2024. 4(8). 33–43
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ
REINFORCED CONCRETE STRUCTURES (ZHELEZOBETONNYYE KONSTRUKTSII)
ISSN 2949-1622 (PRINT)
ISSN 2949-1614 (ONLINE)
HTTPS://G-B-K.RU

УДК 69.04
DOI: 10.22227/2949-1622.2024.4.33-43

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH ARTICLE

Деформационный критерий для определения расстояния между нормальными трещинами в железобетонных балках при плоском изгибе

Д.А. Пекин[1*]

[1] *ООО «ИНВ-Строй», Подольск, Московская область, Российская Федерация*

* dpekin@mail.ru

Ключевые слова: нормальная трещина, деформационный критерий, расстояние между трещинами, железобетонная балка, плоский изгиб

История статьи
Поступила в редакцию: 30.10.2024
Доработана: 05.11.2024
Принята к публикации: 07.11.2024

Для цитирования
Пекин Д.А. Деформационный критерий для определения расстояния между нормальными трещинами в железобетонных балках при плоском изгибе // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 8. № 4. С. 33–43.

Аннотация. Выполнен краткий обзор развития нового раздела механики деформируемого твердого тела — механика железобетона. Для стержневых железобетонных элементов обосновывается целесообразность выделения нового подраздела — механики стержневых железобетонных элементов с нормальными трещинами. Подробно рассмотрены классические предпосылки и допущения для определения расстояния между нормальными трещинами в состоянии чистого изгиба и обосновывается необходимость их полного пересмотра на основе предельной растяжимости бетона и выработкой деформационного критерия. Предложена программа экспериментальных исследований для определения предельной растяжимости бетона совместно с арматурой при осевом растяжении призматических образцов. Рассмотрен пример определения расстояния между нормальными трещинами для консольной балки при действии равномерно распределенной нагрузки.

Deformation Criterion for Determining the Distance Between Normal Cracks in Reinforced Concrete Beams under Plane Bending

D.A. Pekin[1*]

[1] *"INV-Stroy" LLC, Podolsk, Moscow region, Russian Federation*
* dpekin@mail.ru

Keywords: normal crack, deformation criterion, distance between cracks, reinforced concrete beam, plane bending

Article history
Received: 30.10.2024
Revised: 05.11.2024
Accepted: 07.11.2024

Abstract. A brief review of the development of a new section of solids mechanics ─ mechanics of reinforced concrete ─ is given. For rod reinforced concrete elements, the expediency of allocating a new subsection – mechanics of rod reinforced concrete elements with normal cracks — is substantiated. Classical prerequisites and assumptions for determining the distance between normal cracks in the state of pure bending are considered in detail, and the need for their complete revision based on the ultimate tensile strength of concrete and the development of a deformation criterion is substantiated.

Дмитрий Анатольевич Пекин, кандидат технических наук, главный конструктор, ООО «ИНВ-Строй», 142105, г. Подольск, ул. Пионерская, д. 6-30; eLIBRARY SPIN-код: 9448-4562, Scopus: 57209306984, ORCID: 0000-0002-6701-2511, E-mail: dpekin@mail.ru

© Пекин Д.А., 2024
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

For citation
Pekin D.A. Deformation Criterion for Determining the Distance Between Normal Cracks in Reinforced Concrete Beams under Plane Bending. *Reinforced Concrete Structures*. 2024; 4(8):33-43.

A program of experimental studies is proposed to determine the ultimate tensile strength of concrete together with reinforcement during axial tension of prismatic specimens. Another example of determining the distance between normal cracks for a cantilever beam under the action of uniform loading is considered.

ВВЕДЕНИЕ

Основы сопротивления железобетона, заложенные профессором В.И. Мурашевым в [1], являются развитием *сопротивления материалов* и учитывают специфику не только бетона как многокомпонентного и неоднородного материала, но и новые свойства, которые после добавления в него арматуры требуют рассмотрения уже принципиально нового строительного материала как железобетон, в котором кратно более низкие прочностные характеристики бетона на растяжение, относительно сжатия, уже не оказывают решающего значения при определении несущей способности. В это же время профессором А.А. Гвоздевым активно развивался метод предельного равновесия [2] для расчета статически неопределимых стержневых систем, пластин и оболочек, с помощью которого определялась разрушающая нагрузка без учета вопросов усталости, длительного сопротивления, динамических воздействий и деформированного состояния конструкций. В скором времени советскими учеными были опубликованы работы по теории прочности [3], пластичности [4] и ползучести [5] бетона и железобетона, которые развивали другие разделы *механики деформируемого твердого тела* [6] и в конце XX в. были обобщены профессором Н.И. Карпенко в новый раздел — *механика железобетона* [7]. Термин *сопротивление железобетона* как подраздел *механики железобетона* не нашел широкого распространения и практически не используется в литературе. Результаты его развития за прошедшие 30 лет в России на основе классических предпосылок *сопротивления материалов* реализовались в нелинейную деформационную модель [8–15], которая так и не позволяет решить главную задачу стержневых железобетонных конструкций — определение реалистичной картины напряженно-деформированного состояния (НДС) в массовом проектировании [16]. В этой связи и на основе принципиально другого подхода к рассмотрению механизма образования и раскрытия нормальных трещин [17–19] предлагается выделить новый подраздел в *механике железобетона* и назвать его *механика стержневых железобетонных элементов с нормальными трещинами*.

