УДК 69.04
doi: 10.33622/0869-7019.2025.07.18-25

Расстояние между трещинами – важная экспериментальная характеристика железобетона

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

Аннотация. *Рассмотрены первоначальные предложения по определению расстояния между трещинами в центрально растянутой железобетонной призме, которые легли в основу аналогичной методики для определения расстояния между нормальными трещинами при изгибе балки в состоянии чистого изгиба. С различных позиций рассматривается и доказывается невозможность отсутствия напряжений сцепления между арматурой и бетоном при наличии продольных напряжений в арматуре и обеспеченном сцеплении. Выполняется сравнение экспериментальных подходов для исследования задач, рассматриваемых в теориях сцепления и трещиностойкости. Обосновывается невозможность применения технической теории сцепления для определения расстояния между первичными нормальными трещинами. По результатам анализа фиксируется невозможность теоретического определения расстояния между трещинами в центрально растянутой железобетонной призме. Проводится аналогия между модулем упругости бетона или арматуры и расстоянием между нормальными трещинами, дополняющим основные механические характеристики железобетона.*

Ключевые слова: *растянутые железобетонные призмы, напряжения сцепления арматуры с бетоном, образование трещин, шаг трещин, расстояние между трещинами*

Для цитирования: *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

THE DISTANCE BETWEEN NORMAL CRACKS – IMPORTANT EXPERIMENTAL CHARACTERISTICS OF REINFORCED CONCRETE

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

Abstract. *The paper considers the initial proposals for determining the distance between cracks in a centrally tensioned reinforced concrete prism, which formed the basis for a similar technique for determining the distance between normal cracks during beam bending in a state of pure bending. The impossibility of the absence of adhesion stresses between reinforcement and concrete in the presence of longitudinal stresses in the reinforcement and provided adhesion is considered and proven from various positions. A comparison of experimental approaches to studying the problems considered in the theories of adhesion and crack resistance is performed. The impossibility of using the technical theory of adhesion to determine the distance between primary normal cracks is substantiated. Based on the results of the analysis, the impossibility of theoretically determining the distance between cracks in a centrally tensioned reinforced concrete prism is recorded. An analogy is drawn between the modulus of elasticity of concrete or reinforcement and the distance between normal cracks, which complements the main mechanical characteristics of reinforced concrete.*

Keywords: *tensioned reinforced concrete prisms, stresses of adhesion of reinforcement to concrete, crack formation, crack pitch, distance between cracks*

For citation: Pekin D. A. The Distance Between Normal Cracks – Important Experimental Characteristics of Reinforced Concrete. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2025, no. 7, pp. 18–25. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2025.07.18-25

Введение

Предельные относительные деформации растянутого железобетона и расстояние между нормальными трещинами в зависимости от типа бетона и его класса прочности на сжатие или растяжение, условий окружающей среды и видов нагружения, процента армирования, класса и профиля арматуры, наличия сцепления арматуры с бетоном и ряда других параметров являются исходными и важными механическими характеристиками для определения деформационного критерия [1], на основе которого планируется сформировать и продвигать новые механику стержневых железобетонных элементов, разделяемых по длине на блоки в местах образования нормальных трещин, и квазинелинейно-ступенчатый расчет [2], развивающие классические подходы [3, 4] и нормативные методы расчета [5].

© ПЕКИН Д. А., 2025

Эти параметры относятся к механическим характеристикам материала и, очевидно, должны определяться экспериментально в зависимости от перечисленных выше условий.

Цель работы — обосновать невозможность теоретического определения расстояния между нормальными трещинами в центрально растянутом железобетонном элементе, доказать необходимость проведения специальных экспериментов, предложенных в [1], и подчеркнуть существенные различия в задачах теорий сцепления и трещиностойкости.

Очевидно, что предельная растяжимость бетона в отсутствие арматуры и при ее наличии существенно различается, первым этот аспект в 1889 г. отметил французский инженер А. Консидер. Он сформулировал гипотезу, согласно которой «бетон, вооруженный железной арматурой, при растяжении как бы насыщается свойствами железа и приобретает от него часть упругих свойств», что позволяет в балке перейти от треугольной эпюры нормальных напряжений в растянутой зоне бетона к трапецеидальной благодаря его течению перед разрывом, что неоднократно подтверждено экспериментально, в том числе одним из первых проф. Я. В. Столяровым в [6, с. 388], и используется в СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».

