

УДК 624

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПО ОБРАЗОВАНИЮ НАКЛОННЫХ ТРЕЩИН

О.М. Убайдуллоев

*Самаркандский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Самарканд (Республика Узбекистан)*

Аннотация. В статье освещаются результаты анализа характера изменения эпюры нормальных напряжений σ с удалением наклонного сечения от опоры предварительно напряженной железобетонной балки перед образованием трещин. В частности, освещаются результаты исследований, которые можно рекомендовать в практике проектирования и для дальнейших научных проработок при создании методики расчета трещиностойкости наклонных сечений железобетонных тонкостенных балок при действии поперечных сил. Кроме того, исследование затрагивает влияние различных факторов, таких как степень предварительного напряжения и геометрические параметры балки, на распределение нормальных напряжений. В работе также рассматриваются перспективы применения полученных данных в оптимизации конструкций и разработке новых методик расчетов на прочность. Анализ выявил тенденции, которые позволяют глубже понять поведение нормальных напряжений в наклонных сечениях до начала трещинообразования. Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований, направленных на повышение надежности и долговечности железобетонных конструкций.

Ключевые слова: железобетонные балки, нормальные напряжения, касательные напряжения, предварительно напряженные балки, напряженное состояние, наклонное сечение, наклонные трещины, тонкостенные конструкции.

Ссылка для цитирования: Убайдуллоев О.М. Усовершенствование метода расчета железобетонных балок по образованию наклонных трещин // Инженерные исследования. 2024. №4(19). С. 31-38. EDN: SXOZWG

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF CALCULATING REINFORCED CONCRETE BEAMS FOR THE FORMATION OF INCLINED CRACKS

O.M. Ubaydulloyev

Samarkand State Architecture and Construction University, Samarkand (Republic of Uzbekistan)

Abstract. The article highlights the results of the analysis of the nature of the change in the normal stress diagram σ with the removal of the inclined section from the support of a prestressed reinforced concrete beam before the formation of cracks. The research findings are particularly emphasized as recommendations for design practice and future scientific studies in developing a methodology for calculating the crack resistance of inclined sections in reinforced concrete thin-walled beams subjected to transverse forces. In addition, the study addresses the influence of various factors, such as the degree of prestressing and the geometric parameters of the beam, on the distribution of normal stresses. The paper also discusses the prospects of using the obtained data in optimizing structures and developing new methods of strength calculations. The analysis revealed trends that allow a deeper understanding of the behavior of normal stresses in inclined sections before the onset of cracking. The results obtained can serve as a basis for further research aimed at improving the reliability and durability of reinforced concrete structures.

Keywords: reinforced concrete beams, normal stresses, tangential stresses, prestressed beams, stressed condition, inclined section, inclined cracks, thin-walled structures.

For citation: Ubaydulloyev O.M. Improvement of the method of calculating reinforced concrete beams for the formation of inclined cracks // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2024. No.4(19). Pp. 31-38. EDN: SXOZWG

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время проблема трещиностойкости и жесткости в теории железобетона стала более актуальной. Это связано с общей тенденцией к использованию более прочных бетонов, высокопрочных сталей и композитной арматуры в условиях рыночной экономики. Уточняются методы проектирования и способы расчета, а также совершенствуются и меняются нормы проектирования, обслуживая насущные вопросы практики строительства. Однако опыт проектирования железобетонных конструкций при воздействии поперечных сил и вопросы их расчета недостаточно освещены в нормативной и научно-технической литературе. Это связано, главным образом, с разнообразием специфических задач, возникающих при проектировании, а также с нехваткой достоверных исследований по воздействию поперечных сил.

Так как, опыты и наблюдения за эксплуатируемыми в реальных условиях конструкциями, особенно изготовленных из предварительно напряженного железобетона (таврового, двутаврового, коробчатого сечения и т. д.), свидетельствуют о значительных отклонениях расчетных данных от опытных. Это в одних случаях приводит к излишнему расходу материалов, а в других случаях с появлением наклонных трещин раньше нормальных, особенно в приопорных зонах, приводит к недостаточной надежности и безопасности конструкций. Так как, момент образования трещин – одно из важнейших контрольных характеристик железобетонных конструкций и их долговечности [1-17].

Как это ни парадоксально, вышеизложенные вопросы в области теории расчета и конструирования железобетонных конструкций, в частности изучение форм разрушения приопорных зон элементов в расчетах на трещиностойкость наклонных сечений при воздействии поперечных сил, остается недостаточно завершённым, как в нашей стране, так и за рубежом [2-51].