Принципиальные отличия нового подраздела заключаются в разделении элементов вдоль продольной оси на блоки по границе возникновения нормальных трещин, положение которых определяется на основе нового деформационного критерия, и отказе от использования традиционных для *сопротивлений материалов* и *железобетона* гипотезы плоских сечений или кинематической гипотезы Тимошенко в сечениях с нормальными трещинами и применении квазинелинейно-ступенчатого метода расчета на основе аппарата современной строительной механики [19]. Для реализации данного предложения, в первую очередь, необходимо сформулировать новый критерий образования нормальных трещин по длине балки на основе предельной растяжимости бетона, именно поэтому он назван деформационным и также как нелинейная деформационная модель берет свое начало от второй классической теории прочности — наибольших относительных удлинений. Далее необходимо увязать ширину раскрытия и увеличение глубины (снижение высоты сжатой зоны бетона) нормальных трещин с приращением нагрузки, увеличением прогибов, развитием пластических деформаций и ползучести в сжатой зоне бетона за счет нового кинематического фактора [19].

Dmitry A. Pekin, Candidate of Technical Sciences, Chief Structural Engineer, "INV-story"" LLC, 6-30 Pionerskaya st., Podolsk, 142105, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9448-4562, Scopus: 57209306984, ORCID: 0000-0002-6701-2511, E-mail: dpekin@mail.ru

Важно еще раз подчеркнуть, что железобетон — это новый строительный материал, в связи с чем бетонные и железобетонные конструкции необходимо рассматривать раздельно, используя разный инструментарий для определения НДС, поскольку после образования нормальных трещин и дальнейшего роста нагрузки в изгибаемых железобетонных конструкциях происходит депланация этих поперечных сечений с трещинами, которая не позволяет использовать одинаковые (равные) коэффициенты приведения стали к бетону в сжатой и растянутой зонах армирования [18].

Расстояние между нормальными трещинами в железобетонных балках зависит от множества факторов, но в первую очередь, от предельной растяжимости бетона вокруг продольной арматуры, и во многом определяет ширину их раскрытия и соответствие требованиям второй группы предельных состояний по трещиностойкости. В СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01–2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» предельная относительная осевая деформация растяжения бетона принимается равной ε_{bt} = 0,0001 для нагрузок непродолжительного действия и в диапазоне от 0,00021 до 0,00028 для нагрузок продолжительного действия в зависимости от относительной влажности воздуха. Кроме того, предлагается учитывать пластическую работу бетона на растяжение и применять аналогичные по форме двух- и трехступенчатые диаграммы сжатия «σ–ε» с заменой параметров R_b, σ_b, ε_b на R_{bt}, σ_{bt}, ε_{bt}, соответственно, согласно п. 6.1.22 СП 63.13330, что принципиально противоречит результатам экспериментов, рассмотренных в работе профессора В.И. Мурашева [1] (см. раздел 4, а), о том, что нормальные трещины сравнительно быстро достигают некоторой предельной величины, мало удлиняясь после этого до начала разрушения, и не соответствует неоднородной многокомпонентной структуре искусственного материала (камня), неспособного испытывать пластические деформации при растяжении. В этой связи вызывает большие сомнения необходимость использования разных значений предельной относительной осевой деформации растяжения бетона для нагрузок продолжительного и непродолжительного действия, а также кратно большие значения относительных деформаций, предложенные в СП 63.13330 для нагрузок продолжительного действия. Существенные различия в прочности бетона на растяжение и сжатие, очевидно, продиктованы разными механизмами разрушения материала, что приводит к невозможности использования одинаковых подходов в назначении подобных механических характеристик, что в пределе, например в механике грунтов, можно продемонстрировать на дисперсных грунтах в виде полного отсутствия сопротивления растяжению. Другим подтверждением этих аспектов может являться отсутствие деформационных характеристик бетона на растяжение в Еврокод 2 и невозможность применения диаграмм сжатия «σ–ε» для напряженно-деформированного состояния бетона при растяжении. Следует отметить, что эффективное армирование бетона принципиально меняет ряд его свойств и характер разрушения, снижается влияние пороков структуры материала на механические характеристики и, по сути, получается новый строительный материал — железобетон, для рассмотрения которого необходимо использовать уже модифицированные подходы.

В статье [17] на примере консольной железобетонной балки с несимметричным армированием, сосредоточенной внешней силой на свободном конце, классами прочности бетона В25 и арматуры А500 при проценте армирования μ_s = 0,84 % предлагается использовать предельную относительную деформацию бетона при растяжении в качестве деформационного критерия для определения расстояния между нормальными трещинами, и при значении ε_{bt0} = 0,00007 (снижение на 30 %) с сохранением остальных параметров выражения (8) получено расстояние между 1 и 2-й нормальными трещинами, равное 23 см, что гораздо ближе к значениям, полученным согласно методикам СНиП 2.03.01–84 (14,9 см) и Еврокод 2 (17,4 см), чем в СП 63.13330 (70 см по результатам расчета и принимаемое не более 40 см согласно п. 8.2.17). Очевидно, что при дальнейшем снижении ε_{bt0} на основе проведения соответствующих экспериментов в зависимости от класса прочности бетона, процента армирования,

класса арматуры и других параметров могут быть получены требуемые более точные значения данной характеристики для использования предложенного деформационного критерия.