Несмотря на очевидность данного свойства бетона вокруг арматуры для большинства исследователей, следует отметить, что оно достигается только при обеспечении их совместной работы, т. е. при наличии достаточного сцепления между ними, в то время как при его отсутствии или нарушении говорить об увеличении предельной растяжимости бетона вряд ли приходится. Сцепление арматуры с бетоном обеспечивается за счет адгезии, трения (малозначимые факторы) и в первую очередь контакта с профилем (выступами) арматуры при его (их) наличии [7—13]. Отсутствие сцепления даже при наличии анкеровки продольной арматуры на торцах элементов, например в предварительно напряженных железобетонных балках, существенно меняет характер трещинообразования и разрушения, вызывая снижение несущей способности до 30 % [14].

В статье [1] подробно рассмотрен классический подход проф. В. И. Мурашева [15, с. 115] к распределению продольных нормальных напряжений в арматуре и бетоне в зоне чистого изгиба балки между нормальными трещинами на основе примера, приведенного ранее проф. Я. В. Столяровым в [6, с. 393], в котором исследуется фрагмент призматического железобетонного элемента (ЖБЭ) между нормальными трещинами при осевом растяжении и зависимость распределения напряжений сцепления по длине арматуры согласно допущению американского исследователя Томаса, занимавшегося железобетоном. Принято считать, что напряжения в арматуре (бетоне) изменяются, уменьшаясь (увеличиваясь) от максимума (ноля) на границе трещины к минимуму (максимуму) в середине разделенного трещинами блока (*рис. 1*). На основе равновесия внутренних усилий по длине элементарного отрезка арматуры рассматриваемой призмы формулируется следующее известное выражение [6, с. 163] (с заменой отдельных обозначений параметров на общепринятые в настоящее время):

$$\tau_x = \frac{A_s}{u}\frac{d\sigma_{sx}}{dx}, \qquad (1)$$

где τ_x и σ_{sx} — напряжения сцепления и нормальные напряжения в арматуре; A_s и u — площадь и периметр арматурного стержня соответственно.

Согласно выражению (1) напряжения сцепления принимаются равными нулю в середине блока, поскольку производная нормальных напряжений в арматуре в данной точке экстремума равна нулю (см. минимальное значение σ_{sx} на эпюре напряжений в арматуре на *рис. 1*):

$$\frac{d\sigma_{sx}}{dx} = 0 \qquad (2)$$

и описывается следующим выражением от границы трещины до середины блока:

$$\tau_x = \tau_{\max}\left(1 - \frac{4x^2}{l_s^2}\right), \qquad (3)$$

где τ_x и $\tau_{\max}$ — напряжения сцепления по длине арматуры и на границе трещины; x и l_s — независимая переменная (абсцисса по длине арматуры) и расстояние между трещинами.

При подстановке в формулу (3) следующих значений независимой переменной получим:

$$x = 0 \rightarrow \tau_x = \tau_{\max}; \qquad (4)$$

$$x = l_s/2 \rightarrow \tau_x = 0. \qquad (5)$$

Для правой части блока эпюра напряжений сцепления принимается зеркальной относительно осей ординат и абсцисс, т. е. меняет знак, как показано с небольшими уточнениями характера эпюры напряжений сцепления вблизи границы трещин на рис. 33 в [15, с. 115] или на рис. 1 в [1, с. 36]. Далее, в [6, с. 394—397] приводится методика определения усилий сцепления, называемых тангенциальными:

$$T_x = u\int_0^x \tau_x dx = u\tau_{\max}\left(x - \frac{4x^3}{3l_s^2}\right), \qquad (6)$$

нормальных напряжений и относительных деформаций в арматуре и бетоне, ширины раскрытия трещин как функции смещения (скольжения) арматуры относительно бетона, и выполняется анализ полученных формул.

Модели и методы

Для экспериментального определения предельной растяжимости железобетона, независимо от информации в [6, с. 393–397], в статье [1] была предложена программа испытаний призматических железобетонных элементов на осевое растяжение с расположенным в центре поперечного сечения бетона арматурным стержнем, к выступам (свободным от бетона частям) которого прикладывается внешнее усилие. Кроме того, следует продолжить критическую оценку рассмотренной выше методики и предложить альтернативный подход для определения расстояния между нормальными трещинами и ширины их раскрытия в центрально растянутых железобетонных элементах. Сначала необходимо обратить внимание на параметры, входящие в формулы (1–6), и рассмотреть их физический смысл. Очевидно, что выражение (1) является результатом преобразований следующего уравнения равновесия:

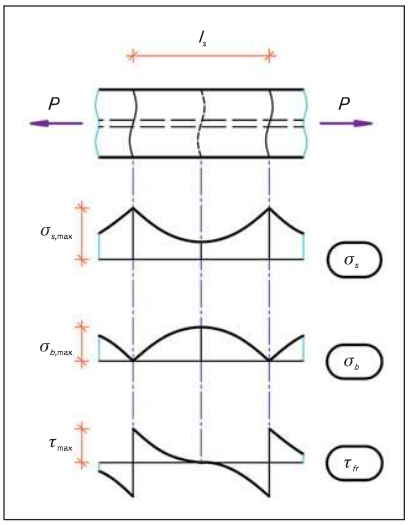


Рис. 1. *Участок железобетонной призмы с двумя нормальными трещинами [6, с. 393, фиг. 161]*

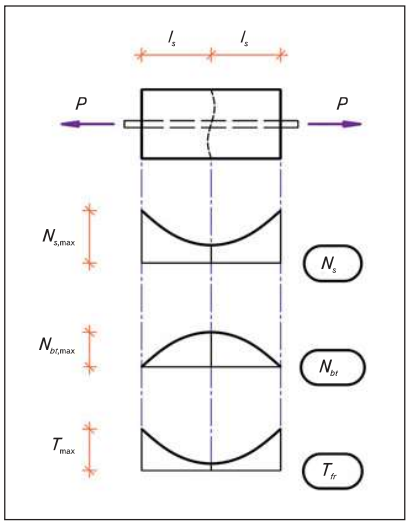


Рис. 2. *Образец железобетонной призмы, описанный в [1, с. 39], но условно показанный меньшей длины, равной $2l_s$*

$$u\tau_x dx = A_s d\sigma_{sx} = dN_{sx}, \qquad (7)$$

в котором периметр арматуры u и дифференциал независимой переменной dx перенесены в среднюю часть выражения (7). Кроме того, понятно, что следующие множители в левой части выражения τ_x и $\tau_x dx$ являются производной и дифференциалом функции усилий сцепления соответственно:

$$\tau_x = T_x' = \frac{dT_x}{dx}; \qquad (8)$$

$$\tau_x dx = T_x' dx = \frac{dT_x}{dx} dx = dT_x. \qquad (9)$$

Тогда выражение (7) с учетом (9) можно переписать следующим образом:

$$udT_x = dN_{sx}, \qquad (10)$$

где $T_x = N_{sx}/u$ – усилия сцепления по периметру арматуры, Н/мм; $N_{sx} = A_s\sigma_{sx}$ – усилия в арматуре, Н.

Также необходимо подчеркнуть, что усилия сцепления T_x в формулах (8–10) и полное тангенциальное усилие T_x (равнодействующая усилия в арматуре N_s) в формуле (6) – это разные физические величины, имеющие разную размерность, – Н/мм и Н соответственно.

Теперь с помощью выражения (10) можно вскрыть противоречие и объяснить наличие напряжений сцепления τ_x в середине блока между трещинами, несмотря на равенство (2), и до возникновения новой нормальной трещины. Понятно, что если правая часть выражения (10), являющаяся дифференциалом нормальных усилий в арматуре, равна нулю, то и левая часть, являющаяся произведением периметра сечения арматуры на дифференциал усилий сцепления равна нулю, но это совсем не значит, что значения этих функций, определяющих перечисленные усилия, обязательно равны нулю. Значения данных функций в этой точке могут быть либо минимальными, что соответствует равенству производной нулю в выражении (2), либо постоянными величинами на некотором участке по длине арматуры.

Или другой пример, объясняющий физический смысл производной. Известно [16], что мгновенная скорость движения точки – это производная перемещения по времени, а ускорение точки – это производная мгновенной скорости по времени:

$$a = dv/dt. \qquad (11)$$

Тогда, если принять правую часть выражения (11) равной нулю, то это совсем не означает, что точка находится в состоянии покоя при ускорении, равном нулю, поскольку она может двигаться с постоянной скоростью. То есть равенство нулю напряжений сцепления τ_x возможно только в случае равенства нулю нормальных напряжений в арматуре или бетоне, а также физически при взаимном смещении арматуры и бетона относительно друг

друга вследствие нарушения сцепления, которое может возникнуть гораздо позже при кратном увеличении напряжений в арматуре и, очевидно, не описывается выражениями (1) и (7).

