероприятия, обеспечивающие равнопрочность в местах ее соединения с продольной и поперечной арматурой за пределами соединения, которые в опытах отсутствуют. При этом диаметр поперечной арматуры (хомутов) в вязанных каркасах должен быть не менее 6 мм.

В 1974–1975 гг. в лаборатории теории железобетона под руководством А.А. Гвоздева выполнялись оценки фактического запаса прочности, который получается при расчетах изгибаемых железобетонных элементов по наклонным к продольной оси сечениям по новым, только что утвержденным, нормативным документам СНиП 2.03.01–84 (руководитель А.С. Залесов), а также при расчетах изгибаемых железобетонных элементов по нормальным сечениям (руководитель Ю.П. Гущ).

Оказалось, что при расчетах изгибаемых железобетонных элементов по наклонным сечениям запас прочности в среднем составляет 1,6, запас прочности при расчетах по нормальным сечениям в среднем составляет 1,4. Практически получены очень важные данные, которые подтверждают реальную работу изгибаемых железобетонных элементов, где образование и развитие

наклонных трещин является более опасным и непредсказуемым, поэтому коэффициент надежности в расчетах прочности по наклонным сечениям в сравнении с расчетами прочности по нормальным к продольной оси сечениям оказался больше, что повышает надежность при их эксплуатации.

Позже, в 1989 г., этот фактор в расчетах прочности по наклонным сечениям был проверен и подтвержден О.Г. Кумпяком [8]. На основе регрессионного анализа несущей способности балок по наклонным сечениям выявлен запас прочности, составляющий примерно 1,5–1,8. Автором также предложена двухфакторная модель, которая позволяет получать одинаковую надежность во всем диапазоне несущей способности конструкций по наклонным сечениям.

1.2. *Обзор некоторых исследований по теме статьи, проводимых в Европе и США в последние годы.* В источниках [9–11] рассмотрены многочисленные факторы, влияющие на образование и развитие наклонных трещин в изгибающихся железобетонных элементах, и показано, что их прочность зависит от геометрии трещин и кинематики. В экспериментальной части исследований установлено, что вертикальные части критической наклонной трещины воспринимают значительную долю сдвиговых сил, а также оценено влияние ряда других факторов. Часть опытных образцов подвергалась действию равномерно распределенной нагрузки, а другие образцы загружались сосредоточенными силами. Испытания проводились на высоком научно-техническом уровне благодаря фотометрии с использованием камер, изображение которых анализировали с помощью соответствующего программного обеспечения. Геометрия опытных образцов (размеры поперечного сечения, армирование и другие факторы) отвечала реальным конструкциям, используемым в строительной индустрии. Испытания проводились с целью получения уточненных данных по образованию и развитию наклонных к продольной оси элементов трещин и кинематики процесса разрушения изгибающихся железобетонных элементов.

Однако сами авторы вышеуказанных работ отмечают большую сложность выявления уникального действия сдвигопередачи, определяющего прочность на сдвиге при влиянии многочисленных факторов. При этом в названных ранее работах [9–11] не приводится методика расчета прочности изгибающихся железобетонных элементов на сдвиг. В выполненных экспериментах недостаточно исследовано влияние поперечной арматуры, которая существенно сказывается на кинематике разрушений изгибающихся элементов. Отсутствует количественная оценка действия сил зацепления шероховатой поверхности берегов в наклонной трещине и нагельного эффекта в продольной арматуре, пересеченной наклонной трещиной, на сдвиговую прочность в зоне действия поперечных сил. Тем не менее анализ, основанный на опытных моделях, учитывающих фактическую картину образования и развития наклонных трещин и кинематику разрушения, может иметь существенное значение при разработке расчетной модели изгибающихся железобетонных элементов по наклонным сечениям, что способствует обеспечению прочности, надежности в эксплуатации и долговечности исследуемых конструкций.