Принято считать [1] (см. раздел 4, а и рис. 33), что в зоне чистого изгиба по длине балки первая нормальная трещина образуется в наиболее слабом месте с наименьшей прочностью бетона растяжению, а новая нормальная трещина образуется в сечении, удаленном от первой трещины на расстоянии, достаточном для снижения напряжений в арматуре до величины, отвечающей напряжению в бетоне при появлении второй трещины. Графическая иллюстрация фрагмента по длине балки в состоянии чистого изгиба (M = const) с эпюрами продольных усилий в растянутой зоне и напряжений сцепления повторяется на рис. 1 (см. рис. 33 [1]).

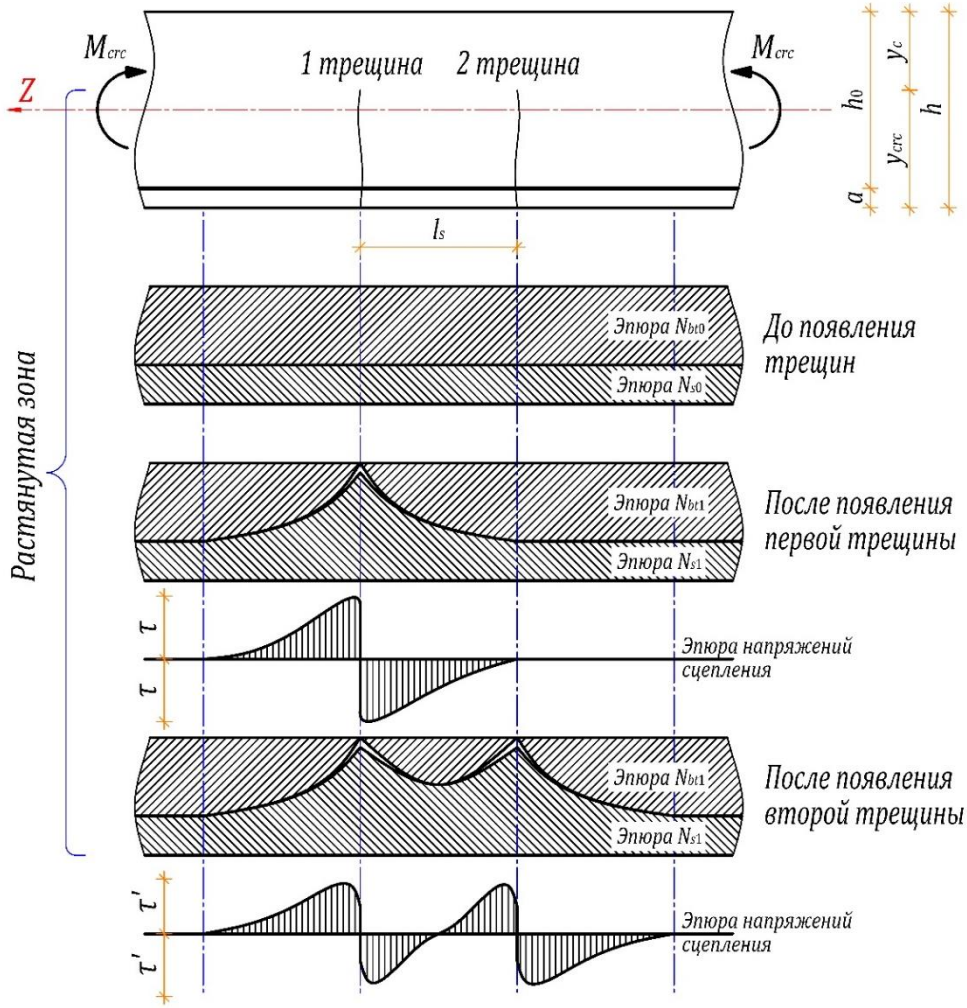

Рис. 1. Эпюры нормальных усилий и напряжений сцепления в растянутой зоне балки в состоянии чистого изгиба при появлении первых трещин [1, рис. 33]

Fig. 1. Diagrams of normal forces and adhesion stresses in the tensile zone of a beam in a state of pure bending when the first cracks appear [1, fig. 33]

В этой предпосылке профессора В.И. Мурашева и ее графической иллюстрации на рис. 1 скрыта большая неопределенность, которую необходимо подробно рассмотреть и исключить:

1. До появления первой трещины высота растянутой зоны поперечного сечения близка к половине высоты балки и суммарное растягивающее усилие составляет: $N_{bt0} + N_{s0}$, где N_{bt0} — равнодействующая в растянутом бетоне; N_{s0} — усилие в растянутой арматуре (см. эпюры на рис. 1). В момент появления первой трещины и при ее глубине более половины высоты сечения усилие в растянутой арматуре уже не равно предыдущему суммарному растягивающему

усилию до образования трещины [18] и заметно превышает его: $N_{s1} >> N_{bt0} + N_{s0}$, таким образом следующая на рис. 1 иллюстрация эпюр N_{bt1} и N_{s1} после образования первой трещины не может соответствовать действительной картине распределения усилий в растянутой зоне с нормальной трещиной.

