УДК 69.04
doi: 10.33622/0869-7019.2025.09.28-34

Принцип совместной работы арматуры и бетона при осевом растяжении элементов

Дмитрий Анатольевич ПЕКИН, кандидат технических наук, главный конструктор, dpekin@mail.ru
ИНВ-Строй, 142105 Московская обл., г. Подольск, ул. Пионерская, 6-30

Аннотация. *Данная статья продолжает серию статей автора о такой важной экспериментальной характеристике железобетона, как расстояние между трещинами в центрально растянутых железобетонных элементах, и требует совместного рассмотрения. Формулируется принцип совместной работы для арматуры периодического профиля и растянутого бетона с учетом образования и развития первичных и вторичных трещин на примере железобетонного элемента, подвергнутого осевому растяжению. Предложенный принцип дополняет сформулированные ранее расчетные предпосылки и допущения для построения механики железобетонных балок с нормальными трещинами. Обосновывается невозможность обнуления или резкого снижения растягивающих напряжений в бетоне после образования первичных трещин. На основе проделанных исследований и анализа результатов описывается природа первичных и вторичных трещин. Детально рассматриваются параметры, характеризующие процесс образования и раскрытия трещин. Получены важные уточнения для подготовки и проведения экспериментов на центрально растянутых железобетонных призмах.*

Ключевые слова: *растянутые железобетонные элементы, первичные и вторичные трещины, расстояние между трещинами, принцип совместной работы арматуры и бетона, осевое растяжение*

Для цитирования: *Пекин Д. А.* Принцип совместной работы арматуры и бетона при осевом растяжении элементов // Промышленное и гражданское строительство. 2025. № 9. С. 28–34.
doi: 10.33622/0869-7019.2025.09.28-34

THE COLLABORATION PRINCIPLE OF REINFORCEMENT AND CONCRETE DURING AXIAL TENSION OF ELEMENTS

Dmitrii A. PEKIN, dpekin@mail.ru
INV-Stroy, Pionerskaya ul., 6-30, Podolsk 142105, Russian Federation

Abstract. *This article continues the author's series of articles on such an important experimental characteristic of reinforced concrete as the distance between cracks in centrally tensioned reinforced concrete elements and requires joint consideration. The collaboration principle for reinforcement of a periodic profile and tensioned concrete is formulated, taking into account the formation and development of primary and secondary cracks using the example of a reinforced concrete element subjected to axial tension. The proposed principle complements the previously formulated calculation prerequisites and assumptions for constructing the mechanics of reinforced concrete beams with normal cracks. The impossibility of zeroing or sharply reducing the tensile stresses in concrete after the formation of primary cracks is substantiated. Based on the research done and the analysis of the results, the nature of the primary and secondary cracks is described. The parameters characterizing the process of crack formation and opening are considered in detail. Important refinements have been obtained for the preparation and conduct of experiments on centrally tensioned reinforced concrete prisms.*

Keywords: *tensioned reinforced concrete elements, primary and secondary cracks, the distance between cracks, the collaboration principle of reinforcement and concrete, axial tension*

For citation: Pekin D. A. The Collaboration Principle of Reinforcement and Concrete During Axial Tension of Elements. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2025, no. 9, pp. 28–34. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2025.09.28-34

Введение

В развитие предыдущих статей автора «Расстояние между трещинами – важная экспериментальная характеристика железобетона» [1] и «Расстояние между трещинами в центрально растянутых железобетонных элементах на основе экспериментов» [2] необходимо сформулировать энергетический принцип совместной работы арматуры и бетона, который позволяет подчеркнуть отличие предложенного в статье [3] подхода на основе деформационного критерия от классического в работах [4–7], описывающего образование и раскрытие нормальных трещин на примере центрально растянутых железобетонных элементов.

Цель работы – создание новой схемы идеализации совместной работы арматуры и бетона на основе энергетического принципа с учетом образования и раскрытия трещин на примере центрально растянутых железобетонных элементов.

© ПЕКИН Д. А., 2025

Модели и методы

На основе предпосылок, изложенных в статьях [1–3, 8–10], сформулируем в общем виде новый принцип совместной работы арматуры периодического профиля и растянутого бетона с учетом образования и развития первичных и вторичных трещин на примере элемента, подвергнутого осевому растяжению и показанного на *рис. 1а*.

