

На правах рукописи



Самошкин Антон Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ
РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования
«Сибирский государственный университет путей сообщения»

Научный руководитель	Тихомиров Виктор Михайлович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО Сибирский государственный университет путей сообщения, профессор
Официальные оппоненты	Адищев Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, профессор Янковский Андрей Петрович, доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, ведущий научный сотрудник
Ведущая организация	ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Защита состоится «26» февраля 2018 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.054.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 15. Факс: (383)-333-16-12, e-mail: kurguzov@hydro.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, www.hydro.nsc.ru

Автореферат разослан « » января 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук



В.Д. Кургузов

Актуальность проблемы

Железобетон – основной конструкционный материал в строительстве. Определяющим фактором его эксплуатационной надежности является обеспечение совместной работы армирующих элементов и бетона. Исследования этой проблемы проводятся с момента внедрения железобетона до настоящего времени.

В зоне взаимодействия бетона и арматуры происходят одновременно несколько процессов: ползучесть, пластическое деформирование, накопление повреждений, образование трещин и проскальзывание, что обуславливает сложность этой проблемы и большое количество экспериментальных и теоретических исследований, рассматривающих с разных позиций эту проблему. Однако до сих пор не разработано практически реализуемой модели, которая позволила бы комплексно учесть все особенности деформирования структурных компонентов железобетона, а также их взаимодействие.

Уровень развития механики структурно неоднородных материалов, к которым относится железобетон, позволяет, сочетая экспериментальные исследования с методами математического моделирования и вычислительной механики рассмотреть взаимодействие арматуры и бетона.

Таким образом, на современном этапе требуется разработка математической модели, которая, с одной стороны, учитывает нелинейный характер деформирования структурных компонентов железобетона и их взаимодействия, а с другой – имеет простой алгоритм численной реализации.

Цель работы – разработать математическую модель деформирования железобетона, учитывающую контактное взаимодействие арматуры с бетоном и позволяющую численно решать задачи прочности железобетонных конструкций.

Основные задачи, поставленные в работе:

- 1) анализ существующих экспериментальных, аналитических и численных методов исследования механического взаимодействия арматуры и бетона;
- 2) экспериментальное исследование взаимодействия арматуры периодического профиля и бетона с учетом упругой и пластической стадий работы железобетона;
- 3) разработка процедуры идентификации параметров математической модели, где железобетон представлен в виде сплошной среды, а для описания условий в зоне контакта арматуры с бетоном вводится специальный (контактный) слой;
- 4) численная реализация задач, в которых взаимодействие арматуры и бетона играет существенную роль: вытягивание металлической и неметалли-

ческой арматуры из бетона; растяжение железобетонного элемента; создание предварительного напряжения в железобетонном стержне, армированного канатом; изгиб железобетонной балки.

Научная новизна работы

1. Разработана и численно реализована новая математическая модель железобетона, учитывающая контактное взаимодействие арматуры с бетоном.
2. Предложен алгоритм определения параметров модели, который позволил описать деформирование железобетона с учетом условия в зоне контакта бетона с металлической и неметаллической арматурой.
3. Проведен численный анализ задач железобетона, при решении которых было учтено взаимодействие бетона и арматуры: вытягивание металлической и неметаллической арматуры из бетона; растяжение железобетонного элемента; создание предварительного напряжения в железобетонном стержне, армированного канатом; изгиб железобетонной балки.

Практическая и теоретическая значимость полученных результатов

состоит в совершенствовании математической модели железобетона, которая может быть реализована на любом конечно-элементном программном комплексе и позволяет рассматривать задачи анализа напряженно-деформированного состояния железобетона в нелинейной постановке, что подтверждается актами внедрения.

Достоверность научных результатов и выводов обеспечивается корректным использованием положений механики деформируемого тела и методов математической статистики, а также хорошим совпадением расчетных данных с результатами экспериментов, полученных различными авторами.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты испытаний на вытягивание арматуры периодического профиля А400 номинального диаметром 8 мм из железобетонных образцов трех серий, отличающихся длиной.
2. Математическая модель железобетона, учитывающая упругопластический характер деформирования арматуры, бетона, а также их взаимодействия.
3. Алгоритм идентификации параметров контактного слоя, моделирующего условия в зоне контакта арматуры и бетона.
4. Результаты численных исследований железобетонных конструкций, на базе созданной математической модели:
 - вытягивание металлической и неметаллической арматуры из бетонного образца;

- создание предварительного напряжения в железобетонном стержне, армированного канатом;
- изгиб железобетонной балки;
- растяжение железобетонного элемента.

Личный вклад автора заключается в: планировании и проведении экспериментальных исследований, а также статистической обработке их результатов; разработке математической модели взаимодействия арматуры и бетона; создании конечно-элементных (КЭ) моделей железобетонных конструкций и выполнении расчетов; формулировке выводов. Автор диссертации принимал активное участие в получении результатов, отражённых во всех совместных публикациях на равноправной основе.

Апробация работы проведена на следующих научных мероприятиях: VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные вопросы строительства», Новосибирск, 07 – 09 апреля 2015 г; XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Казань, 20-24 августа 2015 г; I Международная научно-практическая конференция «Повышение надежности и безопасности транспортных сооружений и коммуникаций», Саратов, 18 – 19 ноября 2015 г.; XVII Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, Новосибирск, 30 октября – 3 ноября 2016 г.; I Международная конференция «Строительные материалы, конструкции и сооружения XXI века», Санкт-Петербург, 22 – 25 ноября 2016 г.; 4-я Всероссийская конференция «Проблемы оптимального проектирования сооружений», Новосибирск, 11 – 13 апреля 2017 г.

Публикации. Основные результаты работы изложены в 11 публикациях, из них четыре опубликовано в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науке РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций, а одна в журнале, входящем в международные реферативные базы данных и системы цитирования. Перечень основных публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 122 страницу машинописного текста, 63 рисунка и 7 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 122 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, указаны: ее цель, практическая ценность результатов, апробация на научных конференциях

и семинарах, сформулированы задачи, которые необходимо решить для достижения цели.

В первой главе диссертации представлен анализ экспериментальных, аналитических методов, а также методов математического моделирования, применяемых для исследования взаимодействия арматуры с бетоном.

Экспериментальными исследованиями и математическим моделированием занимались следующие ученые:

Астахов Ю.В., Балатьев П.К., Бенин А.В., Веселов А.А., Гвоздев А.А., Гольдфайн Б.С., Диаковский В.Г., Емельянов М.П., Ерин Н.Н., Карпенко Н.И., Кольнер В.М., Лейтс Е.С., Миловидов В.И., Назаренко П.П., Оатул А.А., Овчинникова И.Г., Панюков Э.Ф., Редько Ю.М., Семенов А.С., Судаков Г.Н., Тевелев Ю.А., Фрайфельд С.Е., Холмянский М.М., Abrams D.A., De Groot A.K., Edwards A.D., Eligehausen R., Kausters G.M.A., Lundgren K.A., Monnier T., Ngo D., Rehm G., Scordelis A.C., и др.