К настоящему времени накоплен значительный экспериментальный материал по изучению трещиностойкости наклонных сечений при действии поперечной силы и изгибающего момента предварительно напряженных железобетонных балок, но по-прежнему остается нерешенным вопрос объединения этих знаний под общей идеей закономерностей напряженно-деформированное состояния в момент образования трещин в наклонном сечении элементов.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Изучение и анализ ранее выполненных теоретических и экспериментальных данных по этой теме [1-20, 23, 24, 32-51], позволило представить общую картину образования, раскрытия наклонных трещин и характера разрушения элементов при действии поперечных сил. Исходя из заложенного принципа, вопрос образование наклонных к продольной оси элемента трещин, нашел отражение во многих нормативных документах ряда зарубежных стран и странах СНГ, в том числе в отечественных нормах проектирования ШНК 2.03.01-24 «Бетонные и железобетонные конструкции»¹. Расчет момента образования трещин в наклонных сечениях по-прежнему выполняется методом «по допускаемым напряжениям», который обычно называется «классической теорией». И этот подход можно считать условным, поскольку особенно в подобных случаях заметны недостатки этого метода. Данная методика не позволяет проектировать конструкции или элементы с заранее заданным коэффициентом запаса, и не предоставляет возможность определять истинные значения напряжений в арматуре и бетоне. Это особенно важно при внедрении новых видов бетона (высокопрочного, легкого и др.) и высокопрочных сталей в строительную практику.

Также при расчете по методике ШНК 2.03.01-24, часто не учитывается действительное напряженное состояние, возникающее в железобетонном изгибаемом элементе при нагружении в условиях сложного напряженного состояния, которое изменяется вследствие проявления неупругих деформаций в бетоне перед появлением трещин, что трудно поддается оценке. В связи с этим проверка σ_{mi} производится на уровне нейтральной оси, в то время как растягивающие напряжения, возникающие в точках, расположенных ниже оси, могут иметь значительно большую величину, так как с ростом нагрузки погашение сжимающих напряжений в этих точках происходит быстрее. Кроме того, и не учитываются пластические деформации бетона в растянутой зоне, возникающие перед появлением наклонных трещин. Особенно не соответствуют опытным данным результаты расчета предварительно напряженных железобетонных балок, в которых наклонные трещины могут появляться значительно раньше или позже, чем это предусмотрено расчетом по нормам [11, 32, 38].

¹ ШНК 2.03.01-24. Бетонные и железобетонные конструкции. [Электронный ресурс]. - URL: https://mc.uz/uploads/mcuz_58477596287859.pdf (дата обращения: 1.11.2024)

Также не в полной мере изучены основные факторы, влияющие на трещиностойкость элементов по наклонным сечениям на основе физической сущности сопротивления железобетона действию поперечной силы, так как на практике в большинстве случаев расчеты ограничиваются проверкой отдельно нормальных и касательных напряжений. Иногда наиболее напряжёнными оказываются промежуточные волокна наклонных сечений, в которых возникают как одни, так и другие виды напряжений. Например, для двутаврового сечения характерна очертающая эпюра нормальных напряжений, аналогичная по форме эпюре для прямоугольного сечения [11, 30]. В то же время касательные напряжения в двутавре значительно больше из-за малой толщины его стенки. Сочетание этих главных растягивающих напряжений σ_{mt} (σ_{bt} , τ) свидетельствует о том, что железобетон находится в условиях плоского напряженного состояния и необходима проверка напряжений как для напряженного состояния в стадии Ia, так и для определения поперечной силы Q_{cr} с аналогичным подходом, как при расчете по образованию нормальных трещин в железобетонном элементе. Проблема еще недостаточно изучена и задачи этого раздела теории железобетона еще далеки от своего решения.

Это во многом объясняется в статье А.С. Залесова, Т.А. Мухамадиева [4]: - «К сожалению, физические соотношения, связывающие поперечные силы и поперечные деформации железобетонных элементов, и соответствующие расчетные деформационные модели в достаточно приемлемом виде до настоящего времени еще не разработаны и не представляется возможным оценить перспективу...».

Хотя, значительно более важным является разработка предложенного Л.В. Кузнецовым [32], метода решения задач в упругой постановке при действии кратковременных нагрузок, когда не проводится проверка $\sigma_{mt/mc}$. В этом методе учитываются пластические деформации бетона растянутой зоны, возникающие перед появлением трещин в наклонном сечении, которые увеличивают трещиностойкость наклонных сечений балок (введением в расчет эмпирического коэффициента в точке К), в частности в предварительно напряженных балках прямоугольного сечения.