Уравнение работы группы растягивающих внешних сил запишем следующим образом:

$$A = \frac{(P_1 + P_2 + P_3)\Delta l_\Sigma}{2}. \quad (1)$$

С учетом внутренних усилий работа или потенциальная энергия будет равна:

$$A = U = \int_0^l \frac{(N_1 + N_2 + N_3)^2}{2E_{bt,red}A_{red}}dL + \int_0^{a_{cr1}} \frac{(N_1 + N_2 + N_3)^2}{2E_s A_s}dL + \int_0^{a_{cr2}} \frac{(N_1 + N_2 + N_3)^2}{2E_s A_s}dL. \quad (2)$$

Внешние и внутренние усилия связаны соотношениями:

$$P_1 = N_1 = N_{bt1} + N_{rs1} = N_{crc1}; \quad (3)$$

$$P_2 = N_2 = N_{rs2}; \quad P_3 = N_3 = N_{rs3},$$

где P_1, P_2, P_3 – группа характерных внешних сил, соответствующих при суммировании различным стадиям напряженно-деформированного состояния (НДС) железобетонного элемента и последовательно прикладываемых согласно нумерации; $\Delta l_\Sigma = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3$ – суммарное удлинение от действия группы внешних сил P_1, P_2, P_3; $E_{bt,red}$ – приведенный модуль деформаций бетона при растяжении; E_s – модуль упругости стали арматуры; $A_{red} = A_{bt,red} + \alpha_{red} \cdot A_s$ – приведенная площадь сечения элемента без трещин; $A_{bt,red}$ и A_s – приведенная площадь растянутого бетона и площадь арматуры; $\alpha_{red} = E_s / E_{bt,red}$ – коэффициент приведения стали к бетону; $E_{bt,red}$, $A_{bt,red}$, α_{red} – приведенные параметры, учитывающие изменение НДС; L – координата положения поперечного сечения вдоль оси элемента; l – первоначальная длина железобетонного элемента; a_{cr1} – суммарная начальная ширина раскрытия первичных трещин; a_{cr2} – то же, вторичных трещин; $N_1 = N_{bt1} + N_{rs1} = N_{crc1}$ – усилие в любом поперечном сечении по длине элемента, соответствующее образованию первичных трещин; $N_2 = N_{rs2}$ – аналогичное усилие, соответствующее образованию вторичных трещин при суммировании с N_1, т. е. $N_{crc2} = N_1 + N_2$; $N_3 = N_{rs3}$ – аналогичное усилие, соответствующее пределу пропорциональности стали при суммировании с N_1 и N_2, т. е. $N_{sy} = N_1 + N_2 + N_3$; N_{rsi} – усилия в арматуре от действия соответствующих внешних сил P_i; $N_{bt1} = N_{crc1} - N_{rs1}$ – усилие в бетоне от действия внешней силы P_1, соответствующее пределу прочности.

При этом первым слагаемым в правой части формулы (2) является работа A_{rc} группы внешних

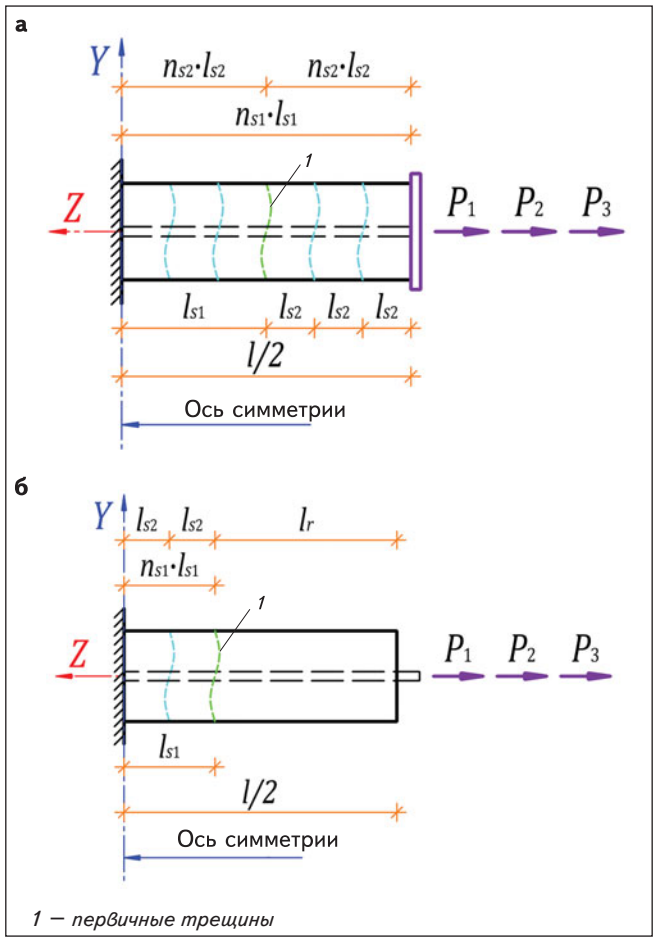


Рис. 1. ***Железобетонные элементы с приложением нагрузки к торцу (а) и к арматуре (б) элемента (первичные трещины посередине и торцам элемента условно не показаны)***

сил P_1, P_2, P_3, соответствующая удлинению железобетонного элемента без учета трещин, второе слагаемое – работа A_{s1} той же группы сил, соответствующая удлинению арматуры в зонах первичных трещин, а третье слагаемое – работа A_{s2} тех же сил, соответствующая удлинению арматуры в зонах вторичных трещин.