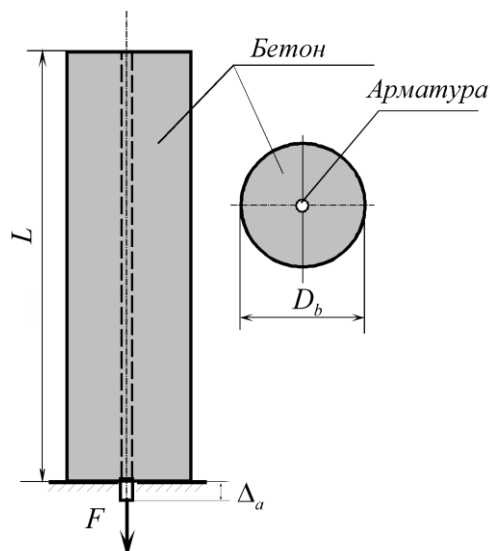


Рис. 1. Схема вытягивания арматуры из железобетонного образца

Анализ экспериментальных исследований позволил выбрать схему испытаний, которая позволяет получить достаточную информацию для описания процесса взаимодействия (сцепления) арматуры с бетоном – вытягивание арматуры из длинного образца (рис. 1). Образец считается длинным, если заделка арматуры L превышает зону взаимных смещений арматуры и бетона.

Такая схема позволяет исследовать непосредственно процесс сцепления, исключив влияние кратковременной ползучести и радиальной податливости бетона. Основным результатом таких испытаний является зависимость перемещения арматуры относительно

торца образца Δ_a от нагрузки F .

Математические модели, названные техническими теориями сцепления (ТТС), позволяли приближенно учитывать контактное взаимодействие арматуры с бетоном при деформировании железобетона. При этом арматура и бетон считались упругими, а условия их взаимодействия задавались в соответствии с законом сцепления – зависимостью касательных напряжений по поверхности арматуры τ_{bs} от ее смещений относительно бетона в продольном направлении g .

Наиболее разработанной из таких математических моделей является ТТС М.М. Холмянского, основанная на использовании «нормального» закона сцепления

$$\tau_{bs} = B \frac{\ln(1 + \alpha g)}{1 + \alpha g}. \quad (1)$$

Здесь параметры сцепления α и B зависят от свойств арматуры и бетона и могут быть определены с помощью процедуры аппроксимации данных испытаний по схеме вытягивания арматуры из длинной бетонной обоймы (рис. 1).

При численном моделировании сцепления арматуры и бетона в основном применяется метод конечных элементов (МКЭ). Железобетон в таких моделях представлен в виде дискретной среды, в которую вводится специальный слой допускающий разрывы по перемещениям. Этот прием используется для того, чтобы смоделировать экспериментальную зависимость перемещений арматуры относительно торца образца от нагрузки. Для этого разработаны различные виды специальных КЭ, названные интерфейсными или элементами связи. Их характеристики определяются по алгоритмам разной степени сложности и включают в себя от двух и более параметров.

Во второй главе диссертации представлено экспериментальное исследование взаимодействия (сцепления) арматуры периодического профиля и бетона.

По выбранной схеме (рис. 1) были проведены испытания трех серий по пять железобетонных образцов в каждой, различающихся длиной заделки. При изготовлении образцов была использована арматура периодического профиля номинальным диаметром 8 мм класса А400 и тяжелый бетон с наибольшей крупностью заполнителя 20 мм.

Серии образцов отличались длиной образцов. На рис. 2 представлена геометрия «длинных», «средних» и «коротких» образцов, которые выбирались по следующим принципам:

- диаметр бетонной обоймы должен обеспечивать жесткость и прочность, которая достаточна для восприятия радиальных усилий;
- размер анкеровки L «длинных» образцов должна быть больше, чем длина области нелинейного деформирования бетона в зоне контакта;
- длина анкеровки «коротких» и «средних» образцов выбирается из условия, чтобы предельная стадия – нарушение сцепления по всей поверхности соединения арматуры с бетоном, наступила в упругой или в пластической стадии работы материала арматуры, соответственно.

Для определения механических характеристик бетона одновременно с основными образцами были изготовлены и сохранялись в нормальных (относительная влажность воздуха $(95\pm 5)\%$, температура $(20\pm 3)^\circ\text{C}$) условиях твердения контрольные кубы размером $100\times 100\times 100$ мм и призмы размером $100\times 100\times 400$ мм в течение 28 суток и дополнительной выдержкой в течении 39 суток. На рис. 3 представлена диаграмма деформирования бетона, полученная по результатам испытания контрольных призм на одноосное сжатие. Здесь: ϵ_3 и ϵ_1 – продольные и поперечные относительные деформации; σ_3 – напряжения в поперечном сечении образца.

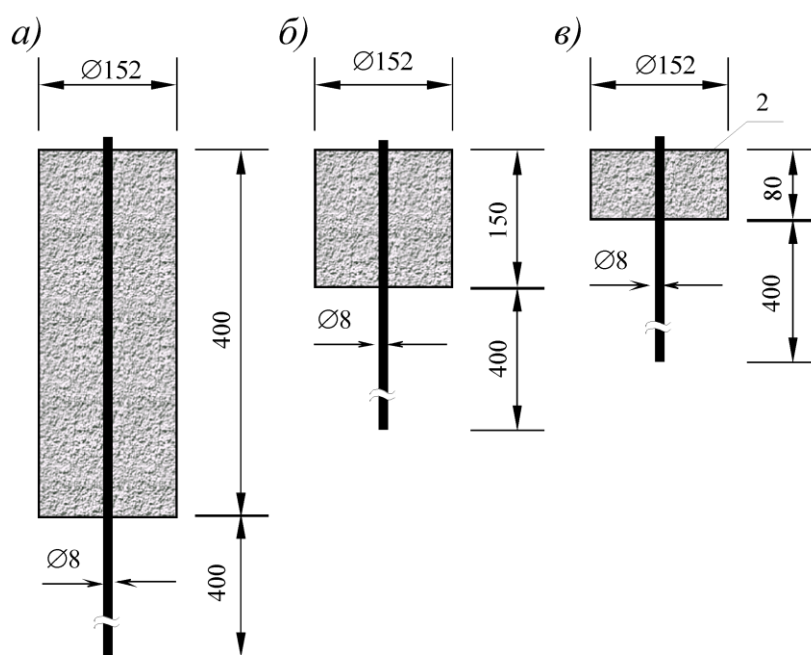


Рис. 2. Размеры «длинных» (а), «средних» (б) и «коротких» (в) лабораторных образцов

В результате были получены следующие механические характеристики бетона:

- призменная прочность 40,2 МПа;
- модуль упругости 38,3 ГПа;
- коэффициент Пуассона 0,21.

По испытаниям образцов были определены механические характеристики арматуры:

- модуль упругости 200 ГПа;
- предел текучести 400 МПа;
- временное сопротивление 610 МПа.