Основываясь на работе Л.В. Кузнецова [32] пришли к выводу, что этот метод может быть с успехом использован на основании дальнейшего развития методики расчета трещиностойкости наклонных сечений при действии поперечных сил с учетом неупругих деформаций растянутого бетона.

Не существует формул, которые обеспечивали бы большую точность расчета, чем предлагаемая в нормах формула для трещиностойкости наклонных сечений, учитывающая действительное напряженное состояние в наклонном сечении до появления трещин и позволяющая принять во внимание неупругие свойства и характеристики бетона в условиях плоского напряженного состояния. Также были проанализированы результаты численного метода расчета на основе формул теории сопротивления упругих материалов на основании предпосылок работы железобетона как упругого (хрупкого) материала и изучены механизмы распределения и перераспределения напряжений в наклонных сечениях перед образованием трещин, в частности, в предварительно напряженных железобетонных балках, по принципу подхода к расчету по образованию нормальных трещин. Решение этой задачи наталкивается на большие математические трудности, при этом учет второстепенных факторов приводит к ненужным осложнениям, а пренебрежения главными факторами просто недопустимо [1-20, 23, 24, 32-51].

Чтобы выявить теоретическую модель расчета трещиностойкости наклонных сечений, следует представить общую картину влияния отдельных факторов на образование наклонных трещин в предварительно напряженной балке. С этой целью была рассмотрена балка, нагруженная неподвижными сосредоточенными нагрузками F и продольной силой обжатия P . Для ненапряженной обычно армированной балки продольную силу обжатия рассматриваем как $P = 0$, что является частным случаем предварительно напряженного железобетона. Вследствие симметрии нагрузки, достаточно рассмотреть половину балки (например, левую, см. рис 1а).

Несмотря на небольшой процент продольной арматуры в сечениях (при $0,008A \geq \sum A_s$), геометрические характеристики (A_{red} , S_{red} , I_{red}) приведенного сечения определяется с учетом продольной арматуры. Предварительное обжатие рассматриваем как внешнюю силу P , приложенную с эксцентриситетом e_0 относительно нейтральной оси.

В дальнейшем изложении будем предполагать, что зависимость между усилием и деформацией, справедлива для балки, для ее частей и для какого-либо сечения. Эта зависимость также принимается линейной вплоть до момента образования наклонных трещин, а поперечные сечения балок и плоские деформации, считаются плоскими после деформации при изгибе. Хотя этот этап обычно не поддается математическому описанию. Эти предпосылки позволяют упростить наши рассуждения.

Предположим, что статическая нагрузка F возрастает от 0 до Q_{cr} таким образом, что не оказывает на балку никаких динамических воздействий. Это предположение сохранит силу и во всех последующих рассуждениях, если не будет сделано оговорки. После приложения небольшого значения силы F в

отдельных сечениях балки бетон начинает работать упруго. При этом поперечная сила между опорой и грузом постоянная и равна опорной реакции балки $R = Q = \text{const}$.