Еще один пример, объясняющий геометрический смысл производной. Известно [16], что производная какой-либо функции одной независимой переменной – это тангенс угла наклона касательной к графику данной функции. Таким образом, равенство тангенса или производной нулю в какой-либо точке совсем не означает, что значения данной функции равны нулю. После преобразования выражения (7) в (1) теряется физический смысл величины τ_x, и вместо напряжений сцепления получаем тангенс угла наклона, умноженный на заданную постоянную, который может быть равным нулю только тогда, когда касательная к графику нормальных напряжений в арматуре параллельна горизонтальной оси координат.

Напряжения сцепления τ_x в выражении (8) формально являются производной функции усилий сцепления T_x по длине, которые, в свою очередь, являются отношением нормальных усилий N_{sx} в арматуре к ее периметру *u*. Следовательно, если в арматуре действуют какие-либо усилия, то усилия и напряжения сцепления не могут быть в принципе равными нулю, поэтому их эпюры на *рис. 1* [6, с. 393, фиг. 161] и [15, с. 115, рис. 33]) противоречат напряженному состоянию. Очевидно, что применительно к данному случаю рассмотрение условий равновесия в дифференциальной форме согласно выражению (1) и длине стержня, заданной в виде дифференциала независимой переменной dx в формуле (7), представляемого в качестве множителя и переносимого в правую часть выражения (1), что допустимо в математическом анализе для функций одной переменной, противоречит физическому смыслу напряжений сцепления, поскольку любые напряжения, в том числе касательные, – это отношение усилий к площади, но не тангенс угла наклона касательной к графику связанной функции, умноженный на заданную константу.

Далее будет предпринята попытка определить расстояние между нормальными трещинами центрально растянутого образца, показанного на *рис. 2*, с заменой обозначения независимой переменной x на l по аналогии с [4]. Для описания закона изменения нормальных напряжений в арматуре и бетоне или усилий сцепления по длине элемента будет также использоваться квадратичная зависимость по аналогии с выражением (3) для наглядности и возможности сравнения. По границе образца растягивающее усилие в арматуре N_{sl} соответствует внешней силе P, т. е. принимает максимальные значения.

По мере удаления от границы элемента эти усилия уменьшаются и в середине блока принимают свои минимальные значения, при этом усилия растяжения в бетоне N_{btl} увеличиваются и принимают максимальные значения, что описывается следующими выражениями:

$$P = N_{sl} + N_{btl}; \quad (12)$$

$$N_{sl} = N_{s,\min} + \frac{1}{l_s^2}(l_s - l)^2 (N_{s,\max} - N_{s,\min}), \quad (13)$$

где $N_{s,\max}$ и $N_{s,\min}$ – максимальное и минимальное усилия в арматуре; l – независимая переменная, характеризующая положение точки от границы образца (трещины) для вычисления соответствующего усилия в арматуре N_{sl}.

Тогда в момент образования нормальной трещины в середине образца (блока) и при подстановке характерных значений l в формулу (13) получим (*см. рис. 2*):

$$l = 0 \rightarrow N_{sl} = N_{s,\max} = N_{crc};$$
$$l = l_s \rightarrow N_{sl} = N_{s,\min} = N_{crc} - R_{bt,ser} A_{bt};$$
$$l = 2l_s \rightarrow N_{sl} = N_{s,\max} = N_{crc}.$$

Если проинтегрировать выражение (13) по независимой переменной (по длине) и результат поделить на расстояние от границы образца до l (на основе теоремы о среднем значении интегрального исчисления [16]), то получим среднее значение усилия в арматуре N_s на заданном участке:

$$N_{s,red} = \frac{1}{l}\int_0^l \left[N_{s,\min} + \frac{1}{l_s^2}(l_s - l)^2 \times \right. \quad (14)$$
$$\left. \times (N_{s,\max} - N_{s,\min}) \right] dL = N_{s,\min} +$$
$$+ \frac{N_{s,\max} - N_{s,\min}}{3l_s^2}(l^2 - 3l_s l + 3l_s^2).$$

На основе выражения (14) определить расстояние между нормальными трещинами не представляется возможным, поскольку при подстановке $l = l_s$ в правой части выражения l_s сокращается, т. е. какой бы закон распределения напряжений между арматурой и бетоном в центрально растянутой железобетонной призме (*см. рис. 2*) не принять (линейный, степенной, экспоненциальный и т. п.), теоретически определить данный параметр не получится.