Испытания железобетонных образцов производилось на механической машине ZDM-5/91 в специально изготовленной стальной раме. Образцы нагружались до разрушения с шагом 1000 Н. Для учета реологических процессов де-

формирования, которые протекают в зоне сцепления арматуры с бетоном, на каждом шаге приращения нагрузки осуществлялась выдержка до установившегося равновесия (до 30 мин). После чего индикаторами часового типа фиксировалось перемещение арматуры относительно торца бетонной обоймы Δ_a . На рис. 4 представлены результаты испытаний «коротких» и «длинных» образцов после их статистической обработки.

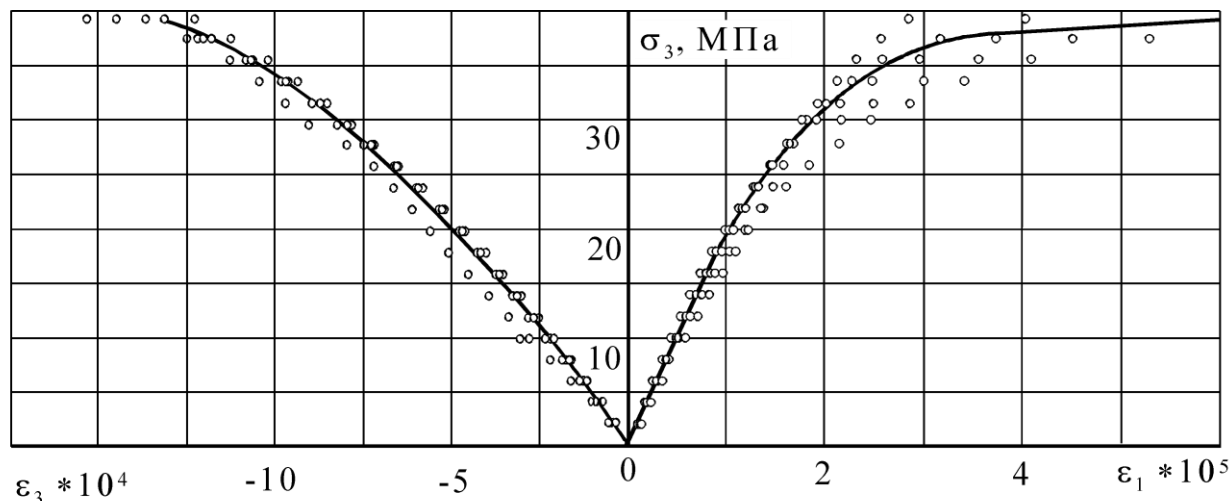


Рис. 3. Диаграмма деформирования бетона

Для определения характеристик сцепления результаты, полученные для «длинных» образцов (рис. 4б), в диапазоне упругой работы арматуры ($\sigma_a < 400$ МПа) аппроксимировались. В результате чего были определены значения базовых параметров сцепления $\alpha = 30,4 \text{ мм}^{-1}$ и $B = 44,9$ МПа.

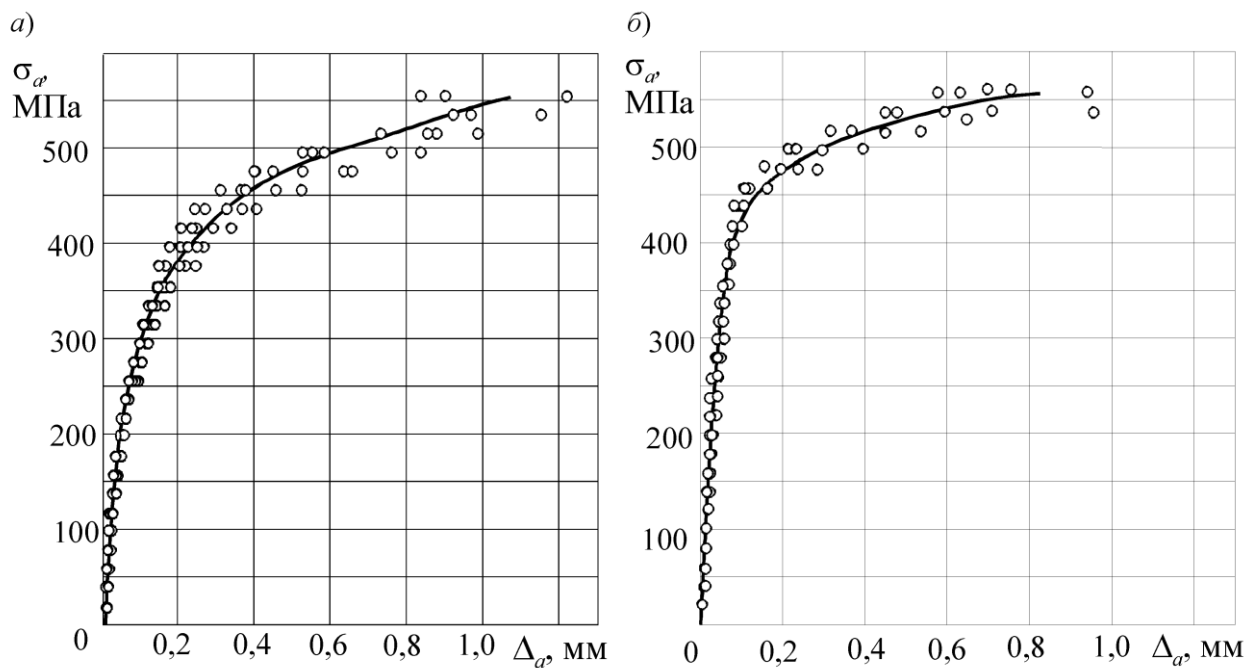


Рис. 4. Результаты испытаний «коротких» (а) и «длинных» (б) железобетонных образцов

В третьей главе представлены результаты разработки математической

модели железобетона, которая позволяет учитывать контактное взаимодействие арматуры с бетоном. Качественная структура модели железобетона

Проведенный анализ подходов к численному моделированию рассматриваемой задачи позволил выбрать модель железобетона, которая состоит из трех однородных упругопластических тел (рис. 5): бетон, арматура и контактный слой (КС). При этом контакт составных элементов полагается идеальным, а арматура моделируется круговым цилиндром с гладкой поверхностью. Такие упрощения позволили рассматривать проблему контактного взаимодействия, как задачу механики сплошной среды.

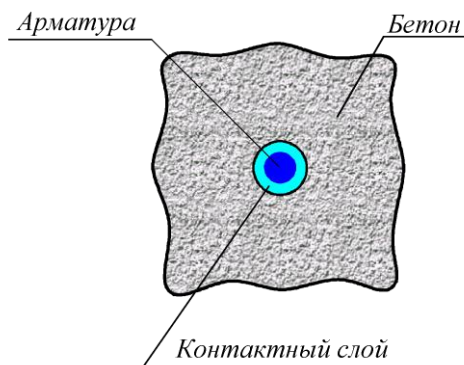


Рис. 5. Качественная структура модели железобетона

Для каждой составной части модели были выбраны соотношения, описывающие характер ее деформирования.