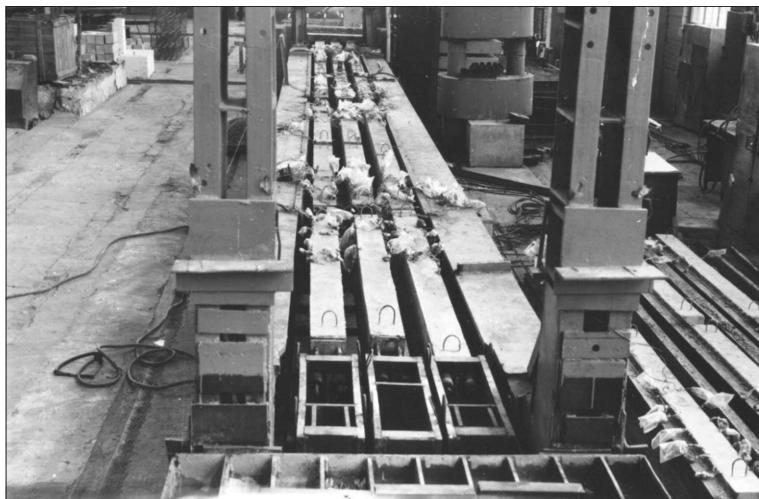
1.3. Для более полного установления влияния основных факторов на напряженно-деформированное состояние элементов при действии нагрузки

и на их несущую способность, особенно в зоне совместного действия изгибающих моментов и максимальных поперечных сил, автором статьи проведены начиная с 1973 г. вначале в НИИЖБе г. Москва, затем в Вологодском государственном техническом университете обширные экспериментальные исследования, в ходе которых испытано свыше 500 изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов.

Цель исследований – на основе полученных экспериментальных данных усовершенствовать существующую методику расчета изгибаемых железобетонных элементов по наклонным сечениям.

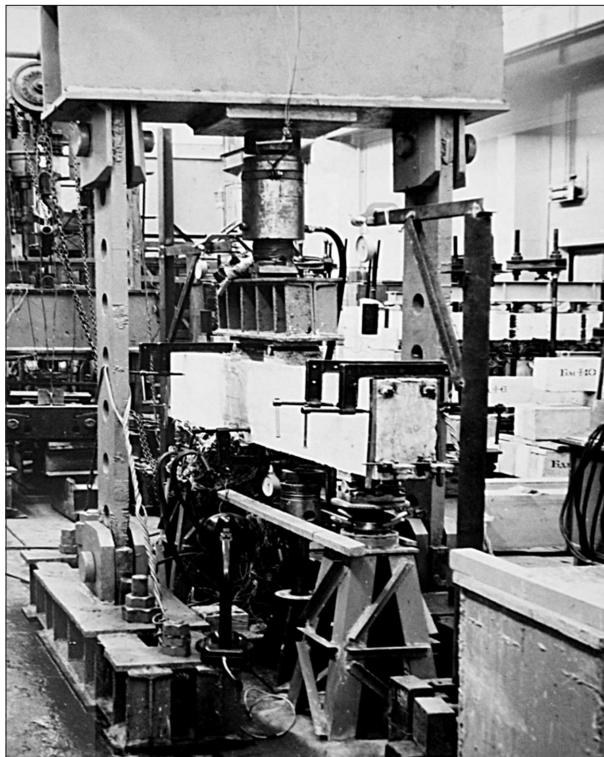
**2. Материалы и методы исследований.** Для проведения указанных выше исследований в НИИЖБе были изготовлены предварительно напряженные балки и балки без преднапряжения сечением 15×30 см, кубиковая прочность бетона 45–55 МПа. Напрягаемая, а в некоторых балках ненапрягаемая продольная арматура: нижняя 2Ø18Ат-V, верхняя 2Ø10Ат-VI, поперечная 2Ø6 А-I с шагом замкнутых поперечных стержней (хомутов) в полупролетах: сильное поперечное армирование – 5 см с одной стороны балки и 10 см с другой; среднее поперечное армирование – 15 см с одной стороны балки и 20 см с другой; слабое поперечное армирование – 20 см с одной стороны балки, а с другой стороны балки поперечная арматура отсутствовала. Натяжение продольной арматуры выполнялось на длинном стенде, состоящем из трех линий (рис. 1).