Длина и удлинение железобетонного элемента с трещинами при осевом растяжении, на основе данного принципа совместной работы, описываются следующими выражениями:

$$l_1 = l + \Delta l_1 = l + \Delta l_{rc1} + \Delta l_{s1}; \quad (4)$$

$$l_2 = l_1 + \Delta l_2 = l_1 + \Delta l_{rc2} + \Delta l_{s2};$$

$$l_3 = l_2 + \Delta l_3 = l_2 + \Delta l_{rc3} + \Delta l_{s3},$$

где l_1, l_2 и l_3 – длины элемента при действии сил P_1, $P_1 + P_2$ и $P_1 + P_2 + P_3$; $\Delta l_1 = \Delta l_{rc1} + \Delta l_{s1}$ – удлинение железобетонных блоков и арматуры в первичных трещинах при действии силы P_1; $\Delta l_2 = \Delta l_{rc2} + \Delta l_{s2}$ – дополнительное удлинение железобетонных блоков и арматуры в первичных и вторичных трещинах при действии силы P_2; $\Delta l_3 = \Delta l_{rc3} + \Delta l_{s3}$ – то же, при дейст-

вии силы P_3; Δl_{rc1}, Δl_{rc2}, Δl_{rc3} – суммарное удлинение железобетонных блоков без учета трещин при действии сил P_1, P_2, P_3; Δl_{s1}, Δl_{s2}, Δl_{s3} – суммарное удлинение арматуры в первичных и вторичных трещинах при действии сил P_1, P_2, P_3.

Тогда продольные относительные деформации после образования трещин будут равны:

$$\varepsilon_1 = \Delta l_1/l = \varepsilon_{rc1} + \varepsilon_{s1}; \quad (5)$$

$$\varepsilon_2 = \Delta l_2/l_1 = \varepsilon_{rc2} + \varepsilon_{s2};$$

$$\varepsilon_3 = \Delta l_3/l_2 = \varepsilon_{rc3} + \varepsilon_{s3},$$

где ε_{rc1}, ε_{rc2}, ε_{rc3} и ε_{s1}, ε_{s2}, ε_{s3} – относительные деформации железобетонных блоков и арматуры в первичных и вторичных трещинах при действии сил P_1, P_2, P_3.

Начальная ширина раскрытия первичных трещин a_{cr1}/n_{s1} при действии силы $P_1 = N_1$ увеличивается до величины $\Delta l_{s1}/n_{s1}$, которая определяется через относительные деформации с помощью следующих выражений:

$$\varepsilon_{rc1} = \frac{\Delta l_{rc1}}{l} = \frac{\Delta l_{rc1}}{n_{s1} l_{s1}} = \frac{N_1}{E_{bt} A_{red}} \text{ и} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{\Delta l_{s1}}{l} = \frac{\Delta l_{s1}}{n_{s1} l_{s1}} = \frac{N_1}{E_s A_s};$$

$$N_1 = \frac{\Delta l_{rc1} E_{bt} A_{red}}{n_{s1} l_{s1}} = \frac{\Delta l_{s1} E_s A_s}{n_{s1} l_{s1}}; \quad (7)$$

$$\frac{\Delta l_{rc1} E_{bt} A_{red}}{n_{s1}} = \frac{\Delta l_{s1} E_s A_s}{n_{s1}}; \quad (8)$$

$$\frac{\Delta l_{s1}}{n_{s1}} = \frac{\Delta l_{rc1}}{n_{s1}} \frac{E_{bt} A_{red}}{E_s A_s} = \frac{\varepsilon_{rc1} n_{s1} l_{s1}}{n_{s1}} \frac{A_{bt} + \alpha A_s}{\alpha A_s} = \quad (9)$$

$$= \varepsilon_{rc1} l_{s1} \left(1 + \frac{1}{\alpha \mu_s}\right),$$

где $\mu_s = A_s/A_{bt}$ – коэффициент армирования; E_{bt} – начальный модуль упругости бетона на растяжение; $A_{red} = A_{bt} + \alpha A_s$ и A_{bt} – начальная приведенная площадь элемента и площадь бетона; $\alpha = E_s/E_{bt}$ – начальный коэффициент приведения стали к бетону; $l = n_{s1} \cdot l_{s1}$ – первоначальная длина железобетонного элемента; $n_{s1} = n_1 - 1$ и l_{s1} – количество образовавшихся железобетонных блоков и усредненное расстояние между первичными трещинами или длина блока (*см. рис. 1а*), условно полагается, что первичные трещины образуются в том числе по торцам элемента, поэтому общее их количество на единицу больше, чем блоков, но при этом ширина двух крайних трещин суммарно равна ширине одной промежуточной; n_1 – количество образовавшихся первичных трещин, в том числе по торцам элемента (в связи с одновременной передачей внешней нагрузки на бетон и арматуру); $N_1 = N_{crc1}$ – усилие, соответствующее образованию первичных трещин.