Для бетона характерно нелинейное поведение под нагрузкой и различное сопротивление растяжению и сжатию. Был проведен анализ функций текучести, которые используются для моделирования механических свойств таких материалов, и выбран линейный закон Друкера-Прагера

$$(3J_2)^{1/2} + \gamma I_1 = k, \quad (2)$$

здесь I_1 – первый инвариант тензора напряжений; J_2 – второй инвариант девиатора напряжений; γ и k – постоянные, которые определяются по экспериментальным данным на одноосное растяжение σ_{ut} и σ_{uc} .

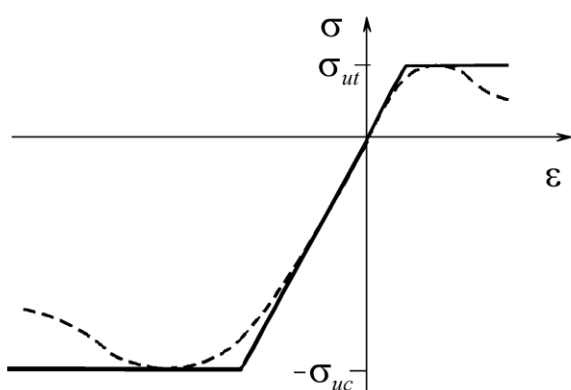


Рис. 6. Экспериментальная и расчетная диаграммы деформирования бетона

На рис. 6 сплошной линией показана диаграмма деформирования идеального упругопластического материала, полученная с использованием соотношения (2). Сравнение экспериментальных (штриховая линия) и расчетных данных позволяет сделать вывод о правильности выбранного закона пластичности.

Для армирования бетона применяются материалы, сопротивление которых растяжению и сжатию одинаковы. Сле-

довательно, при описании их нелинейного деформирования можно использовать критерий Хубера-Мизеса, соотношения которого получаются из выражения (2) при $\gamma = 0$:

$$(3J_2)^{1/2} = k. \quad (3)$$

При этом напряжение k соответствует пределу текучести арматуры. Соотношение (3) позволяет также учитывать стадию упрочнения материала.

При выборе функции пластичности для материала КС было учтено, что при смещении гладкой арматуры относительно бетона его радиальные деформации будут незначительны. Следовательно, КС будет испытывать квази-чистый сдвиг, при котором первый инвариант тензора напряжений $I_1 \approx 0$. Поэтому для описания условий перехода этого слоя в пластическое состояние был выбран критерий Хубера-Мизеса (3).

Для определения механических характеристик КС были использованы параметры сцепления α и B , входящие в соотношение (1) в качестве постоянных. Это позволило учесть сложные процессы взаимодействия арматуры с бетоном и частично нивелировать отсутствие радиальных усилий в модели, передаваемых реальной арматурой.

В предположении о преимущественно сдвиговом характере деформирования КС и адекватности описания этого процесса критерием Хубера-Мизеса (3) получим

$$(3J_2)^{1/2} = \sqrt{3}\tau_{bs}^* = k_{bs},$$

здесь τ_{bs}^* – максимальные напряжения сцепления, которые определяются из соотношения (1), как $\tau_{bs}^* = 0,386B$. Таким образом, предел текучести контактного слоя можно определить, зная постоянную B ,

$$k_{bs} = 0,638B. \quad (3)$$

Модуль упругости E_{bs} можно получить из сопоставления начального угла наклона функции (1), пропорционального произведению αB , и абсолютного сдвига КС при его упругом деформировании

$$E_{bs} = 2\alpha B(1+\nu)nt_{bs}, \quad (4)$$

где ν – коэффициент Пуассона; n – коэффициент заполнения эпюры деформаций сдвига γ по толщине контактного слоя t_{bs} :

$$n = \frac{1}{\gamma_0 t_{bs}} \int_0^{t_{bs}} \gamma dr, \quad (5)$$

где γ_0 – деформация сдвига на границе КС и арматуры.

На рис. 7 показаны графики зависимости τ_{bs} и g полученные по экспериментальным данным – штриховая линия и в соответствии с выбранной моделью – сплошная линия.

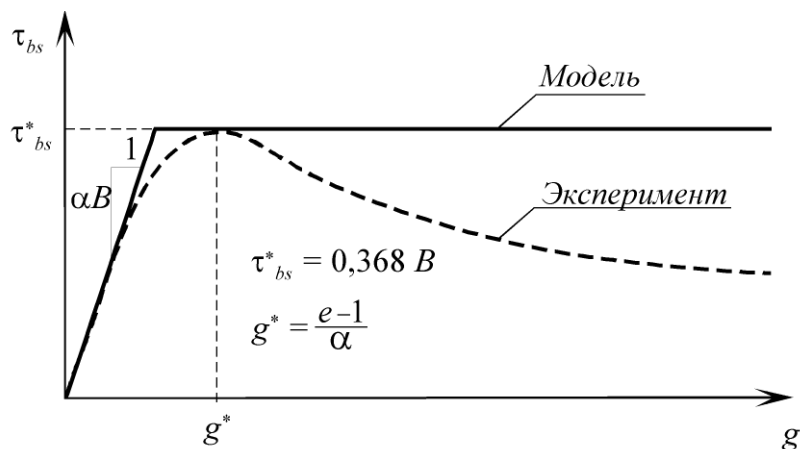


Рис. 7. Экспериментальные и модельные зависимости касательных напряжений от смещения арматуры

Модель железобетона, составленная из физически нелинейных материалов, может быть реализована методами вычислительной механики, среди которых следует выделить метод конечных элементов (МКЭ). Его основным достоинством являются универсальность и возможность решать задачи механики деформируемого твердого тела (МДТТ) в различной постановке. В нашем случае для описания деформирования бетона и арматуры была выбрана геометрически линейная формулировка определяющих соотношений МДТТ, а для контактного слоя – текущая лагранжева формулировка, так как в этой зоне возникают большие пластические деформации сдвига. Решение данной нелинейной задачи производилось пошаговым интегрированием линеаризованных уравнений МКЭ. В качестве меры шага выбиралось фиктивное время, изменение которого соответствовало приращению управляющего параметра – перемещению узла конечного элемента. Для уточнения решения применялся стандартный метод Ньютона-Рафсона.