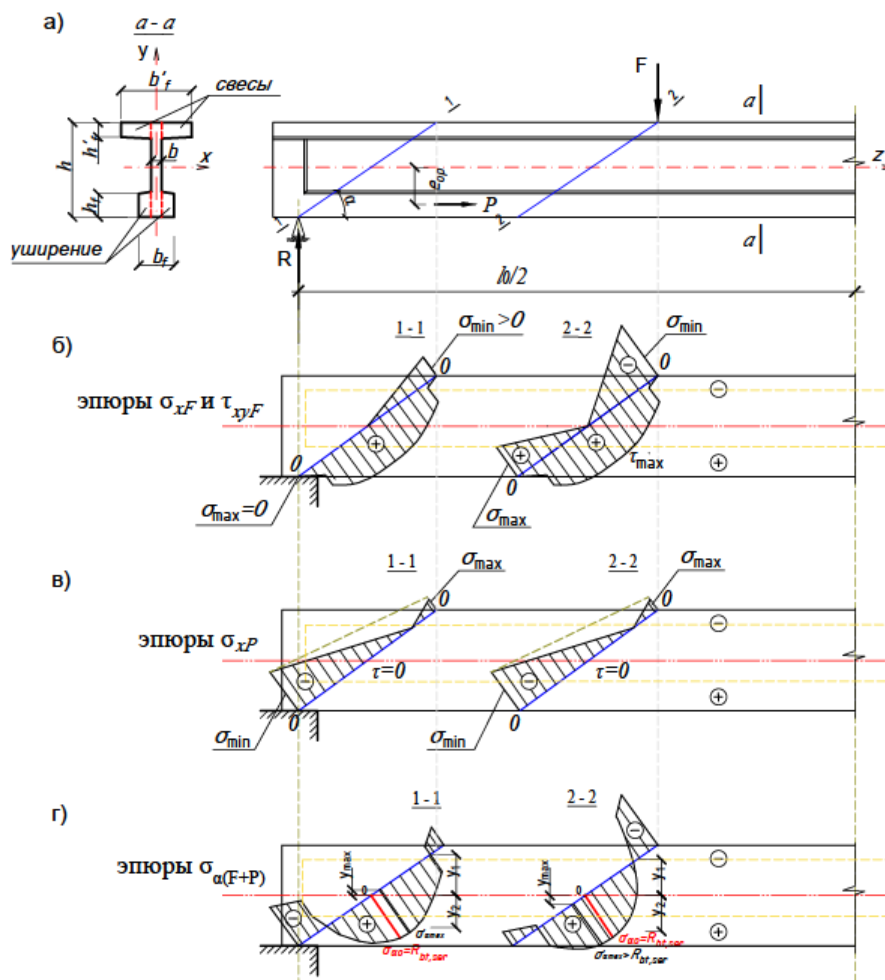


Рис. 1. Схемы изменения характера эпюры нормальных напряжений σ_α с удалением наклонного сечения от опоры предварительно напряженной балки: а) расчетное сечение балки; б) эпюра σ_{xF} и τ_{xyF} от внешней нагрузки; в) эпюра σ_{xP} от продольной силы предварительного обжатия; г) суммарная эпюра $\sigma_{\alpha(F+P)}$.

Fig. 1. Schemes for changing the nature of the normal stress diagram σ_α with the removal of the inclined section from the support of the prestressed beam: а) the calculated cross section of the beam; б) the plot σ_{xF} and τ_{xyF} from the external load; в) the plot σ_{xP} from the longitudinal force of the pre-compression; г) the total plot $\sigma_{\alpha(F+P)}$.

При дальнейшем возрастании нагрузки F на определенных этапах, первые наклонные трещины могут появляться до образования нормальных трещин на участках $M < M_{\text{срс}}$ и $Q > Q_{\text{срс}}$. Они появляются, обычно в нейтральной зоне по высоте сечения в тонкостенных элементах, в результате роста главных растягивающих напряжений σ_{mt} (σ_{bt} , τ) в бетоне. В зоне действия максимальных поперечных сил и минимальных изгибающих моментов, трещины с увеличением нагрузки развиваются в направлении нагрузки. А в предварительно напряженных балках можно увидеть, что трещины развиваются намного интенсивнее в сторону опоры [11, 24, 32].

Для изучения напряжений, действующих в любой точке наклонного сечения, и угла наклона главных площадок для рассматриваемого случая, использованы формулы теории сопротивления упругих материалов [21, 22, 25]:

$$\sigma_\alpha = \sigma_x \sin^2 \alpha + \sigma_y \cos^2 \alpha + 2\tau_{xy} \sin \alpha \cos \alpha \quad (1)$$

где σ_α – нормальные напряжения в бетоне по наклонным площадкам, относительно продольной оси балки; σ_x , σ_y и τ_{xy} – те же напряжения в бетоне по площадкам, нормальным к продольной оси балки, от сил предварительного обжатия (σ_{xP}) и от внешней нагрузки (σ_{xF}); α – угол наклона площадки к оси балки. В предварительно напряженных балках с прямолинейной стержневой напрягаемой арматурой, напряжения σ_y от предварительного напряжения и внешней нагрузки принимали равными нулю.

Напряжения σ_{xF} от внешнего изгибающего момента (рис. 1, б):

$$\sigma_{xF} = -\frac{M}{I} y = -\frac{Q(a_n + x)}{I_{red}} y = -\frac{Q(a_n + y \operatorname{ctg} \alpha)}{I_{red}} y \quad (2)$$

Напряжения τ_{xyF} от внешней поперечной силы для любого сечения (рис. 1, б):

$$\tau_{xyF} = \frac{Q}{I_{red}} \frac{S(y)}{b(y)} \quad (3)$$

Величину σ_{xP} выразим через напряжения, возникающие в вертикальном сечении балки от предварительного обжатия P и обозначим (рис. 1, в):

$$\sigma_{xP} = -\frac{P}{A_{red}} \left[1 - \frac{e_{op}}{r^2} y \right] \quad (4)$$