Каждая серия опытных образцов, состоящая из шести балок, изготавливались на отдельной линии стенда, что позволило во всех образцах иметь одинаковое предварительное напряжение арматуры, прочность бетона, условия его твердения и другие характеристики. Балки испытывали на домкратной установке двумя симметрично расположенными относительно середины пролета силами (рис. 2). После разрушения балок на разрушенную часть с од-



*Рис. 1. Общий вид предварительно напряженных балок, расположенных на стенде, и балок без предварительного напряжения, расположенных за пределами стенда (справа)*

*Fig. 1. General view of prestressed beams located on the stand and beams without pre-stressing located outside the stand (on the right side)*



*Рис. 2. Общий вид установки для испытаний балок, проводимых автором статьи в лаборатории № 1 НИИЖБа (г. Москва)*

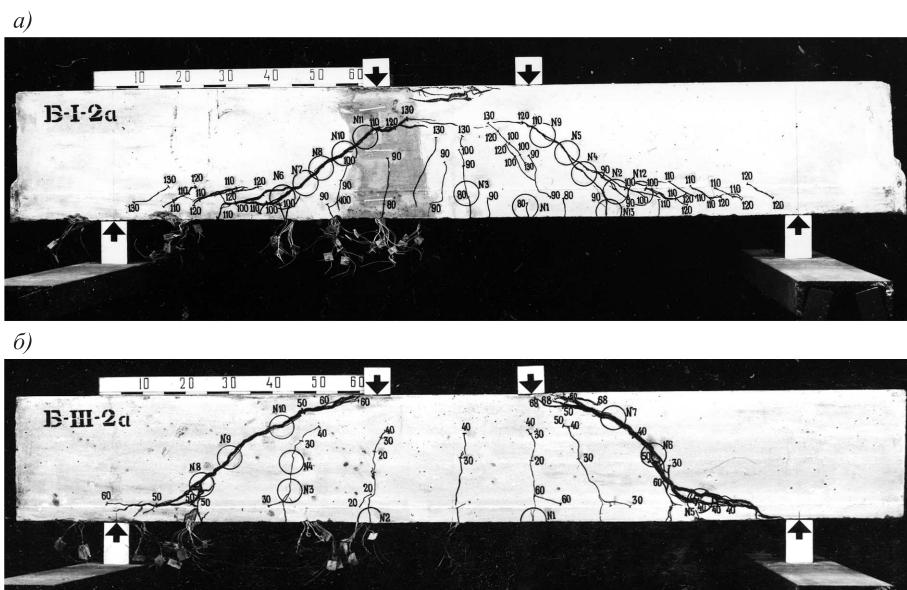
*Fig. 2. General view of the installation for testing beams carried out by the author of the article in the laboratory No. 1 NIIZhB (Moscow)*

ной стороны надевали бандаж и доводили до разрушения вторую ее половину. На основании экспериментальных исследований автора (1973–1976 гг. и далее вплоть до 1984 г.) в России, в СНиП 2.03.01–84 впервые начали учитывать влияние предварительного напряжения продольной арматуры, расположенной в растянутой от действия нагрузки зоне бетона, на прочность наклонных сечений.

Испытания показали, что высота сжатой зоны бетона над наклонными трещинами с повышением предварительного напряжения возрастает, т.е. в предварительно напряженных балках высота сжатой зоны бетона, а следовательно, и несущая способность по наклонным сечениям больше по сравнению с аналогичными балками без предварительного напряжения (рис. 3).

Результаты исследований прочности по наклонным сечениям изгибаемых предварительно напряженных железобетонных элементов, а также элементов без предварительного напряжения изложены в [12–15]. Методика расчета прочности наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов, излагаемая в статье, основана на более общем подходе:

– уравнения равновесия моментов, продольных и поперечных сил в наклонном сечении решаются совместно [12];



*Рис. 3. Разрушение опытных изгибаемых железобетонных балок  
а – с предварительным напряжением продольной арматуры (балка Б-I-2а); б – без предварительного напряжения (балка Б-III-2а)*

*Fig. 3. Destruction of experimental bent reinforced concrete beams  
a – with prestressing of the longitudinal reinforcement (beam B-I-2a); b – without prestressing (beam B-III-2a)*

– прочность бетона сжатой зоны оценивается с учетом распределения нормальных и касательных напряжений и критерия прочности бетона при плоском напряженном состоянии;

– совместно рассматриваются условия развития наклонной трещины и разрушения бетона над ней и другие факторы.