На рис. 8 представлена типичная конечно-элементная модель, реализующая осесимметричную схему вытягивания арматуры из бетона (см. рис. 1). В результате численных экспериментов с различными геометрическими параметрами сетки КЭ были установлены следующие соотношения для:

- радиального размера КЭ контактного слоя

$$0,0834d_a \leq t_{in} \leq 0,125d_a ;$$

- толщины контактного слоя

$$5t_{in} \leq t_{bs} \leq 0,05D_b ;$$

- коэффициента наполнения эпюры деформаций сдвига

$$n = 0,78.$$

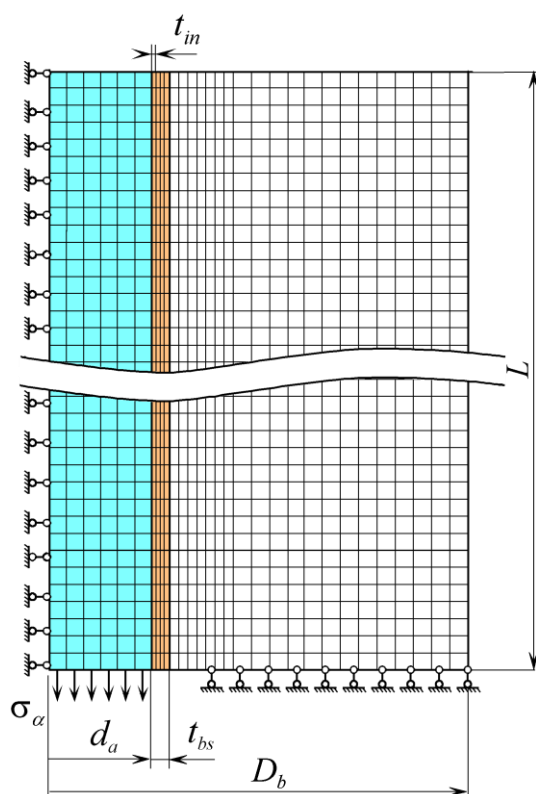


Рис. 8. Типичная КЭ модель

Здесь D_b – наименьшая толщина окружающего бетона; d_a – диаметр модельного арматурного стержня.

В четвертой главе диссертации представлены результаты численного анализа задач, где процессы взаимодействия арматуры с бетоном существенно влияют на результат решения: вытягивание арматуры периодического профиля из бетона; растяжение железобетонного элемента; создание предварительного напряжения в железобетонном стержне, армированного канатом; изгиб железобетонной балки.

Для всех задач были созданы КЭ модели, параметры которых определены по алгоритмам, описанным в третьей главе диссертации.

Вытягивание стальной рифленой арматуры из тяжелого бетона

Экспериментальные данные для данной задачи представлены во второй главе диссертации. На рис. 9 сплошной линией представлены результаты расчета «длинного» образца, а светлыми точками данные эксперимента. Можно отметить их хорошее соответствие: в диапазоне нагрузок до 400 МПа, где деформация арматуры была упругой, различие составляет менее 4%, при более высоком уровне нагружения и пластическом деформировании арматуры – не более 10% .

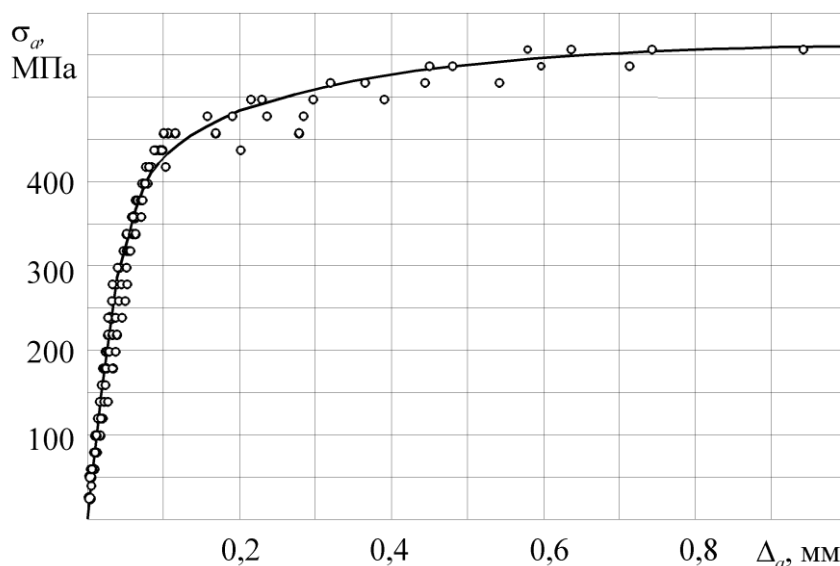


Рис. 9. График зависимости $\sigma_a - \Delta_a$ для длинных образцов

Результаты численной реализации «средних» и «длинных» образцов совпали, что соответствует экспериментальным данным. Экспериментально полученная жесткость «короткого» образца на вытягивание арматуры оказалась значительно ниже расчетной. Это связано с тем, что модель контактного слоя не учитывает деградацию материала при больших уровнях смещения, что видно на рис. 7.

Растяжение центрально армированной железобетонной призмы

На рис. 10 показана схема нагружения центрально армированной железобетонной призмы. Образец был изготовлен из бетона с пределом прочности на сжатие 30 МПа, и стальной арматуры (FeB 400 HW–NR) номинального диаметра 12 мм, предел текучести которой 400 МПа.

Образец растягивался силами, приложенными на свободных концах арматуры (рис. 10).

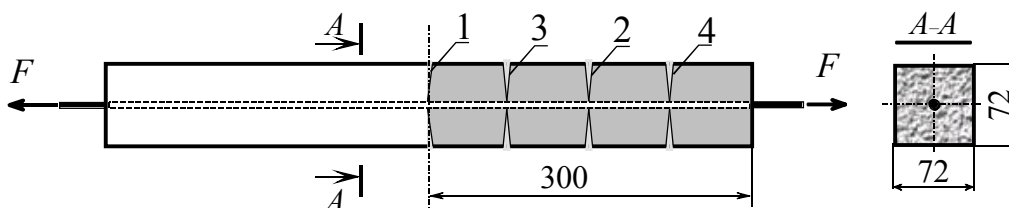


Рис. 10. Схема нагружения образца и образования трещин

Данные испытаний железобетона по такой схеме приведены в работе А. де Грота, Г.М.А. Каустерса и Т. Мони, а на рис. 11 показаны светлыми точками, соединенными пунктирной линией. Здесь σ_a – напряжения на свободных концах арматуры; Δ_a – перемещения арматуры относительно торца образца. Скачки на графике соответствуют падению нагрузки от образования поперечных трещин в бетоне.

Эта пространственная задача была решена в осесимметричной постановке. Для этого бетонная призма моделировалась круговым цилиндром равной площади поперечного сечения, диаметр которой $D_b = 81,3$ мм, а рифленая арматура – гладким однородным стержнем. Из условий симметрии нагружения рассматривалась только половина образца длиной 300 мм.

