

**ХАБИДОЛДА ОМИРХАН**

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ  
ТРЕЩИНОПОДОБНЫХ ДЕФЕКТОВ**

**АННОТАЦИЯ**

**диссертации на соискание степени  
доктора философии (PhD) по специальности  
6D060300 - «Механика»**

**Актуальность темы исследования.** Вхождение Казахстана в число конкурентоспособных и динамично развивающихся стран мира требует интенсивного развития строительной отрасли. Эта задача приобрела статус общегосударственной программы. Географические условия расположения Казахстана способствуют достижению поставленной цели путем интенсивного строительства многофункциональных, уникальных объектов, транспортных коммуникаций, новых промышленных предприятий, работающих на основе инновационных технологий, индустриализации страны и освобождения экономики от сырьевой зависимости. Решение поставленных задач потребует также ускоренной модернизации и реконструкции большей части существующих предприятий, жилого фонда, общественных зданий и инженерных сооружений. Таким образом, предстоит выполнить большой объем строительных работ, реализация которых предполагает увеличение использования металлических, бетонных и железобетонных конструкций. Оптимальное проектирование, эффективная эксплуатация, реальная оценка технического состояния и остаточного ресурса объектов строительства тесно связаны с совершенствованием методов расчета строительных конструкций.

С развитием методов дефектоскопии установлено, что в строительных конструкциях содержится множество микроскопических дефектов, которые в процессе работы могут развиваться в трещины. Эти дефекты могут иметь естественное происхождение или появиться в процессе изготовления и эксплуатации – например, из-за усадки бетона, из-за предварительного напряжения арматуры, из-за непровара сварных швов, а также из-за силового воздействия. При появлении трещин происходит перераспределение напряжений в поперечном сечении, что существенно влияет на оценку прочности конструкций. Кроме того, раскрытие краев трещин приводит к коррозии арматуры и снижает ее долговечность.

Появление в элементах конструкций трещин еще не означает исчерпания его несущей способности. В зависимости от режимов и условий эксплуатации, размера и характера трещины они получают устойчивое или неустойчивое развитие, или могут не развиваться вовсе. При неустойчивом развитии трещин может произойти разрушение конструкций, а при

устойчивом развитии трещин они могут надежно функционировать еще значительное время. Поскольку бездефектных материалов нет, а также нет возможности избежать появления новых дефектов в процессе производства, то разработка методов расчета элементов строительных конструкций с трещиноподобными дефектами, в том числе при наличии трещин является актуальной научной проблемой, имеющей важное практическое применение.

Таким образом, **актуальность темы исследования** не вызывает сомнений, представляет научный и практический интерес.

**Целью** работы является исследование напряженно-деформированного состояния элементов строительных конструкций с трещиноподобными дефектами и совершенствование на этой основе методики оценки их работоспособности (прочности, трещиностойкости и эксплуатационной пригодности).

В соответствии с поставленной целью были сформулированы **следующие задачи исследования**.

1. Разработать методику нелинейного аналитического расчета напряженного состояния железобетонных элементов при предварительном натяжении арматуры.

2. На основе планируемых многофакторных компьютерных экспериментов и регрессионного анализа создать математическую модель для определения параметров напряженного состояния предварительно напряженных железобетонных элементов прямоугольного сечения.

3. Разработать аналитический метод расчета напряженного состояния изгибаемых железобетонных балок, позволяющий определить и длину трещины и на этой основе усовершенствовать методику определения момента по образованию трещины.

4. На основе планируемых экспериментов и регрессионного анализа создать математическую модель для определения параметров напряженного состояния изгибаемых железобетонных балок прямоугольного сечения с трещинами.

5. Определить параметры механики разрушения в металлических элементах конструкций с трещинами с предоставлением результатов в виде регрессионной зависимости.

6. Определить коэффициент интенсивности напряжений в изгибаемых железобетонных элементах с трещинами и разработать методику оценки прочности и эксплуатационной пригодности элементов строительных конструкций с трещиноподобными дефектами.

**Объект исследования.** Элементы строительных конструкций с трещиноподобными дефектами.

**Предмет исследования.** Предметом исследования являются напряженно-деформированное состояние и оценка прочности элементов строительных конструкций с трещиноподобными дефектами.

**Методы исследования:** Для определения предварительных и эксплуатационных напряжений в железобетонной балке применяется метод сечений. Балка разрезается по рассматриваемому сечению и составляются условия равновесия отсеченной части балки. Для изгибаемых балок эти условия сводятся к равенству нулю суммы проекции всех сил на ось балки и равенству нулю суммы моментов всех сил относительно поперечной оси сечения.

При этом принимается гипотеза плоских сечений. В сечении с трещиной линейная эпюра деформаций трансформируется с учетом неравномерности деформации по длине балки. Для описания нелинейной зависимости между напряжением и деформацией в бетоне в работе используется экспоненциальный закон. За основные неизвестные задачи приняты высота сжатой зоны бетона и длина растянутой зоны над трещиной. В случае отсутствия трещины за второе неизвестное принимается максимальное (краевое) растягивающее напряжение в бетоне. Эти неизвестные находятся из двух уравнений равновесия. Через эти параметры путем использования гипотезы плоских сечений и закона деформирования определяются все параметры напряженного состояния: максимальное сжимающее напряжение в бетоне, напряжение в арматуре, длина трещина или максимальное растягивающее напряжение в бетоне, ширина раскрытия трещины.