2. После появления первой трещины растягивающие напряжения в бетоне вблизи ее границы практически обнуляются, но это противоречит истории нагружения элемента и эпюре напряжений сцепления, приведенной ниже для этого этапа нагружения, т.е. если при образовании первой трещины растягивающие напряжения в арматуре скачкообразно увеличиваются, то это совсем не значит, что на небольшом удалении от нее напряжения растяжения в бетоне принципиально уменьшаются относительно тех, которые действовали в момент образования нормальной трещины, следовательно, растягивающие напряжения в бетоне не могут иметь такую эпюру даже, если рассматривать гладкую арматуру, в которой нарушается сцепление по границам нормальной трещины.

3. Напряжения сцепления бетона с арматурой до момента образования первой нормальной трещины равны нулю; после образования первой трещины принципиально увеличиваются по ее границам и имеют разные знаки; полностью затухают на расстоянии до второй нормальной трещины; обнуляются по середине между первой и второй нормальными трещинами — в совокупности такое поведение и эпюры напряжений сцепления могут соответствовать отдельным, не связанным между собой бетонным призмам, не находящимся в состоянии изгиба и в составе железобетонной балки, из которых выдергивают арматурные стержни.

4. Напряжения в растянутой арматуре даже после образования нормальных трещин в несколько раз меньше тех, которые будут действовать при продолжительном действии нагрузки на стадии эксплуатации, не говоря уже о стадии разрушения, таким образом при наличии сцепления арматуры с бетоном аналогичная процедура образования нормальных трещин должна многократно повториться между первой и второй трещинами на основе этих предпосылок, что приведет к полному выключению работы бетона на растяжение между ними и замещению эпюрой усилий арматуры эпюры усилий бетона.

На примере консольной железобетонной балки сечением 300 × 500 (h) мм в статье [17] усилие растяжения, способное восприниматься бетоном класса В25 на основе нормативного сопротивления R_{bt} = 1,55 МПа, составит P = 58,125 кН, в то время как усилие растяжения, способное восприниматься арматурой из 3Ø22 А500 в стадии разрушения, также на основе нормативного сопротивления составит P = 570 кН, т.е. почти на порядок больше.

Растягивающие напряжения в продольной арматуре до образования первой трещины ориентировочно составляют $\sigma_{s0} = \alpha R_{bt} = 6{,}7 \cdot 1{,}55 = 10{,}4$ МПа, где $\alpha = E_s/E_b = 6{,}7$, таким образом напряжения сцепления не могут равняться нулю, далее после образования нормальной трещины растягивающие напряжения σ_{s1} в сечении с трещиной вырастут обратно пропорционально снижению приведенного момента инерции поперечного сечения с учетом трещины [18], следовательно, напряжения сцепления по границам нормальной трещины увеличатся пропорционально по аналогии.

5. Данный подход к назначению расстояния между нормальными трещинами не учитывает возможность полного отсутствия сцепления продольной арматуры с бетоном, например, для случаев построечного натяжения канатной арматуры на бетон, находящейся в антикоррозионной смазке внутри пластиковой трубки (которая в большинстве случаев конечно должна комбинироваться с арматурой периодического профиля), или при заводском изготовлении сборных железобетонных двутавровых и тавровых балок или ТТ-плит с натяжением канатной арматуры на упоры и при необходимости частично по длине без сцепления с бетоном (ближе к концам элемента для снижения влияния выгиба от предварительного напряжения) посред-

ством укладки в аналогичных пластиковых трубках и конструктивной арматурой периодического профиля по всей длине.

6. Кроме того, состояние чистого изгиба и подобный процесс нагружения ($M = M_{crc}$) практически не встречаются в реальных конструкциях зданий и сооружений, даже если на главную балку (ригель) опираются всего две второстепенные балки на одинаковом расстоянии от опор (колонн), поскольку равномерно распределенная нагрузка от собственного веса конструкций перекрытия приводит к возникновению изгибающего момента заметно большего, чем момент трещинообразования ($M >> M_{crc}$), и начинает действовать раньше или одновременно с сосредоточенными силами, что исключает постоянные по длине изгибающий момент и кривизну элемента.

На основе деформационного критерия расстояние между нормальными трещинами определяется с учетом следующих предпосылок [17] и иллюстрируется на рис. 2 (изгибающий момент и высоты эпюр усилий арматуры и бетона показаны постоянными по длине балки условно, только для наглядности и сравнения с исходными эпюрами на рис. 1, кроме того, согласно [18], принимается следующее допущение: $y_{crc} \cong y_t \cong h/2$ при $M = M_{crc}$, т.е. глубина нормальной трещины y_{crc} принимается равной высоте растянутой зоны бетона y_t до ее образования):

- первая нормальная трещина в балке возникает в зоне действия максимального изгибающего момента от постоянных нагрузок при достижении им значения $M = M_{crc}$;
- относительные деформации растяжения на участке между первой, второй и следующими нормальными трещинами принимаются равномерно распределенными или усредненными по длине растянутой грани элемента;
- следующие нормальные трещины возникают на расстоянии, определенном с учетом предельной растяжимости бетона, характера нагрузок, граничных условий и т.д.