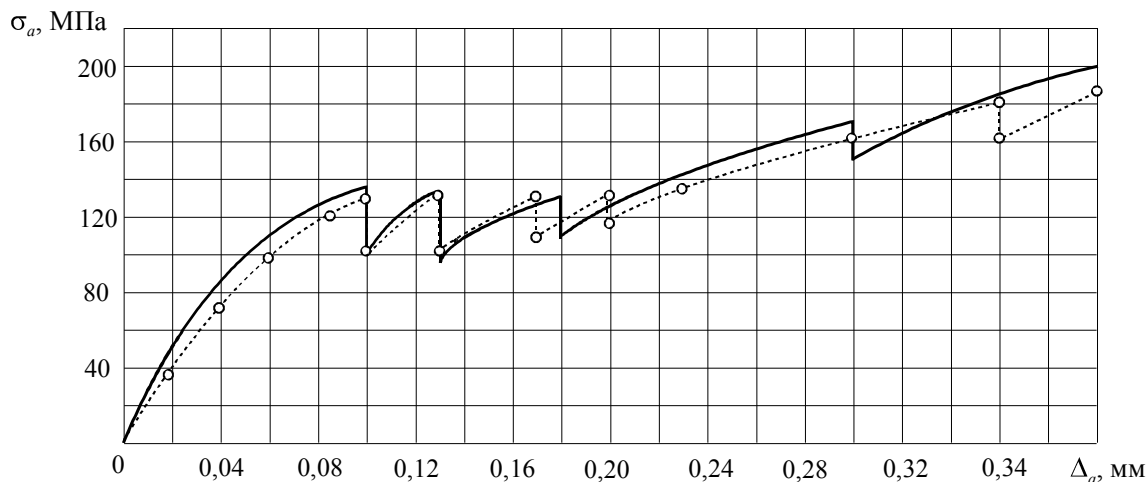


Рис. 11. Экспериментальные данные и результаты численного моделирования растяжения призматического образца

Результаты расчета показаны на рис. 11 сплошной линией. Видно, что образование первых двух трещин полностью соответствует экспериментально наблюдаемым моментам разрушения. Следующие расчетные трещины образовались с заметным запаздыванием по отношению к эксперименту. Всего в результате расчетов были сформированы четыре области разрушения, соответствующие трещинам в поперечном сечении бетонной обоймы (рис. 10), тогда как при испытании образца их было пять. Можно отметить, что при $\Delta_a < 0,18$ мм наблюдается совпадение положений и величин падения нагрузки с опытными данными. Различия между экспериментальными и расчетными данными при $\Delta_a > 0,18$ мм являются следствием статистической изменчивости характеристик бетона. Кроме этого, при разрушении бетонная обойма разделяется на несколько достаточно коротких блоков. В этом случае модель не точно воспроизводит условия по контакту, поскольку не учитывает изменения механических характеристик бетона в зоне контакта при больших смещениях арматуры, которые характерны для образцов малой длины.

Для моделирования образования трещин в бетоне, находящимся в линейном напряженном состоянии, был выбран деформационный критерий. В соответствии с ним разрушение начинается когда главные максимальные деформации достигают предельной величины ε_{ut} . Значение ε_{ut} по испытаниям и при расчете было принято равным $2,3 \cdot 10^{-4}$.

Обжатие бетонного цилиндра канатом

Важной задачей для теории железобетона является прогнозирование поведения железобетонного элемента после предварительного напряжения и определение его остаточной несущей способности. Для исследования процесса предварительного напряжения и проверки модели была рассмотрена задача обжатия бетонного цилиндра канатом. Опытные данные предоставлены Ю.В. Астаховым.

Рассматривались цилиндрические центрально-армированные образцы с упором в торец со следующими размерами: диаметр – 205 мм, длина – 770 мм. Основным видом арматуры был семипроволочный канат $\varnothing 15\text{K7-1410}$ (ГОСТ 13840-68).

При изготовлении образцов создавалось предварительное натяжение каната с уровнем напряжений $\sigma_t = 1200$ МПа, соответствующее контролируемому усилию натяжения 170 кН. После этого вокруг каната был залит бетонный круговой цилиндр, так чтобы их продольные оси совпадали. Твердение бетона продолжалось 156 суток, что обеспечило возможность снизить влияние ползучести бетона на результаты эксперимента. Отпуск усилия предварительного натяжения каната P_{ot} осуществлялся последовательно в четыре этапа: 20, 70, 120 и 170 кН (рис. 12).

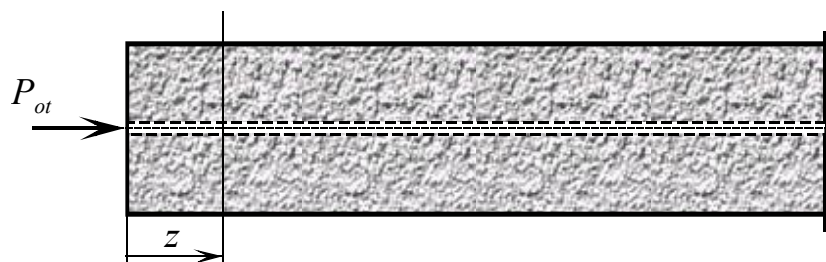


Рис. 12. Эквивалентная расчетная схема отпуска натяжения каната

При каждом уровне нагружения измерялись смещения каната относительно торца образца Δ_a и продольные деформации на поверхности образца ϵ . Результаты измерений представлены на рис. 13 и рис. 14 светлыми и темными точками.

Канат моделировался сплошным однородным стержнем, а его сложная винтовая поверхность – гладкой цилиндрической. Диаметр модельного стержня определялся из условия равенства площадей поперечных сечений и составил 13,4 мм.

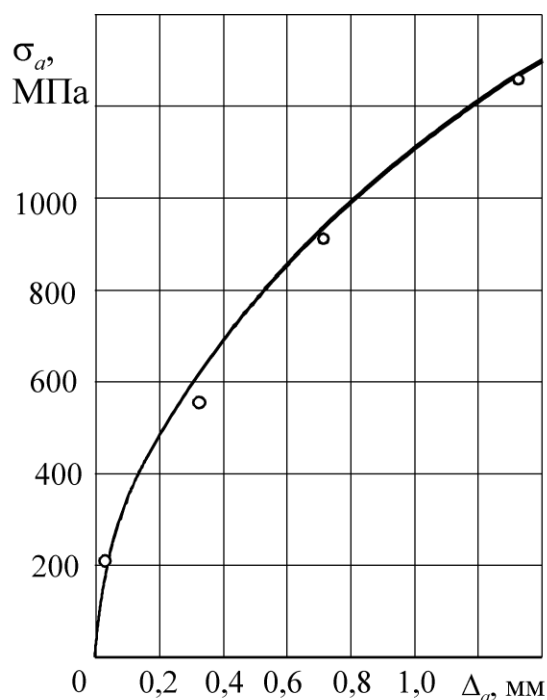


Рис. 13. Экспериментальные и расчетные результаты перемещения каната относительно нагруженного торца бетонного образца в процессе отпуска

На рис. 13 сплошной линией показаны результаты расчетов в диапазоне напряжений отпуска σ_a от 0 до 1250 МПа. Можно отметить, что за исключением начальной стадии нагружения данные расчета соответствуют экспериментальным значениям.