Аналогично находится ширина раскрытия первичных и вторичных трещин при действии сил $P_1 + P_2$ и $P_1 + P_2 + P_3$, но с учетом корректировки указанных в экспликации к формуле (9) величин.

Следует отметить, что после достижения в бетоне равнодействующего усилия N_{bt1}, соответствующего пределу прочности при растяжении R_{bt}, последующее увеличение внешней нагрузки осуществляется только за счет сопротивления растянутой арматуры. Кроме того, с учетом совместности деформаций и при отсутствии проскальзывания между арматурой и бетоном рост напряжений в арматуре σ_{rsi} внутри блока обратно пропорционален снижению начального модуля упругости бетона E_{bti}, например при действии сил P_1 и P_2:

$$\varepsilon_{rc2} = \frac{\sigma_{rs2}}{E_s} = \frac{R_{bt}}{E_{bt2}} \rightarrow \sigma_{rs2} = \frac{R_{bt} E_s}{E_{bt2}}, \quad (10)$$

где ε_{rc2} – относительная деформация блоков при действии сил P_1 и P_2; σ_{rs2} – напряжения в арматуре в габаритах блока при действии сил P_1 и P_2; E_{bt2} – модуль деформации растянутого бетона при действии сил P_1 и P_2.

Данный принцип является развитием известной теоремы о взаимности работ Бетти применительно к железобетонному элементу с трещинами при осевом растяжении и формальном отсутствии проскальзывания арматуры в бетоне за счет наличия периодического профиля, а также с некоторыми характерными нюансами, отражающими НДС. В случае частичного или возможного полного проскальзывания, свойственного гладкой арматуре, верхние пределы интегрирования в выражении (2) изменятся:

- в первом слагаемом $\boldsymbol{A_{rc}}$ вместо первоначальной длины следует принять общую длину фрагментов элемента без проскальзывания;
- во втором $\boldsymbol{A_{s1}}$ и третьем $\boldsymbol{A_{s2}}$ слагаемых в случае возникновения соответствующих трещин (что вовсе не гарантировано для гладкой арматуры и маловероятно) следует прибавить к указанным значениям длины фрагментов проскальзывания, либо в пределе выражение (2) преобразуется к виду:

$$A = U = \int_0^l \frac{(N_1 + N_2 + N_3)^2}{2 E_s A_s} dL. \quad (11)$$

На *рис. 1б* показан аналогичный железобетонный элемент, но с выступающими концами арматуры, к которым прикладывается группа растягивающих внешних сил. Отличие данного элемента от показанного на *рис. 1а* – в способе приложения внешних сил и наличии зоны перераспределения нагрузки с арматуры на бетон длиной l_r. Очевидно, что чем больше площадь поперечного сечения растянутого бетона при фиксированном диаметре арматуры, тем больше должна быть длина зоны перераспределения нагрузки с арматуры на бетон, и наоборот – чем больше диаметр арматуры при фиксированной площади бетона, тем меньше длина зоны перераспределения. Таким образом, при варьировании коэффи-

циента армирования в экспериментальных образцах постоянной длины и поперечного сечения будут получаться различные результаты по длине зон перераспределения и по количеству первичных и вторичных трещин, что заметно затруднит интерпретацию и анализ проводимых испытаний. Кроме того, для решения задач трещиностойкости и определения расстояний между трещинами возникает необходимость заметно увеличить длину образцов, предложенных в работе [3], независимо от проведенных до этого подобных экспериментов.

Важно отметить, что после образования первичных трещин в образце, показанном на *рис. 1а*, меняется схема приложения следующей нагрузки, т. е. сила P_2 воздействует на каждый образованный железобетонный блок, ограниченный трещинами, не по всей площади его поперечного сечения, включая бетон, а только через арматуру (*см. рис. 1б*). Данная ситуация повторяется в случае образования вторичных трещин, и при этом очевидно, что значения напряжений в арматуре σ_{s2} и σ_{s3} в трещинах больше, чем аналогичные напряжения внутри образованных железобетонных блоков σ_{rs2} и σ_{rs3} на величину N_{bt1}/A_s. Таким образом, физическая модель железобетонного элемента, подверженного осевому растяжению, особенно при возникновении проскальзывания арматуры в бетоне на последних стадиях НДС контактного (околоарматурного) слоя бетона, перечисленных в статье [1], крайне сложная, не говоря уже о железобетонных балках, имеющих дополнительную специфику.