Для численного решения задачи о напряженно-деформированном состоянии железобетонных балках применяется МКЭ с использованием специализированного ПК ЛИРА. Используются балочные конечные элементы с учетом нелинейной связи между деформацией и напряжением в бетоне. В ходе решения используется пошаговый метод нагружения с применением итерационного процесса на каждом шаге. При этом последовательное исключение зон с напряжениями, превышающими предел прочности бетона на растяжение, позволяет определить длину трещины в поперечном сечении.

Для получения зависимости параметров напряженного состояния от параметров упругой системы составлена матрица рационального планирования многофакторного компьютерного эксперимента. По этому плану проводятся компьютерные эксперименты для изгибаемых прямоугольных балок. Путем обработки результатов экспериментов по программе нетрадиционного регрессионного анализа ANETR получены аналитические зависимости параметров напряженного состояния, а также длины и ширины раскрытия трещины от варьируемых параметров.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается:

- в разработке методики аналитического расчета напряженного состояния железобетонных элементов при предварительном натяжении арматуры в физически нелинейной постановке;
- в разработке аналитического метода расчета напряженного состояния изгибаемых железобетонных балок с трещинами и усовершенствовании методики определения момента по образованию трещины;

- в создании адекватной математической модели для определения предварительных напряжений, параметров напряженного состояния изгибаемых железобетонных элементов прямоугольного сечения, в том числе длины и ширины раскрытия трещины;
- в создании расчетной модели и определении КИН в изгибаемых железобетонных элементах;
- в определении регрессионных зависимостей для КИН в элементах металлических конструкций;
- в совершенствовании методики оценки прочности и эксплуатационной пригодности строительных конструкций с трещинами.

**Научные положения и результаты, выносимые на защиту:**

- методика аналитического расчета и регрессионные зависимости для определения напряжений в железобетонных элементах от предварительного натяжения арматуры;
- аналитический метод для определения параметров напряженного состояния изгибаемых железобетонных балок с трещинами и методика определения момента по образованию трещины;
- регрессионные зависимости для параметров напряженного состояния и трещинообразования прямоугольных железобетонных балок при изгибе;
- аналитические выражения для определения КИН в элементах строительных конструкций;
- методика оценки прочности тел с трещиноподобными дефектами с учетом критериев механики разрушения.

**Обоснованность и достоверность** научных положений и выводов подтверждается корректной постановкой всех решаемых задач, применением современных методов механики деформируемого твердого тела, прикладного математического анализа, отображением результатов при помощи строгих логических математических выкладок, моделированием на ЭВМ, непротиворечивостью и правдоподобностью полученных результатов и сравнением их для частных случаев с результатами других авторов с решениями тестовых задач.

**Теоретическая и практическая ценность результатов.**

1. Разработанная методика аналитического расчета и полученные регрессионные зависимости для определения напряжений от предварительного натяжения арматуры позволяют оценить реальное техническое состояние железобетонных элементов конструкций. Эти результаты также позволяют обоснованно выбрать предельное натяжение арматуры при изготовлении предварительно напряженных элементов.
2. Разработанный аналитический метод и полученные регрессионные зависимости для определения параметров напряженного состояния изгибаемых железобетонных балок с трещинами позволяют оценить прочность и эксплуатационную пригодность этих элементов конструкций.
3. Созданная расчетная модель дает возможность аналитически определить параметры механики разрушения в изгибаемых железобетонных балках с трещинами.

4. Полученные в работе регрессионные зависимости для КИН дают возможность оценить трещиностойкость конструкций без применения программных комплексов.

5. Разработана инженерная методика оценки прочности и эксплуатационной пригодности строительных конструкций с трещиноподобными дефектами.

**Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами.** Работа выполнена в согласовании с планами НИОКР института КазМИРР при НАО КарГУ (г. Караганда), основанных на научно-технических комплексных исследованиях надежности, долговечности и оценки технического состояния строительных конструкций на основе хоздоговорных научно-исследовательских работ, в соответствии с общегосударственными программами по совершенствованию и развитию строительной отрасли Казахстана.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих мероприятиях:

– VII Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений (APCSCE 2018)»: (Новосибирск, Россия, 1-8 июля 2018 г.) // United Kingdom, 2018. – Volume 456, – Issue 1. – P. 1-7;

– Международная IX научно-практическая конференция «Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения» (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 11-12 октября 2018) /под ред. А.В. Улыбина. – СПб. Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – С. 148-159;

– Международная конференция «Интеграция науки, образования и производства-основа реализации Плана нации», (Сагиновские чтения, КарГТУ, Караганда, 14-15 июня 2019 г.);

– Международная научная конференция «Теоретические и прикладные вопросы математики, механики и информатики» (КарГУ, Караганда, 12-13 июня 2019 г.) // КарГУ. – Караганда, 2019. – С. 174-175;

– 2nd International Conference on Civil Engineering and Architecture, ICSEA 2019; Seoul; South Korea, (21-23 September). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Volume 690. – Issue 1. – No 012002.