При совместном действии внешней нагрузки F (рис. 1, б), продольной силы P (рис. 1, в) и предварительного обжатия σ_{sp} с учетом их значений формул (2), (3), (4) для определения напряжений σ_α в любой точке наклонного сечения, формулу (1) можно записать следующем виде (рис. 1, г):

$$\sigma_{\alpha(F+P)} = -\frac{Q}{I_{red}} \left[a_n y \sin^2 \alpha + \left(\frac{y^2}{2} - \frac{S(z)}{b(z)} \right) \sin 2\alpha \right] - \frac{P}{A_{red}} \left[1 - \frac{e_{op}}{r^2} y \right] \sin^2 \alpha \quad (5)$$

По формуле (5) и по эпюре можно сделать выводы, что напряженное состояние в наклонных сечениях, расположенных вблизи опор балки, характерно тем, что нормальные растягивающие напряжения σ_α возникают не у нижних волокон сечения, а в средней части балки $\sigma_{\alpha(max)} = R_{bt,ser}$, где уровень обжатия будет существенно ниже. Так в средней части балки обжатие σ_{sp2} , не погашается вследствие несущественной величины изгибающего момента от внешней нагрузки (рис. 1, г).

Ненапряженную железобетонную балку (при $P = 0$), будем рассматривать как частный случай предварительно напряженного элемента, а напряжения σ_α в любой точке наклонного сечения, представленные в формуле (5) примут следующий вид

$$\sigma_{\alpha(F+P)} = -\frac{Q}{I_{red}} \left[a_n y \sin^2 \alpha + \left(\frac{y^2}{2} - \frac{S(z)}{b(z)} \right) \sin 2\alpha \right]. \quad (5')$$

Согласно проведенного анализа можно сделать вывод, что упругопластическое поведение железобетона – это следствие появления множества невидимых микротрещин при росте внешней нагрузки, и оно на первом этапе является устойчивым и незначительно сказывается на их механическом поведении.

Кроме того, пока сжатый бетон работает упруго, высота сжатой зоны постепенно уменьшается с ростом нагрузки и наклонные трещины развиваются вглубь сечения. Это свойство, как характерная особенность трещиностойкости наклонных сечений предварительно напряженных и обычно-армированных балок выявлено в опытах И.К. Белоброва [18], Л.В. Кузнецова [32], М.Н. Убайдуллаева [11], М.С. Боришанского и Ю.К. Николаева [23], Л.Н. Брусковой [24]. С ростом деформаций усилия могут возрастать за счет повышения напряжений на менее деформированных участках сечения, тогда как в точках, где деформации наибольшие, напряжение постепенно перераспределяется по сечению элемента. Это можно наблюдать в опытах Д.А. Григорьева [26], И.К. Белоброва [18], Л.В. Кузнецова [32], М.Н. Убайдуллаева [11], А.Б. Голышева и В.И. Колчунова [25].

Однако, перед образованием наклонных трещин, т.е. в условии отсутствия нормальных трещин, происходит слияние этих микротрещин. Поэтому утверждение, что железобетон подчиняется строго гипотезе плоских сечений и закона Гука, не совсем, корректно. Также соотношение модулей упругости арматуры и бетона E_s/E_b тоже не является постоянным и зависит от напряжений в бетоне σ_b , состава бетона, его возраста и других факторов, которые сложно учесть. Все это невозможно полностью отразить в расчетах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Метод расчета образования трещин по наклонным сечениям базируется на упругой модели поведения сжатого бетона и растянутой арматуры, не учитывая неупругие деформации растянутого бетона. За последние 50 лет в отечественной нормативной литературе этот метод практически не претерпел значительных изменений, и она практически полностью построена на эмпирической

зависимости. В это же время в зарубежных нормах к расчету по образованию наклонных трещин подходят конструктивно, считая, что трещиностойкость конструкции обеспечена [31].

2. Анализ расчета свидетельствует о том, что если уравнения (5) и (5') приравнять нулю, решив их относительно оси "y", можно получить формулу для определения нулевых точек ($y_{1,2}$) и максимальных значений эпюры σ_x , как для предварительного напряженной балки, так и для обычно армированной ненапряженной балки (рис. 1, напряжения σ_x и τ_{xy}). Это дает возможность представить не только качественную картину явлений о напряженном состоянии, но и описать их математически, используя положения теории сопротивления и упругости материалов. Очертание эпюры на разных этапах расчета нормальных напряжений σ_x между нулевыми точками в зоне действия растягивающих напряжений для наклонных сечений предварительно напряженных и ненапряженных упругих балок с обычной арматурой - близко к квадратной параболе, хотя оно зависит от большого числа факторов и не может быть установлено достаточно точно.