Результаты исследования и их анализ

Важным следствием *принципа совместной работы* является вытекающее из него доказательство невозможности обнуления или резкого снижения растягивающих напряжений в теле бетона по границам образованных первичных трещин при отсутствии проскальзывания, т. е. если после их образования усилие в арматуре N_{rs1} в зоне трещин становится равным N_1, то это совсем не значит, что слева или справа от каждой грани трещины усилие в теле бетона N_{bt1} становится равным или близким к нулю, поскольку такое напряженное состояние будет соответствовать нарушению сцепления арматуры с бетоном или возникновению проскальзывания. Математическое описание такого явления хорошо известно — сечения по длине элемента, в которых появляются трещины, называются точками разрыва функции 1-го рода, в которых односторонние пределы функции справа и слева не равны друг другу:

• функциями в данном случае выступают равнодействующие и постоянные по длине, не равные друг другу усилия в бетоне N_{bt1} и арматуре N_{rs1}, сумма которых равна усилию образования первичных трещин $N_1 = N_{crc1}$;

• односторонние пределы указанных функций в точках разрыва по длине элемента (в трещинах) принимают значения $N_{bt1} = 0$ и $N_{rs1} = N_1$.

Рассмотрим возможность применения известных принципов Сен-Венана для образцов, показанных на *рис. 1*, при условии, что площадь арматуры периодического профиля существенно меньше площади бетона, как в примере, описанном формулами (11—15) в статье [2], в противном случае, при сопоставимых площадях, наличие бетона уже не будет определяющим:

• *принцип 1* — способ приложения нагрузки к элементу на некотором расстоянии от места ее действия принципиально не влияет на напряженное состояние упругого тела;

• *принцип 2* — последовательность приложения нескольких внешних сил к элементу не влияет на напряженное состояние упругого тела (принцип независимости действия сил).

Совместно с *принципом совместной работы*, сформулированным выше:

✓ до образования трещин в элементах большой длины можно пренебречь различиями в напряженном состоянии элементов вне зон перераспределения, а также несущественными различиями в продольных деформациях — удлинение элемента при передаче нагрузки через арматуру будет незначительно большим, поскольку полное сечение бетона включается в работу на длине зоны перераспределения;

✓ в силу характерности (соответствия различным стадиям НДС) внешних сил P_1, P_2, P_3 последовательность их приложения может иметь значение: например, первичные трещины при действии сил P_2 или P_3 могут и не возникнуть при определенных параметрах армирования или наоборот от действия сил P_2 или P_3 могут возникнуть первичные и вторичные трещины, но, рассматривая именно различные способы приложения нагрузки к образцам (ко всему сечению или только к арматуре), результат НДС в центральной части каждого из них принципиально не изменится согласно выражению (2), тем не менее деформированное состояние при сравнении между собой будет отличаться в силу разного количества трещин и наличия зоны перераспределения;

✓ при недостаточной длине элемента, показанного на *рис. 1б*, очевидно, что трещина образуется только в одном месте — посередине образца, что не позволит определить расстояния между первичными и вторичными трещинами и нарушает принцип 1;

✓ при возникновении проскальзывания, свойственного арматуре гладкого профиля, или при наруше-

нии сцепления арматуры с бетоном на соответствующей стадии НДС [1] теряет свою актуальность принцип 2, в связи с нелинейной зависимостью между удлинениями и нагрузкой, и частично выражение (2), в котором у всех слагаемых в правой части меняются пределы интегрирования.

По результатам анализа необходимо подчеркнуть различную природу образования первичных и вторичных силовых трещин в растянутых и изгибаемых железобетонных элементах. Первичные трещины образуются в бетоне при достижении определенного уровня растягивающих напряжений и формируются из некоторой последовательности областей микротрещин в наиболее слабых участках бетона из-за его неоднородной структуры.

На основе взаимодействия бетона с ребрами (выступами) арматуры периодического профиля процесс образования первичных трещин в железобетонных элементах заметно отличается от бетонных в связи с перераспределением части растягивающих напряжений с разрушенных областей бетона на арматуру за счет сил сцепления. И по мере накопления критической площади разрушенного микротрещинами бетона в разных сечениях по длине элемента происходит постепенное образование первичных трещин, в связи с чем предельная растяжимость железобетона с арматурой периодического профиля заметно выше, чем у бетона без арматуры или с гладкой арматурой.