Результаты исследования и их анализ

В большинстве случаев для определения расстояния между нормальными трещинами используются различные варианты параметров сцепления арматуры с бетоном, полученные на основе экспери-

Сравнение подходов к проведению экспериментальных исследований в теориях сцепления и трещиностойкости

Теория сцепления	Теория трещиностойкости
Проведение экспериментов для определения следующих параметров:	
• напряжений сцепления; • взаимного смещения арматуры и бетона; • распределения напряжений в бетоне вокруг арматуры; • образования и развития контактных трещин в бетоне по граням выступов арматуры; • депланации контактного (околоарматурного) слоя бетона; • деформаций арматуры и бетона; • длины анкеровки и перепуска арматуры; • прочности соединения и др.	• усилий образования нормальных трещин; • удлинений и предельных деформаций железобетона перед образованием нормальных трещин; • расстояния между нормальными трещинами в момент их образования; • появления новых трещин при увеличении нагрузки; • деформаций арматуры и бетона при увеличении нагрузки; • ширины и глубины раскрытия нормальных трещин и др.
Схема эксперимента и образцы для испытаний:	
• выдергивание (вдавливание) арматуры из бетонных или железобетонных призм или цилиндров, упертых торцом (в бетоне при этом возникают осевое сжатие и заметные поперечные деформации); • выдергивание (вдавливание) арматуры из бетонных или железобетонных массивных элементов; • осевое растяжение железобетонных призм или цилиндров с передачей усилия через выпуски арматуры (поперечное сечение таких образов исключает образование в бетоне нормальных трещин); • различные соединения, стыки и узлы	• балки с разными видами нагружений для получения чистого изгиба, сложного и объемного НДС; • стойки с разными видами нагружений; • осевое растяжение железобетонных призм с передачей усилия через выпуски арматуры, предложенное в [1] (важно отметить, что поперечное сечение таких образов должно обеспечивать образование в них первичных и вторичных нормальных трещин задолго до начала текучести арматуры)
Контролируемые параметры в процессе испытаний:	
• осевые напряжения и деформации в арматуре и бетоне; • смещения арматуры и бетона относительно друг друга; • образование и развитие контактных трещин вокруг арматуры; • и др.	• осевые напряжения и деформации в арматуре и бетоне (+ поперечные); • прогибы и жесткости элементов; • образование, ширина раскрытия и картина нормальных и наклонных трещин; • и др.
Передача внешних усилий (нагрузки):	
• в большинстве случаев с арматуры на бетон	• везде на поверхность железобетона и далее через бетон на арматуру

ментов по выдергиванию стержней из бетона [6, 13, 15]. Следует отметить, что при проектировании большинства вновь возводимых железобетонных конструкций за основу и в качестве аксиомы принимается требование о совместной работе бетона и арматуры, т. е. обеспеченного сцепления без взаимного смещения или проскальзывания, обозначаемого g и являющегося основным предметом рассмотрения теорий сцепления [12, 13].

Возможность взаимного смещения арматуры и бетона на I стадии НДС или на этапе образования первичных нормальных трещин при изгибе балки и наличии у нее периодического профиля практически исключена. В этой связи использование различных параметров сцепления арматуры с бетоном, учитывающих их взаимное смещение, для определения расстояния между нормальными трещинами, очевидно, является не самым подходящим критерием. Напротив, в СП 63.13330 это расстояние определяется столь упрощенно и неоднозначно, что зависит, по существу, только от площади растянутого бетона и периметра арматуры с периодическим профилем:

$$\varphi_2 l_s = \frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{A_{bt}}{A_s} d_s = \frac{A_{bt}}{nu} = \frac{A_{bt} A_s}{nuA_s} = \frac{A_{bt}\pi d_s^2}{4 A_s \pi d_s} = \frac{1}{4}\frac{A_{bt}}{A_s} d_s \rightarrow \varphi_2 l_s nu = A_{bt}, \quad (15)$$

где n и d_s – количество стержней и их диаметр.

Таким образом, площадь поверхности арматурных стержней периодического профиля, ограниченная двумя нормальными трещинами, равна площади поперечного сечения растянутого бетона. Та-