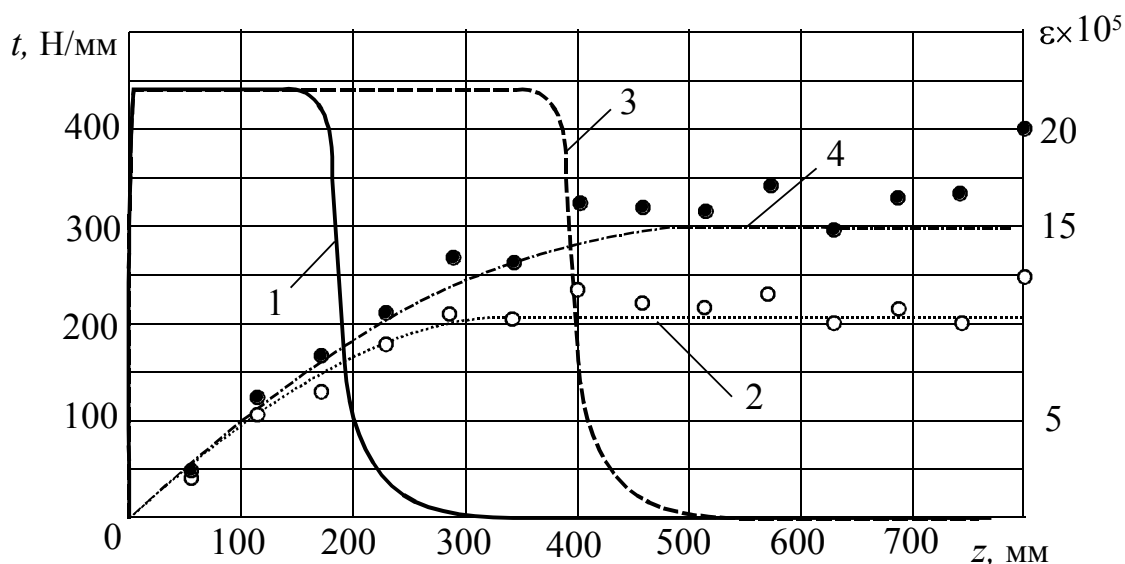


Рис. 14. Результаты расчета продольных деформаций на поверхности образца и погонных усилий сцепления при усилии отпуска $P_{ot} = 120$ кН (кривые 1 и 2) и $P_{ot} = 170$ кН (кривые 3 и 4)

Для сравнения с данными испытаний на рис. 14 представлены результаты расчета продольных деформаций при двух этапах обжатия. Здесь расчетные кривые 2 и 4 соответствуют усилию отпуска 120 кН и 170 кН, соответственно.

Наблюдается отличия при нагрузке 170 кН, которые вызваны деформациями ползучести, проявляющимися при больших уровнях нагружения. В остальном результаты эксперимента и расчета хорошо совпадают. На рис. 14 кривые 1 и 3 представляют расчетные эпюры погонных усилий сцепления по поверхности арматуры. Длина горизонтальных площадок на графиках 1 и 3 соответствует размерам пластических зон, а криволинейные участки на графиках 2 и 4 – зоне перераспределения напряжений в образце. Это показывает, что по экспериментальным эпюрам деформаций можно определить размер зон активного взаимодействия арматуры и бетона.

Изгиб железобетонной балки

Для проверки математической модели сцепления арматуры с бетоном, который испытывает неоднородное деформирование, были проведены численные исследования изгиба железобетонной балки, геометрия и схема нагружения которой показаны на рис. 15. Армирование балки было произведено тремя стержнями (FeB 400 HW–NR) периодического профиля номинального диаметра 16 мм. Опытные данные взяты из работы А. де Грота, Г.М.А. Каустерса и Т. Мони.

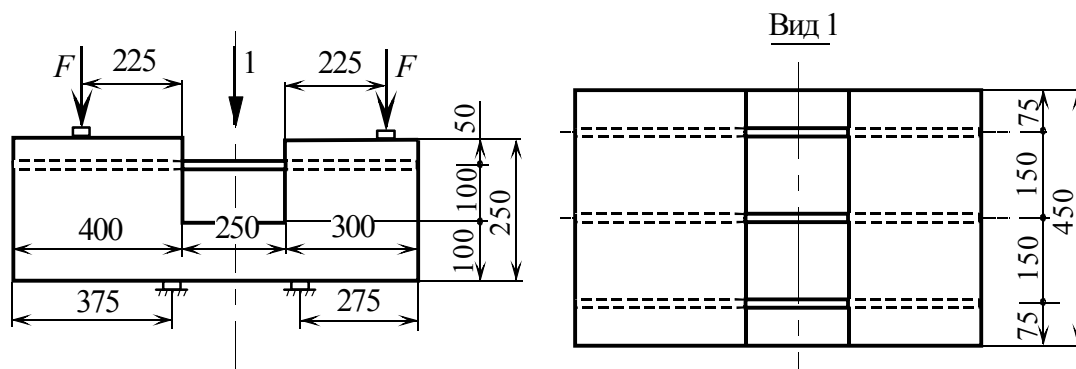


Рис. 15. Расчетная схема железобетонной балки

На рис. 16 светлыми точками, соединенными пунктирной линией, показаны экспериментальные значения напряжений σ_a , измеренные в свободной от бетона части арматуры. Скачок на графике соответствует образованию трещин.

На рис. 17 светлыми точками представлены опытные данные, соединенные между собой пунктиром, деформации среднего стержня по заделке длиной 300 мм, измеренные методом тензометрирования.