Вторичные трещины формируются гораздо позже, при заметном увеличении уровня растягивающих напряжений, и являются продолжением других микротрещин, образующихся уже на контакте ребер арматуры с бетоном и развивающихся по мере дальнейшего увеличения нагрузки на следующих стадиях НДС околоарматурного слоя с гораздо меньшим шагом, чем первичные. В элементах с гладкой арматурой, даже при наличии анкеровки на ее концах, вторичные трещины не образуются, более того, расстояния между первичными трещинами в них заметно больше, либо образуется только одна трещина (в изгибаемых) или трещины не образуются вовсе (в центрально растянутых).

Влияние первичных трещин на работу центрально растянутого железобетонного элемента в сечении с трещиной можно наглядно показать с помощью диаграммы «σ–ε» по аналогии с рис. 1 [11] или рис. 10.4 [12], отражающими подход проф. В. И. Мурашева [5], но с учетом следующих важных корректировок:

1) фрагмент ломаной 0-A_1, соответствующий совместной работе бетона и арматуры, очевидно, не может быть прямолинейным, как и продолжение данного отрезка с первоначальным углом наклона, поскольку образование микротрещин в бетоне начинается практически с момента нагружения и может учитываться либо посредством снижения начального модуля упругости, как предложено в формуле (10), либо с помощью сокращения площади растянутого бетона $A_{bt,red}$;

2) фрагмент ломаной A_1-A_2, соответствующий развитию в арматуре дополнительных продольных растягивающих деформаций после образования трещины, не может быть горизонтальным, поскольку усилия в арматуре возрастают с N_{rs1} до N_{crc1} согласно формуле (3), а следовательно, и напряжения с σ_{rs1} до σ_{s1};

3) с учетом п. 2 угол наклона фрагментов ломаной A_2-C_1 изменится, кроме того, он существенно зависит от коэффициента армирования и совсем не обязательно будет таким пологим.

Данные корректировки показаны на *рис. 2* с заменой некоторых исходных обозначений параметров на принятые в отечественных нормах и с добавлением новых согласно формуле (5), в том числе графиков.

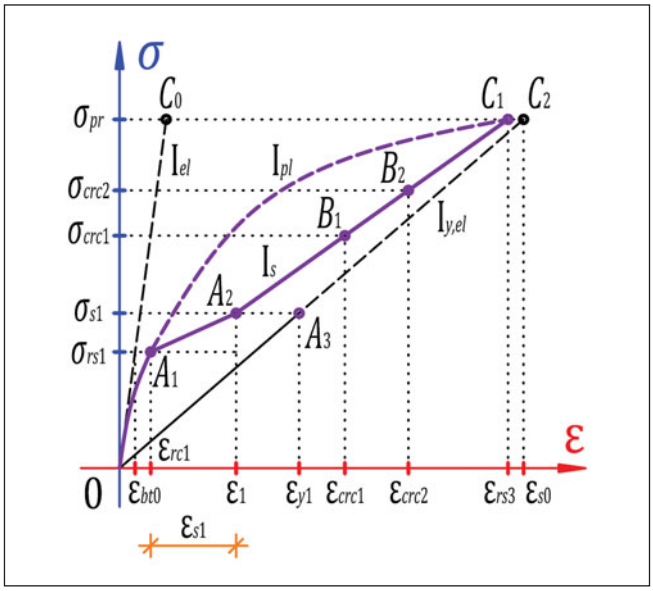


Рис. 2. ***Диаграмма «σ –ε» арматуры центрально растянутого железобетонного элемента в сечении с первичной трещиной***

На *рис. 2* использованы следующие обозначения: I_{el} – прямолинейный отрезок (0-C_0), соответствующий работе сечения в условной упругой стадии НДС без образования трещины; I_{pl} – гладкая кривая (0-A_1-C_1), соответствующая работе сечения в условной упругопластической стадии НДС без образования трещины; I_s – кусочно-гладкая кривая (0-A_1-A_2-C_1), соответствующая работе железобетонного сечения без трещины до точки A_1 и арматурного сечения после образования трещины в точках A_1-A_2-C_1; $I_{y,el}$ – прямолинейный отрезок (0-A_3-C_2), соответствующий работе стального сече-