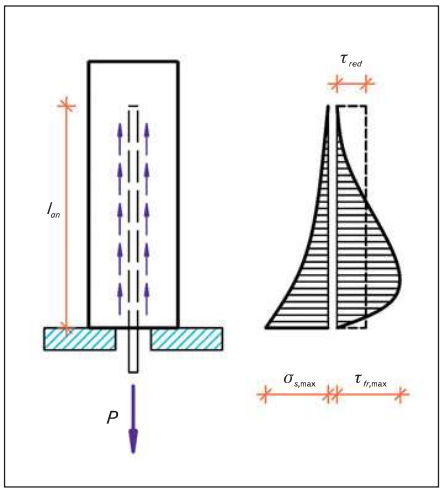
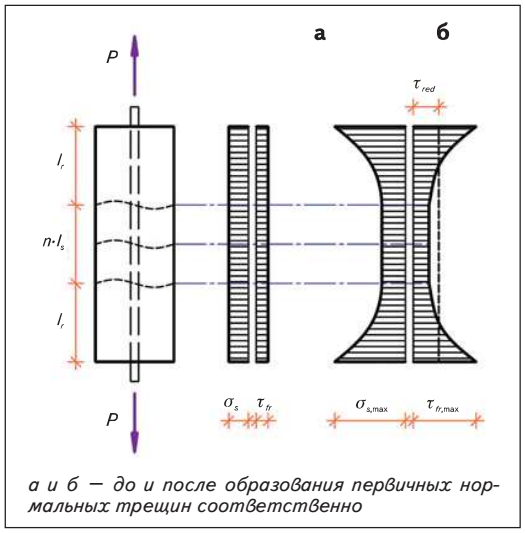


Рис. 3. ***Эпюра напряжений сцепления при напряжениях в арматуре, сопоставимых с пределом текучести стали, в образце, упертом торцом***



а и б — до и после образования первичных нормальных трещин соответственно

Рис. 4. ***Эпюра напряжений сцепления в центрально растянутом образце***

кой критерий, как отмечалось ранее в [4], существенно завышает расстояние между нормальными трещинами и вследствие этого ширину их раскрытия.

Эпюра напряжений сцепления, приводимая в большинстве учебников по железобетону (*рис. 3*) и полученная на основе экспериментов по выдергиванию арматуры из бетонных призм, упертых торцом и находящихся в состоянии осевого сжатия, показывает, что при некоторой достаточной длине анкеровки стержня нормальные растягивающие напряжения по его длине затухают и на концах равны нулю, как и напряжения сцепления. На основе подобных экспериментов измеряются относительные деформации в арматуре в зависимости от внешней нагрузки, далее определяются усилия и напряжения сцепления по длине элемента, требуемая длина анкеровки стержней в бетоне и средние напряжения сцепления, которые в дальнейшем используются для определения расстояния между нормальными трещинами. Как подчеркивалось ранее в [1] и показано на примерах выше, растягивающие напряжения в бетоне и арматуре в зоне чистого изгиба в момент образования нормальных трещин не могут быть равными нулю, как и напряжения сцепления, поскольку при заданной фиксированной внешней нагрузке являются постоянными. Важно отметить, что напряжения сцепления пропорциональны напряжениям в арматуре только при работе контактного (околоарматурного) слоя в упругой стадии, т. е. при отсутствии смещения и нарушения сцепления арматуры с бетоном.

Стадии НДС контактного слоя бетона с арматурой периодического профиля подробно рассмотрены в диссертации Г. Д. Георгиева «Сцепление арматуры с бетоном при постоянных и переменных нагрузках» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности «Строительные конструкции»: I — упругая; II — упруго-пластическая; III — скольжение; IV — полный срез бетонных выступов; V — трение.

Также, как и в железобетонных балках, стадии меняются по длине элемента и зависят от положения рассматриваемого сечения. Например, на *рис. 3* по длине стержня можно проследить не менее трех из вышеперечисленных стадий от начала заделки (стадия III) к концу стержня (стадия I). Очевидно, что при нагрузке P, соответствующей усилию образования нормальных трещин, по всей длине арматуры будет действовать стадия I даже после их появления (*рис. 4*), в связи с чем использование аппарата теории сцепления нецелесообразно на данном этапе.

Еще одним аргументом в пользу этого утверждения будет следующее противоречие в технической теории сцепления (ТТС), развитой автором в монографии [17] на основе статьи [13]. В статье [13] отмечается, что контактные трещины, возникающие у грани выступов арматуры периодического профиля, в образцах упертых торцом, т. е. в сжатом бетоне, развиваются вдоль оси стержня в габаритах контактного слоя, а в центрально растянутых образцах — перпендикулярно оси и выходят за границы контактного слоя в бетонную оболочку, и поэтому не являются предметом рассмотрения ТТС. Несмотря на это автором предпринимается попытка практического применения ТТС для определения расстояния между нормальными трещинами [17, с. 150] в центрально растянутых образцах, которая принципиально не отличаются от классических положений, рассмотренных проф. Я. В. Столяровым в [6, с. 393] и проф. В. И. Мурашевым [15, с. 115], кроме необходимости использования уже двух параметров сцепления и задания смещения равным нулю ($g = 0$), что, очевидно, не позволяет корректно определить искомое расстояние, особенно в упругой стадии работы контактного слоя. Кроме того, ТТС в [17] не рассматривает возможность применения гладкой арматуры и спустя большой период развития игнорирует сделанные

проф. А. А. Гвоздевым в [7] замечания к [13], требуемые для решения задач и развития железобетона.