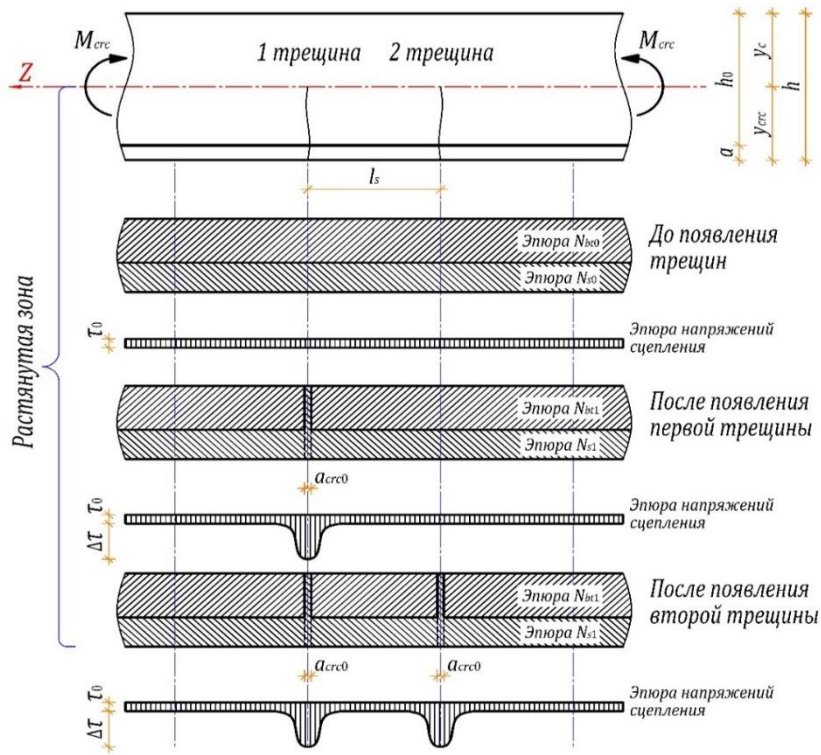

Рис. 2. Эпюры нормальных усилий и напряжений сцепления в растянутой зоне балки при появлении первых трещин согласно [17]

Fig. 2. Diagrams of normal forces and adhesion stresses in the tensile zone of a beam when the first cracks appear according to [17]

МЕТОД

Для определения деформационного критерия на основе предельной растяжимости бетона вокруг продольной арматуры необходимо провести серию специальных экспериментов на осевое растяжение железобетонных образцов (призм), в которых усилия растяжения на бетон должны передаваться через арматуру по следующим причинам:

- характер разрушения растянутого бетонного элемента без продольной арматуры может существенно отличаться от железобетонного элемента, т.е. возникнет хрупкое разрушение в наиболее слабом сечении без возможности наблюдения и образования нескольких трещин по длине элемента;
- снижается вероятность искажения НДС образцов за счет влияния сложного напряженного состояния бетона в месте его обжатия при передаче растягивающего усилия на призмы, т.е. обеспечивается принцип Сен-Венана об отсутствии влияния способа приложения нагрузки на некотором удалении от места ее приложения;
- возможность исследования и анализа фактора сцепления арматуры с бетоном и др.

Использование для решения этой задачи железобетонных образцов балочного типа с проведением испытаний на изгиб заметно усложнит эксперимент, кроме того, может вызвать некоторое искажение результатов относительно любых стержневых расчетных моделей за счет имеющегося в действительности вертикального давления бетона на арматуру, которое не учитывается за счет использования статической гипотезы — отсутствия вертикальных нормальных напряжений по толщине элементов, т.е. давления слоев друг на друга, эффект которого при расчете по трещиностойкости необходимо учитывать отдельно, так же как и фактор сцепления арматуры с бетоном.

Образцы и схему проведения эксперимента для определения деформационного критерия на основе предельной растяжимости бетона предлагается выполнить следующим образом:

1. Для испытаний использовать стандартные разрывные машины, обеспечивающие возможность приложения растягивающего усилия в долях от предельного усилия, воспринимаемого бетоном без учета арматуры, например по 20 % или меньше, последующего его увеличения до предела текучести арматуры также с шагом 20 % и дальнейшего ее разрыва.

2. Подготовить железобетонные призмы из заводского тяжелого бетона сечением 100 × 100 мм с установленным по центру сечения арматурным стержнем, выступающим за грани призмы на ~50 мм (или меньше в зависимости от возможности крепления в разрывной машине).

3. Высоту призмы принять максимальной из расчета возможности установки образцов в разрывную машину и их удлинения в процессе испытания, т.е. чем больше длина образцов, тем лучше, но не менее 500 мм.