ния без учета бетона в упругой стадии НДС; ε_{bt0} – предельная относительная деформация бетона при осевом растяжении; ε_{rc1} – то же, железобетона (точка A_1); ε_{s1} – приращение относительной деформации в арматуре после образования первичной трещины при действии силы P_1 (между точками A_1-A_2); $\varepsilon_1 = \varepsilon_{rc1} + \varepsilon_{s1}$ – полная относительная деформация арматуры после образования первичной трещины при действии силы P_1 (точка A_2); ε_{y1} – относительная деформация стали при действии силы P_1 (точка A_3); σ_{rs1} и σ_{s1} – напряжения в арматуре при действии силы P_1 до и после образования первичной трещины (точки A_1-A_2); ε_{crc1} и σ_{crc1} – относительная деформация и напряжения в арматуре, соответствующие предельной по трещиностойкости нагрузке продолжительного действия (точка B_1); ε_{crc2} и σ_{crc2} – то же, непродолжительного действия (точка B_2); ε_{rs3} – относительная деформация арматуры в первичной трещине при совместном действии сил $P_1 + P_2 + P_3 = N_{sy}$ и напряжений, соответствующих пределу пропорциональности стали σ_{pr} (точка C_1); ε_{s0} – относительная деформация, соответствующая пределу пропорциональности σ_{pr} стали (точка C_2) без учета работы бетона; $P_1 = N_{crc1}$ – внешнее усилие, соответствующее образованию первичных трещин.

Важно отметить, что при повторном нагружении образцов возникает дополнительное раскрытие трещин на 19–25 % от первоначального [6], в связи с чем положение точки C_1 на *рис. 2* будет меняться в направлении к точке C_2, и соответственно ε_{rs3} будет стремиться к ε_{s0}. Таким образом, в стадии, близкой к разрушению элемента, внешняя нагрузка будет восприниматься в основном только арматурой, а оставшимся сопротивлением и работой бетона на растяжение следует пренебречь в запас. Кроме того, необходимо учитывать важное дополнительное обстоятельство: такие параметры первичных трещин, как ширина раскрытия, глубина и расстояние между ними, существенно превосходят аналогичные характеристики вторичных трещин, что наглядно продемонстрировали эксперименты в работе [6], в связи с чем их наличием также можно пренебречь в запас при решении задач по нормированию трещиностойкости.

Отдельного обоснования и сопоставления требует возможность масштабирования или переноса результатов экспериментов с центрально растянутых железобетонных элементов на изгибаемые, которая отсутствует в перечисленных работах [4–7, 11]. Понятно, что проведение испытаний на призматических или цилиндрических образцах, подвергнутых осевому растяжению, для определения предельной растяжимости железобетона и расстояния между трещинами гораздо менее трудоемкое и затратное, чем эксперименты с балками, особенно при отсутствии необходимости для решения задач трещиностойкости выполнения измерений продольных деформаций в арматуре с помощью тензорезисторов, как проделано в [11].

Очевидно, что короткие образцы с передачей нагрузки на арматуру, как на *рис. 1б*, по характеру НДС существенно отличаются от растянутых частей сечения по длине фрагментов железобетонных балок в зонах чистого изгиба, поскольку до образования трещин в них отсутствуют зоны перераспределения усилий с арматуры на бетон. Более того, в балках нагрузка передается с бетона на арматуру, и по мере ее увеличения возрастает сцепление арматуры периодического профиля с бетоном за счет вертикального давления или вертикальных нормальных напряжений, что положительно сказывается на обеспечении совместной работы и может оказывать влияние в том числе на расстояние между трещинами.

Образцы с длиной, достаточной для образования первичных и вторичных трещин (*см. рис. 1б*), как и балки, заметно более трудоемкие и затратные при испытаниях, поскольку не позволяют использовать стандартные разрывные машины для образцов длиной до 1 м и требуют для проведения экспериментов специального стенда. В связи с этим возникает необходимость в разработке дополнительных приспособлений и мероприятий для передачи нагрузки на торец железобетонного элемента, т. е. одновременно на арматуру и бетон, как показано на *рис. 1а*.

Выводы

1. Предложенный *принцип совместной работы* для арматуры периодического профиля и растянутого бетона с учетом образования и развития первичных и вторичных трещин на примере железобетонного элемента, подвергнутого осевому растяжению, дополняет сформулированные ранее расчетные предпосылки и допущения для построения механики железобетонных балок с нормальными трещинами [8].

2. Анализ выполненных исследований позволил детализировать процесс образования и раскрытия трещин, исключив многочисленные нестыковки, накопленные за последние несколько десятилетий, и построить более эффективную схему для идеализации совместной работы арматуры и бетона в расчетных моделях механики железобетона.