3. Зная закон распределения напряжений по наклонному сечению, можно решить вопрос о рациональных формах сечений при действии поперечных сил.

С учетом вышеизложенного требуется продолжить изучение работы железобетона при действии поперечной силы, с учетом неупругих деформаций бетона и арматуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева И. Д., Лапин А. В. Результаты стендовых испытаний балки длиной 24 метра по типовому проекту серии 3.503.1-81 с усиленным армированием стенки и нижнего пояса // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2020. № 3 (54), с. 66-71. EDN: JIBAZM

2. Алексеева И. Д. Адаптация типовых несущих конструкций с напрягаемой арматурой к требованиям современных норм проектирования: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 2.1.8/ Алексеева Ирина Дмитриевна; «Тихоокеанский государственный университет. Хабаровск, 2023. – 111 с. EDN: TOBAXL

3. Глухов Д.О., Лазовский Д.Н., Лазовский Е.Д., Глухова Т.М. Моделирование трещинообразования в железобетонных конструкциях на основе деформационной расчетной модели // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, 2021. с. 50-58. EDN: VOUBJZ

4. Залесов А.С., Мухамедиев Т.А. Настоящее и будущее расчета железобетона // Бетон и железобетон. 2005. №4 (535), с. 3-6. EDN: YNAIUF

5. Залесов А.С., Алиев Г.С., Маглян Р.Л. Условия образования наклонных трещин в стенках железобетонных балок из тяжелого и облегченного бетонов // Совершенствование методов расчета и исследования новых железобетонных конструкций. Л.: 1997. С. 66 – 75.

6. Кодак О. А. Трещиностойкость наклонных сечений косоизгибаемых железобетонных элементов: автореферат дис. канд. техн. наук: 05.23.01/ Кодак Ольга Антоновна.- Полтава, 1997.- 18 с. EDN: ZLWTHZ

7. Лазовский Е.Д., Глухов Д.О. Образование трещин в железобетонных элементах при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил // Вестник полоцкого государственного университета. Ф, Строительство. Прикладные науки, 2021. №16. с. 80-85. EDN: KPAACH

8. Мурашев, В.И. Трещиностойчивость, жесткость и прочность железобетона // В.И. Мурашев. – М.: Изд-во Машстройиздат, 1950. - 268 с.

9. Поликутин А.Э. Прочность и трещиностойкость наклонных сечений изгибаемых элементов строительных конструкций из армокаутона: дис канд техн наук: 05.23.01 / А.Э. Поликутин; Воронеж, 2002. – 235 с. EDN: QDTSKX

10. Польской П.П. Прочность и трещиностойкость наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов при различных видах бетона и формах сечения: дисс. канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 1998. - 262 с. EDN: NLJSAX

11. Убайдуллаев М.Н. Образование и раскрытие наклонных трещин в предварительно напряженных балках при длительных нагрузках: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.23.01/ Убайдуллаев Мусохон Нуруллаевич; Киевский инженерно-строительный институт. Киев, 1980. – 22 с.

12. Abou El-Mal H.S.S., Sherbini A.S., Sallam H.E.M. Locating the site of diagonal tension crack initiation and path in reinforced concrete beams // Ain Shams Engineering Journal, 2015. №6, p. 17-24.

13. 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. p. 157-173. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.09.015>

14. El-Helou, R.G.; Graybeal, B.A. Shear design of strain-hardening fiber-reinforced concrete beams. Journal of Structural Engineering. 2023, №149 (2). p. 04022234-1-16. DOI: 10.1061/JSENDH.STENG-11065. EDN: JWFIWL

15. Golewski G.L. The phenomenon of cracking in cement concretes and reinforced concrete structures: The mechanism of cracks formation, causes of their initiation, types and places of occurrence, and methods of detection - a review // Buildings. 2023. №13. p. 765. <https://doi.org/10.3390/buildings13030765>. EDN: BLKLCF