4. Варьировать классы тяжелого бетона по прочности на сжатие (не менее трех: B25, B30, B35), классы (A240, A400, A500 — два вида профилей) и диаметры (не менее четырех: 12, 16, 20, 25 мм) арматуры.

5. Усилие растяжения на арматуру передавать с выдержкой по времени не менее 10 мин, и отдельно в каждой группе образцов подготовить дополнительную призму, в которой усилие растяжение будет возрастать сразу до предела текучести арматуры — для грубой оценки влияния скорости нагружения на расстояние между нормальными трещинами.

6. Боковую поверхность бетона обработать специальным составом белого цвета для упрощения фиксации образования нормальных трещин.

7. По мере нагружения отслеживать и фиксировать ширину раскрытия трещин в момент увеличения растягивающего усилия и после его выдержки по времени с помощью электронного микроскопа.

8. Для подтверждения невозможности развития в бетоне каких-либо заметных пластических деформаций при растяжении необходимо дополнительно в каждой группе образцов подготовить призму, по середине которой будет предусмотрен обрыв арматуры, т.е. заложены два арматурных стержня, не связанных между собой.

Понятно, что предложенная программа экспериментов является предварительной и не может учитывать всего многообразия типов бетона и его заполнителей, видов арматуры и других нюансов, но для широкого класса изгибаемых железобетонных конструкций она является весьма актуальной.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В статье [17] для определения расстояния между нормальными трещинами рассмотрена консольная железобетонная балка с несимметричным армированием и сосредоточенной внешней силой на свободном конце, равной P = 60 кН, в связи с чем, очевидно, что при неизменных параметрах армирования и габаритах поперечного сечения новые нормальные трещины будут образовываться с постоянным по длине балки шагом по мере увеличения внешней нагрузки ΔP , поскольку в формуле (8) для следующего этапа нагружения искомая величина l_1 в левой части выражения заменяется на расстояние от свободного конца балки до следующей нормальной трещины l_2, а длина пролета балки l в числителе правой части выражения (8) заменяется на расстояние от свободного конца балки до предыдущей нормальной трещины l_1.

При замене сосредоточенной внешней силы на свободном конце консольной балки на эквивалентную с точки зрения максимального изгибающего момента в заделке равномерно распределенную нагрузку $M = Pl = q_{экв} l^2 / 2 \rightarrow q_{экв} = 2P / l = 2 \cdot 60 / 3 = 40$ кН/м получим:

$$\varepsilon_{red} = \varepsilon_{bt0} = \frac{1}{l - l_1} \int_{l_1}^{l} \frac{\sigma_{bt,crc}}{E_{bt}} dL = \frac{1}{l - l_1} \int_{l_1}^{l} \frac{M_{crc} \cdot y_t}{E_{bt} \cdot I_{red}} dL =$$

$$= \frac{q_2 \cdot y_t}{2(l - l_1) E_{bt} \cdot I_{red}} \int_{l_1}^{l} L^2 dL = \frac{q_2 \cdot y_t}{2(l - l_1) E_{bt} \cdot I_{red}} \cdot \frac{L^3}{3} \Bigg|_{l_1}^{l} = \frac{q_2 \cdot y_t}{2(l - l_1) \cdot E_{bt} \cdot I_{red}} \cdot \frac{l^3 - l_1^3}{3} = \quad (1)$$

$$= \frac{q_2 \cdot y_t \left(l^2 + l \cdot l_1 + l_1^2\right)}{6 \cdot E_{bt} \cdot I_{red}} = \frac{M_{crc} \cdot y_t \left(l^2 + l \cdot l_1 + l_1^2\right)}{3 \cdot E_{bt} \cdot I_{red} \cdot l_1^2},$$

где $\sigma_{bt,crc} = M_{crc} \cdot y_t / I_{red}$ — нормальные растягивающие напряжения на грани балки в момент образования нормальных трещин;

$M_{crc} = q_2 \cdot L^2 / 2$ — изгибающий момент при образовании второй трещины;

y_t — расстояние от растянутой грани до центра тяжести приведенного нормального сечения до появления трещин;

I_{red} — момент инерции приведенного нормального сечения до появления трещин относительно центральной оси, перпендикулярной плоскости изгиба;

E_{bt} — начальный модуль упругости бетона;

$q_2 = q_{crc} + \Delta q = 2M_{crc} / l_1^2$ — внешняя равномерно распределенная нагрузка по длине консоли при образовании второй трещины;

q_{crc} — внешняя равномерно распределенная нагрузка по длине консоли при образовании первой трещины;

Δq — приращение внешней равномерно распределенной нагрузки по длине консоли, необходимое для образования второй трещины;

L — длина пролета консольной балки или расстояние от свободного конца до первой нормальной трещины (в данном случае в заделке);

l_1 — расстояние от свободного конца до второй нормальной трещины.