3. С учетом детального рассмотрения процесса образования и раскрытия трещин в центрально растянутых железобетонных элементах получен ряд дополнительных уточнений и нововведений для проведения эксперимента, предложенного в статье [3].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Пекин Д. А.* Расстояние между трещинами – важная экспериментальная характеристика железобетона // Промышленное и гражданское строительство. 2025. № 7. С. 18–25. doi: 10.33622/0869-7019.2025.07.18-25
2. *Пекин Д. А.* Расстояние между трещинами в центрально растянутых железобетонных элементах на основе экспериментов (*В порядке обсуждения*) // Промышленное и гражданское строительство. 2025. № 8. С. 40–48. doi: 10.33622/0869-7019.2025.08.40-48
3. *Пекин Д. А.* Деформационный критерий образования нормальных трещин в железобетонных балках при плоском изгибе // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 8. № 4. С. 33–43.
4. *Столяров Я. В.* Введение в теорию железобетона. М., Л.: Госстройиздат, 1941. 447 с.
5. *Мурашев В. И.* Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона (Основы сопротивления железобетона). М., 1950. 268 с.
6. *Берг О. Я.* Исследование процесса трещинообразования в железобетонных элементах с арматурой периодического профиля. М. : Трансжелдориздат, 1954. Сообщение № 44. 24 с.
7. *Холмянский М. М.* Контакт арматуры с бетоном. М. : Стройиздат, 1981. 184 с.
8. *Пекин Д. А.* Механика железобетонных балок с нормальными трещинами при плоском изгибе // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 10. С. 12–23. doi: 10.33622/0869-7019.2024.10.12-23
9. *Пекин Д. А.* Стадии напряженно-деформированного состояния железобетонных балок с нормальными трещинами при плоском изгибе // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 9. С. 59–67. doi: 10.33622/0869-7019.2024.09.59-67
10. *Пекин Д. А.* Совершенствование методики расчета базового расстояния между нормальными трещинами в изгибаемых железобетонных элементах // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 12. С. 10–15. doi: 10.33622/0869-7019.2022.12.10-15
11. *Тур В. В., Драган А. В.* К расчету ширины раскрытия трещин в железобетонных элементах при осевых растягивающих усилиях // Строительная наука и техника. 2009. № 1(22). С. 40–53.
12. *Пецольд Т. М., Тур В. В.* [и др.]. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования : Курс лекций для студентов строительных специальностей. Брест : БрГТУ, 2002. 465 с.

REFERENCES

1. Pekin D. A. The distance between normal cracks – important experimental characteristics of reinforced concrete. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2025, no. 7, pp.18–25. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2025.07.18-25
2. Pekin D. A. The distance between cracks in centrally tensioned reinforced concrete elements based on experiments *(In the order of discussion). Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2025, no. 8, pp. 40–48. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2025.08.40-48
3. Pekin D. A. Deformation criterion for the formation of normal cracks in reinforced concrete beams during flat bending. *Zhelezobetonnye konstrukcii*, 2024, vol. 8, no. 4, pp. 33–43. (In Russ.).
4. Stolyarov Ya. V. *Vvedenie v teoriyu zhelezobetona* [Introduction to the theory of reinforced concrete]. Moscow, Leningrad, Gosstrojizdat Publ., 1941. 447 p. (In Russ.).
5. Murashev V. I. *Treshchinoustojchivost', zhestkost' i prochnost' zhelezobetona (Osnovy soprotivleniya zhelezobetona)* [Crack resistance, rigidity and strength of reinforced concrete (Fundamentals of resistance of reinforced concrete)]. Moscow, 1950. 268 p. (In Russ.).
6. Berg O. Ya. *Issledovanie processa treshchinoobrazovaniya v zhelezobetonnyh elementah s armaturoj periodicheskogo profilya* [Investigation of the cracking process in reinforced concrete elements with reinforcement of a periodic profile]. Moscow, 1954. Soobshchenie No. 44. 24 p. (In Russ.).
7. Holmyanskij M. M. *Kontakt armatury s betonom* [Rebar contact with concrete]. Moscow, Strojizdat Publ., 1981. 184 p. (In Russ.).
8. Pekin D. A. Mechanics of reinforced concrete beams with normal cracks during flat bending. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2024, no. 10, pp. 12–23. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2024.10.12-23
9. Pekin D. A. Stages of stress-strain state of reinforced concrete beams with normal cracks during flat bending. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2024, no. 9, pp. 59–67. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2024.09.59-67
10. Pekin D. A. Improving the methodology for calculating the base distance between normal cracks in bent reinforced concrete elements. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2022, no. 12, pp. 10–15. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2022.12.10-15
11. Tur V. V., Dragan A. V. To calculate the opening width of cracks in reinforced concrete elements under axial tensile. *Stroitel'naya nauka i tekhnika*, 2009, no. 1(22), pp. 40–53. (In Russ.).
12. Pecol'd T. M., Tur V. V. et al. *Zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovy teorii, rascheta i konstruirovaniya : Kurs lekcij dlya studentov stroitel'nyh special'nostej* [Reinforced concrete structures. Fundamentals of theory, calculation and design : A course of lectures for students of construction specialties]. Brest, BrGTU Publ., 2002. 465 p. (In Russ.).