– научные семинары механико-математического факультета КазНУ им. аль-Фараби (2016-2019 гг., Алматы);

– научные семинары кафедры механики КазНУ им. аль-Фараби (2016-2019 гг., Алматы).

### **Публикации.**

По теме диссертации автором было опубликовано 10 работ, в том числе 3 публикации в научных изданиях, входящих в перечень рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК для публикации основных результатов научной деятельности; 5 публикаций в научных журналах и трудах международных конференций, индексируемых базой данных Scopus, среди которых 1 публикация с ненулевым импакт-

фактором (CiteScore - 79-перцентиль, Q2); 2 публикации в трудах отечественных международных научных конференций.

### **Личный вклад автора.**

Основные результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно с учетом анализа имеющихся на данный момент научных работ в исследуемой области механики деформируемого твердого тела

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из титульного листа, содержания, обозначений и сокращений, введения, четырех разделов и рекомендации по использованию результатов, заключения, списка использованных источников из 214 позиций. Общий объем диссертации составляет 190 страниц, включая 38 иллюстрации и 25 таблицу.

### **Основное содержание диссертации.**

Во введении отражены следующие моменты: актуальность темы диссертационного исследования, основная цель работы, объект, предмет и методы исследования, научная новизна, научно-практическое значение диссертационной работы, степень ее разработанности.

**В первой главе** выполнен обзор работ по расчету тел с трещиноподобными дефектами. Акцент сделан на металлоконструкции и железобетонные конструкции. Проведен анализ существующих методов расчета железобетонных конструкций. Проанализированы методы расчета по определению критериев работоспособности.

Изложены также существующие инструментальные методы обнаружения и измерения трещин.

Наряду с аналитическими методами расчета обоснована необходимость применения метода конечных элементов для определения напряженно-деформированного состояния строительных конструкции с трещинами и расчета параметров механики разрушения. Для исследования напряженного состояния изгибаемых железобетонных конструкций с трещинами применяется ПК ЛИРА, а для определения параметров механики разрушения ПК ANSYS.

**Вторая глава** посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных конструкций с трещинами. В начале исследовалось напряженное состояние железобетонного элемента от предварительного натяжения арматуры; также определено предельное значение предварительного натяжения арматуры, при котором появляется трещина на стадии изготовления.

С использованием ПК ЛИРА рационально спланированы и проведены многофакторные компьютерные эксперименты по определению предварительных напряжений в железобетонных элементах прямоугольного сечения. Путем обработки результатов экспериментов по программе нетрадиционного регрессионного анализа ANETR получены аналитические

выражения для определения предварительных напряжений в железобетонных элементах из бетона классов В25 и В40.

Предложена новая методика определения момента по образованию трещины с разработкой оригинального аналитического метода расчета изгибаемых железобетонных балок с трещиной, позволяющая определить все параметры напряженного состояния, в том числе длину трещины.

На основе МКЭ с использованием ПК ЛИРА предложена методика численного решения задачи о напряженно-деформированном состоянии изгибаемых железобетонных балок. Составлены матрицы рационального планирования и проведены компьютерные эксперименты по определению напряженного состояния в прямоугольных балках из бетонов В25 и В40. Путем обработки результатов экспериментов по программе ANETR получены регрессионные зависимости параметров напряженного состояния от варьируемых факторов упругой системы.

**В третьей главе** изложена методика автоматизированного расчета параметров механики разрушения с использованием результатов конечно-элементного моделирования; при этом с использованием ПК ANSYS решены плоские задачи механики разрушения для прямоугольных пластин конечных размеров с различным расположением трещин. Получены регрессионные зависимости КИН от геометрических параметров трещины и объекта для прямоугольных пластин конечных размеров с различным расположением трещин. Разработано приближенное аналитическое решение задачи об определении КИН в изгибаемых железобетонных балках прямоугольного сечения в линейной и нелинейной постановке.

**В четвертой главе** получены одно и двухпараметрические критерии разрушения для металлоконструкций, позволяющие определить разрушающую нагрузку для имеющейся трещины или определить критическую длину трещины для заданной нагрузки.

Развит деформационный критерий разрушения и получены новые одно и двухпараметрические критериальные соотношения, которые дают возможность оценивать прочность при больших местных упругопластических деформациях через критерии линейной механики разрушения – КИН.

Получены аналитические выражения для определения коэффициента запаса на длину трещины для всех рассмотренных критериев механики разрушения.

На основе обобщения различных подходов к расчетам на трещиностойкость усовершенствована методика прочностного расчета металлоконструкций с трещиноподобными дефектами и разработаны рекомендации по расчету железобетонных конструкций с трещинами, отражающие основные научно-исследовательские и прикладные результаты данной диссертационной работы.