16. Saravanakumar P., Govindaraj A. Influence of vertical and inclined shear reinforcement on shear cracking behavior in reinforced concrete beams // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2016. № 7(6). p. 602-610. Article ID: IJCIET_07_06_067
17. Smarzewski, P.; Słowik, M. Numerical analysis of cracking processes in RC beams without transverse reinforcement // *Journal Processes* 2023, 11, 584. <https://doi.org/10.3390/pr11020584>. EDN: OEKSQB
18. Белобров И.К. Особенности работы предварительно напряженных балок при большой высоте сечения // Сборник трудов НИИЖБ «Трещиностойкость и деформативность обычных и преднапряженных железобетонных конструкций», Москва: Изд-во Госстройиздат, 1965. с. 33-72.
19. Белуцкий И. Ю., Лазарев И. В. Учет совместной работы арматуры и бетона при оценке напряженного состояния бетона стенок балок по главным площадкам // *Вестник ТОГУ*. 2016. № 1 (40). С. 37-43. EDN: VSKKZZ
20. Бердичевский Г.И., Будюк В.Д., Кондратчик А.А. Трещиностойкость и прочность самонапряженных элементов по наклонному сечению // *Бетон и железобетон*. 1982. № 5. С. 22 – 24.
21. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов / А.В.Александров, В.Д.Потапов, Б.П.Державин. - М.: Изд-во Высшая школа, 2004. - 559 с. EDN: QMDZDP
22. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчётные модели силового сопротивления железобетона / В.М.Бондаренко, В.И.Колчунов. М.: Изд-во АСВ, 2004. - 471 с. EDN: QNKPAР
23. Боришанский М.С. Образование косых трещин в стенках предварительно напряженных балок и влияние предварительного напряжения на прочность под действием поперечных сил // Сборник трудов НИИЖБ «Прочность и жесткость железобетонных конструкций», Москва: Изд-во Стройиздат, 1968. – с. 5-56.
24. Брускова Л.Н. Исследование трещиностойкости и прочности предварительно напряженных керамзитобетонных элементов по наклонным сечениям. дисс. канд.техн.наук. М., 1975, с. 122.
25. Голышев А.Б. Сопротивление железобетона: монография / А.Б. Голышев, Вл. И. Колчунов. – Киев: Изд-во Основа, 2009. – 432 с. EDN: WLZJYN
26. Григорьев Д.А. Исследование работы тонкостенных железобетонных балок с предварительно напряженными продольной арматурой и хомутами // Сборник трудов ЦИНИС «Исследование железобетонных мостовых конструкций», Москва: Изд-во Трансжелдориздат, 1956. – с. 110-176.
27. Залесов А.С. Сопротивление железобетонных элементов при действии поперечных сил. Теория и новые методы расчета прочности: дисс. докт. техн. наук: 05.23.01/ М.: НИИЖБ, 1979. - 345 с.
28. Залесов А.С., Титов И.А. Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов в зоне действия поперечных сил // *Строительные конструкции и теория сооружений*. Минск: БПИ, 1977. Вып. 2. С. 42-47.
29. Ильин О.Ф. Исследование железобетонных балок из высокопрочного бетона при действии поперечных сил: дисс. канд. техн. наук: 05.23.01/ Ильин О.Ф. М: НИИЖБ, 1973. - 117 с.
30. Клименко Е.В. Прочность наклонного сечения косоизгибаемых железобетонных тавровых элементов: дисс. канд. техн. наук: 05.23.01/ Клименко Е.В. Полтава, 1984. - 227 с. EDN: NPHMIT
31. Колмогоров А. Г., Плевков В. С. Расчёт железобетонных конструкций по российским и зарубежным нормам: Учебное пособие. – Москва: Изд-во АСВ, 2014. – 512 с.
32. Кузнецов Л.В. Трещиностойкость косых сечений предварительно-напряженных железобетонных балок: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.23.01/ Кузнецов Леонид Васильевич; Киевский инженерно-строительный институт. Киев, 1963. – 184 с.
33. Морозов А.Н. К прямому определению поперечной силы, воспринимаемой бетоном в наклонных сечениях. // *Современное строительство и архитектура*. 2018. № 2 (26). С.53-59. DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2022.26.5> EDN: IJPLMF
34. Сигалов Э.Е., Старишко И.Н. Влияние предварительного напряжения на прочность по наклонным сечениям железобетонных изгибаемых элементов // Сб. тр. Железобетонные конструкции промышленного и гражданского строительства, Москва 1981. М: МИСИ, 1981. С. 185-190.
35. Силантьев А.С. Сопротивление изгибаемых железобетонных элементов по наклонным сечениям с учетом влияния продольного армирования: дисс. канд. техн. наук: 05.23.01/ Силантьев А.С. Москва, 2012. - 257 с. EDN: QICVZH
36. Старишко И.Н. Новое направление по расчету прочности изгибаемых железобетонных элементов по наклонным сечениям с примером расчета опытной балки // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2021. 17(5), с. 479-499. DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-5-479-499. EDN: NEEMUJ
37. Убайдуллоев О. Прочность железобетонных элементов при совместном действии поперечной силы и изгибающего момента // *Проблемы архитектуры и строительства*, Самарканд - 2006. № 4. с. 17-19.
38. Убайдуллоев О. Современные вопросы развития методы расчета трещиностойкости железобетонных конструкций при действии поперечных сил // Сборник материалов международного симпозиума «Earthquake safe constructions with lightweight steel structures», Ташкент, 27 ноября 2015 г. - Ташкент: Изд-во Кнауф, 2015. – с. 28-29.
39. Шеина С.Г. Прочность и трещиностойкость наклонных сечений железобетонных элементов при совместном действии продольных сжимающих и поперечных сил: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.23.01/ Шеина Светлана Георгиевна. Ростов на Дону, 1984. – 184 с. EDN: NPPLAP