С учетом полученного выражения (1) для нахождения расстояния до второй нормальной трещины требуется решить квадратное уравнение относительно l_1, в котором только положительный корень будет удовлетворять физическому смыслу решаемой задачи:

$$\left(M_{crc}\cdot y_t - 3\cdot E_{bt}\cdot I_{red}\cdot \varepsilon_{bt0}\right)\cdot l_1^2 + M_{crc}\cdot y_t\cdot l\cdot l_1 + M_{crc}\cdot y_t\cdot l^2 = 0; \tag{2}$$

$$l_1 = \frac{-M_{crc}\cdot y_t\cdot l + \sqrt{\left(M_{crc}\cdot y_t\cdot l\right)^2 - 4\left(M_{crc}\cdot y_t - 3\cdot E_{bt}\cdot I_{red}\cdot \varepsilon_{bt0}\right)M_{crc}\cdot y_t\cdot l^2}}{2\left(M_{crc}\cdot y_t - 3\cdot E_{bt}\cdot I_{red}\cdot \varepsilon_{bt0}\right)} = \tag{3}$$

$$= \frac{l\cdot\left(\sqrt{12\cdot E_{bt}\cdot I_{red}\cdot \varepsilon_{bt0}\cdot M_{crc}\cdot y_t - 3\left(M_{crc}\cdot y_t\right)^2} - M_{crc}\cdot y_t\right)}{2\left(M_{crc}\cdot y_t - 3\cdot E_{bt}\cdot I_{red}\cdot \varepsilon_{bt0}\right)};$$

$$l_s = l - l_1. \tag{4}$$

Несмотря на то, что при действии равномерно распределенной нагрузки величина изгибающего момента квадратично зависит от соответствующей длины балки, расстояние от свободного конца консоли до второй нормальной трещины снова, как и в формуле (8) статьи [17], линейно зависит от рассматриваемой длины балки, и шаг следующих нормальных трещин по мере нагружения будет постоянным при неизменных параметрах армирования и габаритах поперечного сечения. Очевидно, что неоднородное строение бетона и наличие слабых мест по длине балки может привести к нарушению полученных теоретически зависимостей, но это не должно помешать получить удовлетворительную картину трещинообразования, необходимую для формирования расчетной модели балки с нормальными трещинами и выполнения квазинелинейно-ступенчатого расчета согласно [19]. Кроме того, важно также отметить, что по мере образования следующих нормальных трещин могут появляться новые между уже существующими в связи с продолжением нагружения балки и наличием сцепления арматуры с бетоном.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Деформационный критерий для определения расстояния между нормальными трещинами в железобетонных балках на основе предельной растяжимости бетона позволяет исключить противоречия и неопределенность в классическом описании механизма их образования.

Дальнейшие теоретические исследования, рассматривающие различные варианты граничных условий и характера нагружения железобетонных балок, совместно с проведением предложенных выше экспериментов позволят заложить фундамент для нового подраздела *механики железобетона — механики стержневых железобетонных элементов с нормальными трещинами.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мурашев В.И.* Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона (Основы сопротивления железобетона). М. : Изд. мин. строит. предприятий машиностроения, 1950. 268 с.

2. *Гвоздев А.А.* Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия. М. : Госстройиздат, 1949. 280 с.

3. *Берг О.Я.* Физические основы теории прочности бетона и железобетона. М. : Госстройиздат, 1962. 95 с.

4. *Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А.* Теория пластичности бетона и железобетона. М. : Стройиздат, 1978. 316 с.

5. *Арутюнян Н.Х., Зевин А.А.* Расчет строительных конструкций с учетом ползучести. М. : Стройиздат, 1988. 256 с.

6. *Безухов Н.И.* Основы теории упругости, пластичности и ползучести. Издание второе. М. : Высшая школа, 1968. 512 с.

7. *Карпенко Н.И.* Общие модели механики железобетона. М. : Стройиздат, 1996. 413 с.

8. *Карпенко Н.И., Мухамедиев Т.А., Сапожников М.А.* К построению методики расчета стержневых элементов на основе диаграмм деформирования материалов // Совершенствование методов расчета статически неопределимых железобетонных конструкций. М. : НИИЖБ, 1987. С. 4–24.

9. *Карпенко С.Н.* О построении связей между приращениями напряжений и деформаций на основе различных диаграмм // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 1. С. 60–63.

10. *Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Парфенов С.Г., Андрян К.Р.* Развитие метода расчета железобетонных конструкций по образованию и раскрытию нормальных трещин // Железобетонные конструкции. 2023. № 4 (4). С. 20–31. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.4.20-31

11. *Моргунов М.В., Людкевич А.А.* Исследование трещинообразования в железобетонных конструкциях при помощи нормируемых деформационных моделей // Железобетонные конструкции. 2023. № 3 (3). С. 20–31. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.3.20-31

12. *Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В.* Совершенствование методики расчета изгибаемых железобетонных элементов без предварительного напряжения по образованию нормальных трещин // Строительные материалы. 2013. № 6. С. 54–55.

13. *Соколов Б.С., Радайкин О.В.* К расчету прогибов изгибаемых железобетонных элементов с учетом совместного действия изгибающих моментов и перерывающих сил с использованием нелинейной деформационной модели // Известия КГАСУ. 2014. № 4. С. 37–45.

14. *Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Трекин Д.Н.* Расчет по образованию нормальных трещин в изгибаемых элементах на основе деформационной модели // Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия / под ред. А.Г. Тамразяна, Д.Г. Копаницы. 2016. С. 448–453.