Условием образования и последующего развития критической наклонной трещины в изгибающихся железобетонных предварительно напряженных элементах, а также в элементах без предварительного напряжения является достижение нормальными и касательными напряжениями над ее вершиной критерия прочности бетона при плоском напряженном состоянии. Имеется большое количество предложений для записи критерия, основанных на различных теориях прочности и результатах испытаний опытных образцов. Установлены критерии прочности бетона при плоском напряженном состоянии в координатах главных напряжений в областях сжатия-растяжения (рис. 4, а), а также критерий прочности в координатах нормальных и касательных напряжений (рис. 4, б). Так как критерий прочности бетона в координатах главных сжимающих и главных растягивающих напряжений существенно зависит от прочности бетона на сжатие и величины напряжений, то в дальнейших расчетах принят критерий прочности бетона в координатах нормальных и касательных напряжений (очевидно, что бетон, находящийся над наклонной трещиной, при действии нагрузки разрушается от совместного действия напряжений среза  $\tau_{xy}$  и напряжений сжатия  $\sigma_x$ ).

**3. Результаты и обсуждение.** Благодаря целенаправленным экспериментальным исследованиям прочности изгибающихся железобетонных элемен-

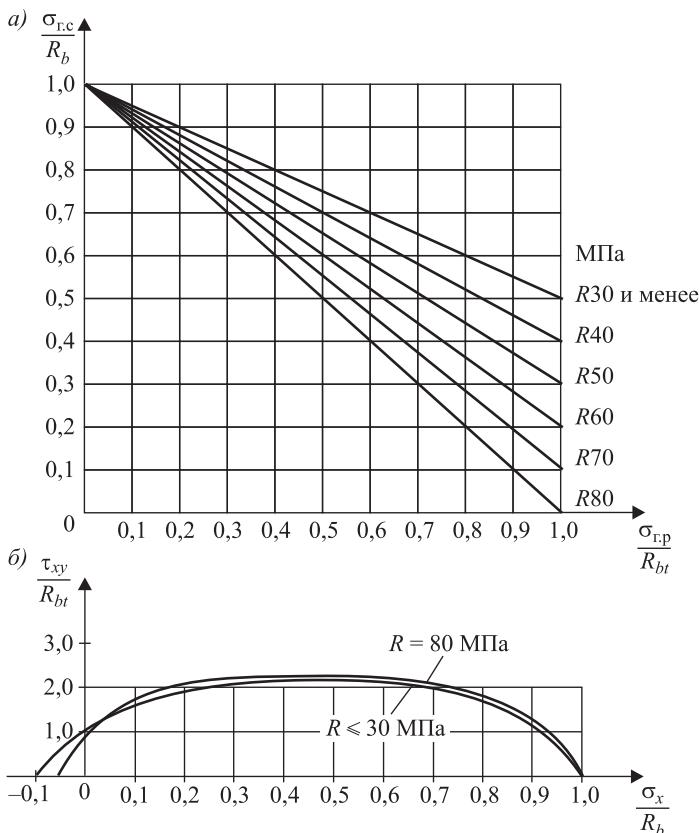


Рис. 4. Критерии прочности бетона при плоском напряженном состоянии в координатах напряжений  $\sigma_{r,p}\sigma_{r,c}$  (а) и  $\sigma_x\tau_{xy}$  (б)

Fig. 4. Criteria for the strength of concrete under flat stress in the stress coordinates  $\sigma_{r,p}\sigma_{r,c}$  (a) and  $\sigma_x\tau_{xy}$  (b)

тов по наклонным сечениям получен ряд данных, важных для развития теории и совершенствования методов расчета железобетонных конструкций. Это относится к влиянию величины предварительного напряжения продольной арматуры на прочность наклонных сечений в зависимости от количества поперечной арматуры, а также к влиянию количества поперечной арматуры в зависимости от усилия обжатия бетона напрягаемой арматурой [12–15]. Установлены значения вертикальной составляющей влияния сил зацепления шерховатой поверхности берегов при смещении блоков по критической наклонной трещине в предельном состоянии элементов, а также нагельного эффекта в продольной растянутой арматуре, пересеченной наклонной трещиной [15]; оценка влияния свесов сжатых полок на прочность наклонных сечений приводится в [13, 14]; граничные (наиболее экономически эффективные) значения количества поперечной арматуры для предварительно напряженных балок и балок без предварительного напряжения также представлены в [15]; установлено влияние и других факторов на прочность изгибаемых железобетонных элементов по наклонным сечениям [12–15].