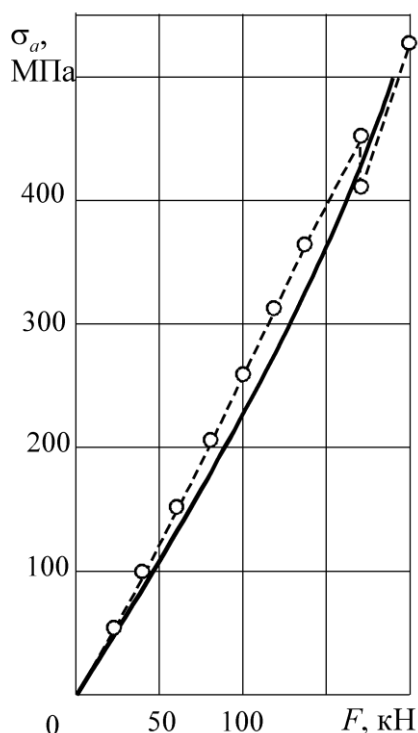


Рис. 16. Зависимость усилий в арматуре от внешней нагрузки на балку

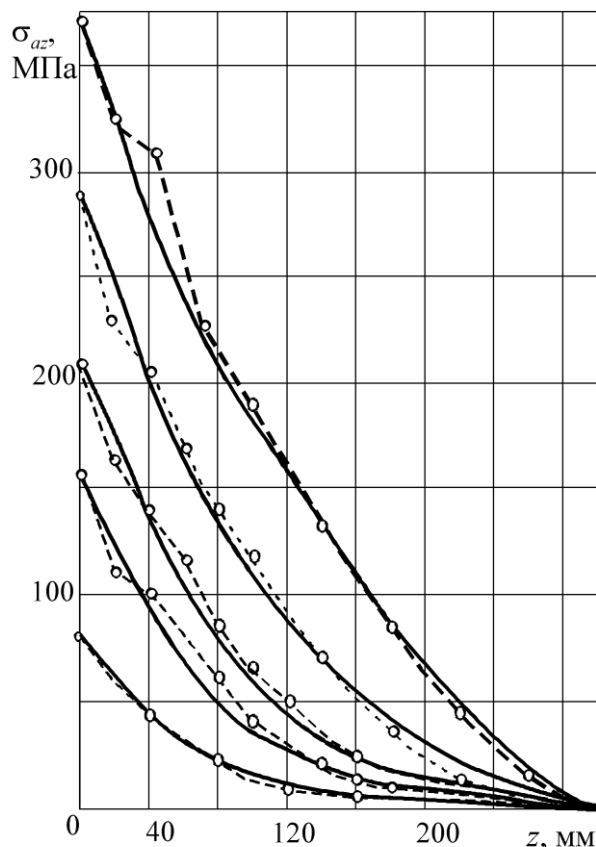


Рис. 17. Распределение напряжений по длине заделки среднего арматурного стержня

При численном моделировании была рассмотрена часть балки, находящаяся справа от силовой оси симметрии.

На рис. 16 сплошной линией показаны результаты расчета усилий в среднем арматурном стержне в зависимости от внешней нагрузки F . Максимальное отличие измеренных и расчетных напряжений составило 14%. На расчетном графике не наблюдается образования трещины, так как рассматриваемая модель сцепления бетона с арматурой не описывает распорные усилия, распределенные по поверхности контакта.

На рис. 17 сплошными линиями представлены результаты расчета напряжений в среднем арматурном стержне по длине его заделки 300 мм при разных уровнях нагружения. Видно, что расчетные графики соответствуют экспериментальным данным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведены испытания на вытягивание арматуры А400 номинальным диаметром 8 мм из железобетонных образцов трех серий, отличающихся длиной. Получены зависимости нагрузки от перемещения арматуры относительно торца образца и определены параметры сцепления. Установлено: что длина эффективной заделки арматуры в 4,4 раза меньше нормативных значений; наименьший разброс результатов наблюдается в диапазоне нагрузок, соответствующих упругому деформированию арматурной стали; зона нелинейного деформирования бетона вокруг арматуры при длине заделки более 150мм одинакова.
2. Предложена математическая модель деформирования железобетона, учитывающая нелинейные процессы, происходящие в зоне контакта. Для этого вокруг арматуры, которая моделируется гладким стержнем, вводится контактный слой. Определены границы применения четырех функций текучести для бетона: конический и параболический законы Друкера-Прагера; трех и пяти параметрических функций Вилама-Варнке. Обоснован выбор критерия Мизеса для описания нелинейного деформирования контактного слоя.
3. На основе представления контактного слоя однородным упругопластическим материалом был разработан алгоритм идентификации его параметров. Установлена связь механических характеристик контактного слоя, модуля упругости и предела текучести, с параметрами сцепления, которые определяются по данным испытания на вытягивание арматуры из железобетонного образца. Получены эмпирические соотношения для определения геометрических параметров конечно элементной модели контактного слоя: толщины, числа и размеров конечных элементов. Применение разработанного алгоритма к решению тестовых задач показало необходимый уровень адекватности и приемлемый уровень трудоемкости расчетов.
4. Установлена, возможность определения зоны нелинейного деформирования бетона в области контакта по эпюре продольных деформаций, измеренных на поверхности образца. Предложена численная процедура образования поперечных трещин при растяжении железобетона. Получено удовлетворительное соответствие опытных и расчетных данных.

5. Численная реализация предложенной модели показала широкие возможности ее применения для моделирования объемных железобетонных элементов, армированных одним или несколькими стержнями, с учетом образования трещин при растяжении и нелинейном деформировании арматуры и бетона.

Основное результаты диссертации опубликованы в следующих научных трудах

Публикации в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования

1. Самошкин А.С., Тихомиров В.М. Математическая модель деформирования железобетона с учетом контактного взаимодействия его структурных компонентов // Вычислительные технологии. – 2017. – Т. 22. – Спецвыпуск 1. – С. 75-86. (50%)

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науке РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций

1. Тихомиров В.М., Астахов Ю.В., Самошкин А.С. Моделирование упругопластического сцепления арматуры с бетоном // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2015. – № 2. – С. 103-109. (33%)
2. Тихомиров В.М., Астахов Ю.В., Самошкин А.С. Исследование стадии обжатия элемента бетонной конструкции, армированной канатом // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2015. – №. 6. – С. 5-13. (33%)
3. Тихомиров В.М., Самошкин А.С. Математическая модель растяжения железобетонных элементов конструкций с учетом разрушения бетона // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – №. 11-12. – С. 13-20. (50%)
4. Самошкин А.С., Тихомиров В.М. Исследование нелинейного деформирования железобетона экспериментально-расчетными методами // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2017. – №. 5. – С. 17-27. (50%)

Публикации в других научных изданиях

1. *Тихомиров В.М., Астахов Ю.В., Самошкин А.С.* Исследование проблемы сцепления в армированном бетоне // Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные вопросы строительства» (Сибстрин) – 2015. – С. 58-62. (33%)
2. *Тихомиров В.М., Самошкин А.С.* Анализ сцепления арматуры с бетоном методами вычислительной механики // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики сборник докладов. – 2015. – С. 3748-3750. (50%)
3. *Самошкин А.С., Тихомиров В.М.* Надежность сцепления арматуры с бетоном в транспортных сооружениях // Повышение надежности и безопасности транспортных сооружений и коммуникаций: сб. тр. I Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов: Издательский дом «Райт-Экспо», 2015. – Т. 2. – С. 127-132. (50%)
4. *Тихомиров В.М., Самошкин А.С.* Надежность сцепления арматуры с бетоном в транспортных сооружениях // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2016. – № 1 (15). – С. 13-17. (50%)
5. *Самошкин А.С., Тихомиров В.М.* Математическая модель деформирования железобетона с учетом контактного взаимодействия структурных компонентов // Материалы XVII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию. г. Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2016. – С. 62-63. (50%)
6. *Тихомиров В.М., Самошкин А.С.* Численное решение нелинейных задач теории железобетона // Проблемы оптимального проектирования сооружений: доклады 4-й Всероссийской конференции Новосибирск: НГАСУ, 2017. – С. 272-279. (50%)

Самошкин Антон Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ
РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Подписано в печать 20.09.2017

Объем 1 печ. лист Тираж 100 экз. Заказ № 3204

Издательство ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»
630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191. Тел./факс (383) 328-03-81