15. *Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Соседов К.Е.* Реализация нелинейной деформационной модели при расчете прочности нормальных сечений // Лолейтовские чтения-150 / под редакцией А.Г. Тамразяна. 2018. С. 467–475.

16. *Пекин Д.А.* Нелинейные расчеты и «перераспределение» усилий в защемленной железобетонной балке при плоском изгибе // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 8. С. 41–47.

17. *Пекин Д.А.* Совершенствование методики расчета базового расстояния между нормальными трещинами в изгибаемых железобетонных элементах // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 12. С. 10–15.

18. *Пекин Д.А.* Стадии напряженно-деформированного состояния железобетонных балок с нормальными трещинами при плоском изгибе // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 9. С. 59–67.

19. *Пекин Д.А.* Механика железобетонных балок с нормальными трещинами при плоском изгибе // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 10. С. 12–23.

REFERENCES

1. Murashev V.I. *Crack resistance, rigidity and strength of reinforced concrete (Fundamentals of resistance of reinforced concrete)*. Moscow, Publ. of the Ministry of Construction of Machine-Building Enterprises, 1950; 268. (in Russian).

2. Gvozdev A.A. *Calculation of the bearing capacity of structures using the limit equilibrium method*. Moscow, Gosstroyizdat, 1949; 280. (in Russian).

3. Berg O.Ya. *Physical foundations of the theory of strength of concrete and reinforced concrete*. Moscow, Gosstroyizdat, 1962; 95. (in Russian).

4. Geniev G.A., Kissyuk V.N., Tyupin G.A. *Theory of plasticity of concrete and reinforced concrete*. Moscow, Stroyizdat, 1978; 316. (in Russian).

5. Arutyunyan N.Kh., Zevin A.A. *Calculation of building structures taking into account creep*. Moscow, Stroyizdat, 1988; 256. (in Russian).

6. Bezukhov N.I. *Fundamentals of the Theory of Elasticity, Plasticity and Creep. Second Edition*. Moscow, Higher School, 1968; 512. (in Russian).

7. Karpenko N.I. *General models of reinforced concrete mechanics*. Moscow, Stroyizdat, 1996; 413. (in Russian).

8. Karpenko N.I., Mukhamediyev T.A., Sapozhnikov M.A. On the development of a calculation method for rod elements based on material deformation diagrams. *Improving the methods for calculating statically indeterminate reinforced concrete structures*. Moscow, Research Institute of Reinforced Concrete, 1987; 4-24. (in Russian).

9. Karpenko S.N. On the construction of relationships between increments of stresses and deformations based on various diagrams. *Bulletin of Civil Engineers*. 2010; 1:60-63. (in Russian).

10. Trekin N.N., Kodysh E.N., Parfenov S.G., Andrian K.R. Development of the Method for Calculation of Reinforced Concrete Structures on the Formation and Opening of Normal Cracks. *Reinforced concrete structures.* 2023; 4(4):20-31. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.4.20-31 (in Russian).

11. Morgunov M.V., Lyudkevich A.A. Investigation of Cracking in Reinforced Concrete Structures by Means of Standardized Deformation Models. *Reinforced concrete structures*. 2023; 3(3):20-31. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.3.20-31 (in Russian).

12. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaykin O.V. Improvement of the calculation method for bending reinforced concrete elements without prestressing by the formation of normal cracks. *Construction materials*. 2013; 6:54-55. (in Russian).

13. Sokolov B.S., Radaykin O.V. On the calculation of deflections of bending reinforced concrete elements taking into account the combined action of bending moments and breaking forces using a nonlinear deformation model. *Izvestia KGASU*. 2014; 4:37-45. (in Russian).

14. Trekin N.N., Kodysh E.N., Trekin D.N. Calculation of normal crack formation in bending elements based on a deformation model. *Modern problems of calculation of reinforced concrete structures, buildings and facilities for emergency impacts*. Ed. by A.G. Tamrazyan, D.G. Kopanitsa. 2016; 448-453. (in Russian).

15. Trekin N.N., Kodysh E.N., Sosedov K.E. Implementation of a nonlinear deformation model in calculating the strength of normal sections. *Loleytovskie readings-150*. Ed. by A.G. Tamrazyan. 2018; 467-475. (in Russian).

16. Pekin D.A. Nonlinear Calculations and “Redistribution” of Forces in a Fixed-Ended Reinforced Concrete Beam Under Plane Bending (In the Order of Discussion). *Industrial and Civil Engineering*. 2024; 8:41–47. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.08.41-47 (in Russian).

17. Pekin D.A. Improving the Method for Calculating the Distance Between Normal Cracks in Bent Reinforced Concrete Elements. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 12:10-15. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.12.10-15 (in Russian).

18. Pekin D.A. Stages of Stress-Strain State of Reinforced Concrete Beams With Normal Cracks Under Plane Bending. *Industrial and Civil Engineering*. 2024; 9:59-67. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.09.59-67 (in Russian).

19. Pekin D.A. Mechanics of Reinforced Concrete Beams With Normal Cracks Under Flat Bending. *Industrial and Civil Engineering*. 2024; 10:12-23. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.10.12-23 (in Russian).