По результатам исследований сделан вывод о целесообразности совершенствования методики расчета прочности изгибаемых железобетонных

элементов по наклонным сечениям, заложенной в нормативных документах, с учетом влияния всех основных факторов.

**Заключение.** Испытание большого количества опытных балок, применение совершенной установки для изготовления этих балок с различной величиной предварительного напряжения продольной арматуры, использование специальной установки для их испытания, а также большого количества тензодатчиков и других измерительных приборов позволило получить подробную картину напряженно-деформированного состояния в зоне совместного действия изгибающих моментов и максимальных поперечных сил (на при опорных участках балок), что является главным ориентиром при разработке методики расчета прочности изгибаемых железобетонных элементов по наклонным сечениям.

Предварительное напряжение продольной арматуры в изгибаемых железобетонных элементах меняет траекторию главных сжимающих напряжений, что приводит к увеличению высоты сжатой зоны бетона над наклонной трещиной, а следовательно, и прочность по наклонным сечениям в них существенно повышается.

### **Список источников**

1. Тихонов И.Н., Саврасов И.П. Экспериментальные исследования предельных состояний железобетонных балок с арматурой класса прочности 500 МПа // Жил. стр.-во. 2010. № 8. С. 31–38.
2. Краснощеков Ю.В. Расчетная модель сопротивления поперечной силе железобетонных изгибаемых элементов // Вестн. СиБАДИ. Строительство и архитектура. 2019. № 2. С. 182–192.
3. Kani G.N.S. A rational theory for the function of web reinforcement // SACI proc. 1969. Vol. 66, no. 3. P. 185–196.
4. Кумпяк О.Г., Мещулов Н.В. Прочность сжато-изгибаемых железобетонных конструкций по наклонным сечениям на податливых опорах при динамическом нагружении // Вестн. Том. гос. архитектурно-строительного ун-та. 2014. № 6. С. 70–80.
5. Жарницкий В.И., Беликов А.А., Курнавина С.О. Экспериментальные исследования сопротивления железобетонных балок перерезывающей силе // Пром. и гражд. стр.-во. 2011. № 3. С. 18–20.
6. Жарницкий В.И. Прочность железобетонных конструкций по сечениям, совпадающим с фактическим полем направления трещин (теория и эксперимент) // Науч. тр. III Всерос. (П Междунар.) конф. по бетону и железобетону. М., 2014. Т. 1. С. 27–38.
7. Демьянов А.И. Сложное сопротивление железобетонных конструкций при изгибе с кручением: Автореф. дис. .... д-ра техн. наук. Курск, 2021. 49 с.
8. Кумпяк О.Г. Регрессионный анализ несущей способности железобетонных балок по наклонным сечениям // Бетон и железобетон. 1989. № 6. С. 32–34.
9. Cavagnis F., Fernández Ruiz M., Muttoni A. Shear failures in reinforced concrete members without transverse reinforcement: An analysis of the critical shear crack development on the basis of test results // Engineering structures. 2015. Vol. 103. P. 157–173.
10. Yang Y., Walraven J., Joop den Uijl. Shear behavior of reinforced concrete beams without transverse reinforcement based on critical shear displacement // Journal of Structural Engineering. 2016. Vol. 143, no. 1. P. 04016146.

11. *Mohammed A.O.I.* Experimental studies of strength inclined sections bent elements from autoclaved aerated concrete // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2021. Vol. 1079. Ch. 1. P. 022062.
12. *Старышко И.Н., Залесов А.С., Сигалов Э.Е.* Несущая способность по наклонным сечениям предварительно-напряженных изгибающихся железобетонных элементов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1976. № 4. С. 21–26.
13. *Starishko I.N.* Influence of the main factors on the bearing capacity of bent reinforced concrete elements in inclined sections obtained on the basis of experimental studies // Process Management and Scientific development. Birmingham, 2021. P. 140–150.
14. *Starishko I.N.* The state of the existing calculation methods and the factors affecting the strength of bent reinforced concrete elements along inclined sections // Science Education Practice. Toronto, 2021. P. 54–66.
15. *Старышко И.Н.* Напряженно-деформированное состояние и несущая способность изгибающихся предварительно напряженных железобетонных элементов на припорных участках // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1990. № 5. С. 116–120.