40. Carlos Zanuy, Elena Pilar Martínez, Ramon Merino, Jose M. Simon-Talero, Carlos Bajo. Experimental analysis of shear-lag effect in reinforced concrete T-beams // *Engineering Structures*. 2022. № 256. p.114009. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114009 EDN: POQQPZ
41. Kani G. N. J. Basic facts concerning shear failure.// *Journal of the American Concrete Institute*. 1964. № 61(6). p. 675-692.
42. Karpiuk V., Somina Yu., Karpiyuk F., Karpiuk I. Peculiar aspects of cracking in prestressed reinforced concrete T-beams // *Acta Polytechnica*. 2012. № 61(5). p. 633-643. DOI:10.14311/AP.2012.61.0633. EDN: WEBCBI
43. Mirzaakhmedova U. A. Failure Mechanism of bending reinforced concrete elements under the action of transverse forces// *The American Journal of Applied Sciences*. December 27, 2020. №02 (12). p. 36-43. Doi:<https://doi.org/10.37547/tajas/Volume02Issue12-07>
44. Mirzaev P.T., Shamansurova Z.P. Basis for evaluating the strength and crack resistance of prestressed members without transverse reinforcement along inclined sections. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023. №15(3): 42SAVN323. Available at: <https://esj.today/PDF/42SAVN323.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.). EDN: QYDQUE
45. Mohammed A.O.I. Experimental studies of strength inclined sections bent elements from autoclaved aerated concrete // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2021, №1079 (1). 022062. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/2/0220629>. EDN: NWYFCH
46. 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.
47. Travush, V.I., Krylov, S.B., Konin, D.V., Krylov, A.S. Ultimate state of the support zone of reinforced concrete beams// *Magazine of Civil Engineering*. 2018. 83(7). Pp. 165–174. doi: 10.18720/MCE.83.15. EDN: JJEFNN
48. Yang Y., Walraven J., Uijl J. den. Shear behavior of reinforced concrete beams without transverse reinforcement based on critical shear displacement // *Journal of Structural Engineering*. 2016. №143 (1). 04016146. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001608](http://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001608)
49. Yang Y. Shear behavior of reinforced concrete members without shear reinforcement: Thesis Ph.D. / Y. Yang. – Delft: Norwegian University of Science and Technology, 2014. – 370 p. DOI: <https://doi.org/10.4233/uuid:ac776cf0-4412-4079-968f-9eacb67e8846>.
50. Zheng K., Zhou S., Zhang Y., Wei Y., Wang J., Wang Y., Qin X. Simplified evaluation of shear stiffness degradation of diagonally cracked reinforced concrete beams// *Journal Materials*. 2023. № 16 (4752). <https://doi.org/10.3390/ma16134752>. EDN: ZGLYYX
51. Vegera P., Khmil R., Vashkevych R., Blickharskyy Z. Comparison crack resistance of RC beams with and without transverse reinforcement after shear testing // *Quality Production Improvement*. 2019, №1(1), p. 342-349. doi: 10.2478/cqpi-2019-0046.

ОБ АВТОРАХ

Олимхон Мусохонович Убайдуллоев – старший преподаватель кафедры «Строительная инженерия». Самаркандский государственный архитектурно-строительный университет (СамГАСУ). 140143, Узбекистан, г. Самарканд, ул. Лолазор, д.70. E-mail: hodja2002@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Olimkhon M. Ubaydulloyev – a senior lecturer at the Department of «Construction Engineering». Samarkand State of Architecture and Construction University (SamGASU). 140143, Uzbekistan, Samarkand, Lolazor str., 70. E-mail: hodja2002@mail.ru