Представляется необходимым перечислить нюансы и подчеркнуть различия в подходах к проведению экспериментальных исследований для изучения природы сцепления арматуры с бетоном и трещиностойкости *(см. таблицу)*.

На основе *таблицы* можно сделать вывод о том, что классический предмет рассмотрения и экспериментальная база теорий сцепления на середину 1980-х гг., конечно, имеют сходство с теорией трещиностойкости, но тем не менее не позволяют ответить на главный вопрос – сколько первичных трещин образуется в центрально растянутой железобетонной призме, показанной на *рис. 4* и описанной в статье [1], без использования дополнительных экспериментальных характеристик. Следующий важный вопрос, на который нет ответа в [12, 13, 17], – возможность появления и количество вторичных трещин в железобетонном образце при осевом растяжении по мере достижения в арматуре предела текучести. За прошедшие годы в области теорий сцепления и трещиностойкости выполнен ряд новых работ, которые будут рассмотрены в следующей статье.

Нетрудно увидеть сходство между такими механическими характеристиками железобетона, определяемыми экспериментально, как модуль упругости бетона (в области упругих деформаций) или арматуры, и расстоянием между нормальными трещинами:

$$E_s = \frac{\sigma_s}{\varepsilon_{s0}} \text{ и } l_s = \frac{\Delta l_s}{\varepsilon_{bt0}}. \qquad \textbf{(16)}$$

То есть перед образованием трещин отношение предельного удлинения Δl_s отдельного фрагмента опытного образца длиной l_s к предельной относительной деформации ε_{bt0} определяет расстояние между нормальными трещинами так же, как отношение нормального напряжения к относительной продольной деформации, соответствующих пределу пропорциональности стали σ_{pr}, определяет модуль упругости арматуры. Только зависит это расстояние l_s от гораздо большего количества факторов: класса бетона по прочности при сжатии и его производных; коэффициентов армирования сечения и приведения стали к бетону; условий окружающей среды; скорости приложения нагрузки и др. Понятно, что при таком многообразии факторов влияющих на данную характеристику для проведения испытаний железобетонных призм, предложенных в статье [1], длина образцов должна кратно превышать расстояние между нормальными трещинами и учитывать возможный разброс значений этой величины в связи относительно небольшими габаритами поперечного сечения 100×100 мм образца и возможными пороками в структуре бетона.

Предельная растяжимость железобетона и расстояние между нормальными трещинами по своей значимости не уступают начальному модулю упругости бетона и по мере увеличения напряжений в арматуре и нарушения сцепления с бетоном могут меняться по аналогии с модулем деформации бетона.

Выводы

1. Теория сцепления и ТТС как ее подраздел не позволяют теоретически определить расстояние между нормальными трещинами в центрально растянутых железобетонных элементах без использования других, новых дополнительных физических параметров по результатам многочисленных исследований на момент до середины 1980-х гг.

2. Большинство экспериментальных работ в области теории сцепления и ТТС проводились на массивных, центрально растянутых и упертых торцом образцах, в которых исключалось образование нормальных трещин в бетоне, в связи с чем эти результаты мало применимы к задачам теории трещиностойкости по образованию первичных трещин.

3. В упругой стадии работы контактного слоя напряжения сцепления при наличии нормальных напряжений в арматуре не могут быть равными нулю, но начинают уменьшаться при возникновении скольжения между арматурой и бетоном.

4. Теоретически определить расстояние между первичными нормальными трещинами и возможность образования вторичных трещин по мере достижения напряжениями в арматуре предела текучести в центрально растянутых железобетонных образцах не представляется возможным.

5. Экспериментальное определение предельной растяжимости железобетона и расстояния между нормальными трещинами по своей значимости не уступает такой механической характеристике, как начальный модуль упругости бетона, и требует проведения предложенных в статье [1] испытаний.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Пекин Д. А.* Деформационный критерий образования нормальных трещин в железобетонных балках при плоском изгибе // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 8. № 4. С. 33–43.
2. *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
3. *Пекин Д. А.* Стадии напряженно-деформированно-