### References

1. *Tikhonov I.N., Savrasov I.P.* Experimental studies of the limiting states of reinforced concrete beams with a strength of 500 MPa strength. *Zhilishchnoye stroitel'stvo = Housing construction*. 2010; (8): 31–38. (In Russ.).
2. *Krasnoshchekov Yu.V.* Calculated model of the transverse strength resistance of reinforced concrete bending elements. *Vestnik SibADI. Stroitel'stvo i arkhitektura = SibADI Bulletin. Construction and architecture*. 2019; (2): 182–192. (In Russ.).
3. *Kani G.N.S.* A rational theory for the function of reinforcement. *SACI prok*. 1969; 66(3): 185–196.
4. *Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V.* Strength of compressed-flexed reinforced concrete structures in inclined sections on malleable supports under dynamic loading. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Construction*. 2014; (6): 70–80. (In Russ.).
5. *Zharnitskiy V.I., Belikov A.A., Kurnavina S.O.* Experimental study of resistance of reinforced concrete beams to the shear force. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo = Industrial and civil engineering*. 2011; (3): 18–20. (In Russ.).
6. *Zharnitskiy V.I.* Strength of reinforced concrete structures by sections coinciding with the actual field of crack direction (theory and experiment). Scientific works of the III All-Russian (II International) Conference on Concrete and reinforced concrete. Moscow, 2014. Vol. 1. P. 27–38. (In Russ.).
7. *Demyanov A.I.* Complex resistance of reinforced concrete structures during bending with torsion: Abstract of the diss. ... DSc. Kursk, 2021. 49 p. (In Russ.).
8. *Kumpyak O.G.* Regressive analysis of the bearing capacity of reinforced concrete beams in inclined sections. *Beton i zhelezobeton = Concrete and reinforced concrete*. 1989; (6): 32–34. (In Russ.).
9. *Cavagnis F., Fernández Ruiz M., Muttoni A.* Shear failures in reinforced concrete members without transverse reinforcement: An analysis of the critical shear crack development on the basis of test results. *Engineering structures*. 2015; 103: 157–173.
10. *Yang Y., Walraven J., Joop den Uijl.* Shear behavior of reinforced concrete beams without transverse reinforcement based on critical shear displacement. *Journal of Structural Engineering*. 2016; 143(1): 04016146.
11. *Mohammed A.O.I.* Experimental studies of strength inclined sections bent elements from autoclaved aerated concrete. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2021; 1079: 022062.

12. Starishko I.N., Zalesov A.S., Sigalov E.E. The load-carrying capacity along inclined sections of pre-stressed bending reinforced concrete elements. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura = News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture.* 1976; (4): 21–26. (In Russ.).
13. Starishko I.N. Influence of the main factors on the bearing capacity of bent reinforced concrete elements in inclined sections obtained on the basis of experimental studies. Process Management and Scientific development. Birmingham, 2021. P. 140–150.
14. Starishko I.N. The state of the existing calculation methods and the factors affecting the strength of bent reinforced concrete elements along inclined sections. Science Education Practice. Toronto, 2021. P. 54–66.
15. Starishko I.N. Stress-strain state and load-bearing the ability of bent prestressed reinforced concrete elements on supporting sections. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura = News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture.* 1990; (5): 116–120. (In Russ.).

**Информация об авторе**

**И.Н. Старишко** – кандидат технических наук, доцент, starishkoi@mail.ru

**Information about the author**

**I.N. Starishko** – PhD, Ass. Professor, starishkoi@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19.05.2022

The article was submitted 19.05.2022

Одобрена после рецензирования 20.06.2022

Approved after reviewing 20.06.2022

Принята к публикации 27.06.2022

Accepted for publication 27.06.2022

---