го 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

4. *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
5. *Пекин Д. А.* Нелинейные расчеты и «перераспределение» усилий в защемленной железобетонной балке при плоском изгибе // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 8. С. 41–47. doi: 10.33622/0869-7019.2024.08.41-47
6. *Столяров Я. В.* Введение в теорию железобетона. М., Л. : Госстройиздат, 1941. 447 с.
7. *Гвоздев А. А.* Состояние и задачи исследования сцепления арматуры с бетоном // Бетон и железобетон. 1968. № 12. С. 1–4.
8. *Байков В. Н.* Сцепление арматуры с бетоном в конструкциях. Там же. С. 13–16.
9. *Мулин Н. М.* Экспериментальные данные о сцеплении арматуры с бетоном. Там же. С. 16–18.
10. *Ахвердов И. Н.* Влияние усадки, условий твердения и циклических температурных воздействий на сцепление арматуры с бетоном. Там же. С. 4–7.
11. *Кольнер В. М.* Сцепление арматуры с бетоном при динамических и циклических нагрузках. Там же. С. 18–20.
12. *Оатул А. А.* Предложения к построению теории сцепления арматуры с бетоном. Там же. С. 8–10.
13. *Холмянский М. М.* Техническая теория сцепления арматуры с бетоном и ее применение. Там же. С. 10–13.
14. *Леонгардт Ф., Гаранин В. Н.* Предварительно напряженный железобетон. М. : Стройиздат, 1983. 244 с.
15. *Мурашев В. И.* Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона (основы сопротивления железобетона). М. : Машстройиздат, 1950. 268 с.
16. *Фихтенгольц Г. М.* Основы математического анализа. Ч. 1. СПб. : Лань, 2015. 448 с.
17. *Холмянский М. М.* Контакт арматуры с бетоном. М. : Стройиздат, 1981.184 с.

REFERENCES

1. Pekin D. A. Deformation criterion for the formation of normal cracks in reinforced concrete beams during flat bending. *Zhelezobetonnyye konstruktsii*, 2024, vol. 8, no. 4, pp. 33–43. (In Russ.).
2. Pekin D. A. Mechanics of reinforced concrete beams with normal cracks during flat bending. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*, 2024, no. 10, pp. 12–23. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2024.10.12-23
3. Pekin D. A. Stages of stress-strain state of reinforced concrete beams with normal cracks during flat bending. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*, 2024, no. 9, pp. 59–67. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2024.09.59-67
4. Pekin D. A. Improving the methodology for calculating the base distance between normal cracks in bent reinforced concrete elements. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*, 2022, no. 12, pp. 10–15. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2022.12.10-15
5. Pekin D. A. Nonlinear calculations and "redistribution" of forces in a pinched reinforced concrete beam with a flat bend. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*, 2024, no. 8, pp. 41–47. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2024.08.41-47
6. Stolyarov Ya. V. *Vvedeniye v teoriyu zhelezobetona* [Introduction to the theory of reinforced concrete]. Moscow, Leningrad, Gosstroyizdat Publ., 1941. 447 p. (In Russ.).
7. Gvozdev A. A. The state and objectives of the study of reinforcement adhesion to concrete. *Beton i zhelezobeton*, 1968, no. 12, pp. 1–4. (In Russ.).
8. Baykov V. N. Reinforcement bonding to concrete in structures. *Ibid*, pp. 13–16. (In Russ.).
9. Mulin N. M. Experimental data on the adhesion of reinforcement to concrete. *Ibid*, pp. 16–18. (In Russ.).
10. Akhverdov I. N. The effect of shrinkage, hardening conditions and cyclic temperature effects on the adhesion of reinforcement to concrete. *Ibid*, pp. 4–7. (In Russ.).
11. Kol'ner V. M. Reinforcement adhesion to concrete under dynamic and cyclic loads. *Ibid*, pp. 18–20. (In Russ.).
12. Oatul A. A. Proposals for the construction of a theory of reinforcement bonding to concrete. *Ibid*, pp. 8–10. (In Russ.).
13. Kholmyanskiy M. M. The technical theory of reinforcement bonding to concrete and its application. *Ibid*, pp. 10–13. (In Russ.).
14. Leongardt F., Garanin V. N. Predvaritel'no napryazhennyy zhelezobeton [Prestressed reinforced concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 244 p. (In Russ.).
15. 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, Mashstroyizdat Publ., 1950. 268 p. (In Russ.).
16. Fihtengol'c G. M. Osnovy matematicheskogo analiza [Fundamentals of mathematical analysis]. Vol. 1. St. Petersburg, Lan' Publ., 2015. 448 p. (In Russ.).
17. Kholmyanskiy M. M. Kontakt armatury s betonom [Rebar contact with concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981. 184 p. (In Russ.).