

На правах рукописи



КВАСНИКОВ АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ
АРМАТУРЫ РАЗЛИЧНОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ
С ТЯЖЕЛЫМ БЕТОНОМ**

Специальность: 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Акционерном Обществе «Научно-исследовательский центр «Строительство», Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева (НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

Научный руководитель: Доктор технических наук
Тихонов Игорь Николаевич

Официальные оппоненты: **Морозов Валерий Иванович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (ФГБОУ ВО СПбГАСУ), Заведующий кафедрой «Железобетонные и каменные конструкции»
Цыба Олег Олегович
кандидат технических наук,
Общество с ограниченной ответственностью «ЕвразХолдинг» (ООО «ЕвразХолдинг»), Менеджер проекта развития строительной металлопродукции


Ведущая организация: Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений»
(АО «ЦНИИПромзданий»)

Защита состоится «20» июня 2019 года в 14:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета Д 303.020.02, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство», по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, корпус 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6 и на сайте www.cstroy.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Шулятьев Станислав Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Способность железобетонных конструкций воспринимать внешние воздействия обеспечивается свойствами материалов, конструктивными особенностями элемента, а также прочностью сцепления бетона и арматуры в зоне контакта. Сцепление между арматурными стержнями и бетоном является одним из основных параметров надежной работы железобетонных конструкций, что было признано более чем 100 лет назад (Hyatt 1877).

Сцепление обуславливается действием ряда химических, физических и механических факторов. Одним из главных факторов, определяющих прочность и деформативность сцепления, является механическое зацепление арматуры за бетон, зависящее от эффективности периодического профиля ее поверхности. При изучении сцепления часто ограничиваются исследованием только взаимных смещений арматуры относительно бетона. В то же время для объективной оценки также необходимы исследования напряженно-деформированного состояния бетона в пределах радиуса и зоны активного влияния сцепления при различных периодических профилях арматурной стали. Наиболее актуальным и перспективным в данном случае являются исследования сцепления с использованием компьютерных технологий.

Степень разработанности темы.

В нашей стране и за рубежом велись многочисленные исследования совместной работы арматуры и бетона. В настоящее время с появлением современных компьютерных технологий появились возможности по созданию и использованию моделей совместной работы арматуры с бетоном, которые позволяют учитывать расчетные геометрические и физические параметры арматуры и бетона, близкие к действительным. Таким образом, можно получать результаты компьютерных теоретических исследований для сравнения их с теоретическими и экспериментальными опытами разных исследователей. Эти программные технологии хорошо зарекомендовали себя на мировом рынке и пользуются успехом в крупных научных организациях, как за рубежом, так и, к сожалению, в меньшем масштабе в России. Влияние изменения профиля стержневой арматуры на сцепление с бетоном пока еще мало изучено, так как требует выполнения большого объема экспериментальных работ. Использование компьютерных технологий позволит значительно сократить объемы экспериментов и наметить пути положительного решения поставленных задач.

Научно-техническая гипотеза заключается в предположении значительного различия напряженно-деформированного состояния бетона при армировании стержнями различного периодического профиля.

Объектом исследований являются арматура различного периодического профиля крупных диаметров и окружающий бетон в зоне их активного взаимодействия.

Предметом исследований является определение напряженно-деформированного состояния арматуры крупных диаметров и бетона при вытягивании из бетонных образцов и определение оптимальных геометрических параметров периодического профиля арматуры.

Цели и задачи исследования.

Целью настоящей работы является исследование напряженно-деформированного состояния арматуры различного периодического профиля крупных диаметров и тяжелого бетона с использованием численных и экспериментальных методов.

В ходе работы решаются следующие задачи:

- обзор и анализ теоретических и экспериментальных исследований сцепления стержневой арматуры и бетона отечественных и зарубежных авторов;
- проведение теоретических исследований по определению характера разрушения и прочности сцепления стержневой арматуры различного периодического профиля с бетоном при наиболее полном учете реального напряженно-деформированного состояния контактной зоны;
- разработка методики моделирования и выполнение численных исследований по определению напряженно-деформированного состояния арматуры с периодическим профилем разных видов и бетона с использованием объемных конечных элементов;
- экспериментальные исследования влияния вида и геометрических параметров периодического профиля арматуры крупных диаметров на прочностные и деформативные характеристики его сцепления с тяжелым бетоном при максимальном исключении влияния распорных составляющих силового взаимодействия;
- определение работоспособности оценочных и расчетных методик на основе сопоставления полученных расчетом эффективных параметров периодического профиля с фактическими параметрами профилей различных видов арматуры, массово применяемой и рекомендуемой для строительства, а также путем сравнения и анализа результатов численных и экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

- определены значения прочности сцепления арматуры с бетоном в зависимости от класса бетона и геометрических параметров периодического профиля;
- по результатам численного моделирования определены значения прочности и деформативности сцепления арматуры различного профиля с бетоном при изменении длины анкеровки, толщины защитного слоя и прочности бетона;
- установлены оптимальные значения геометрических параметров периодического профиля арматуры на основе результатов численных исследований;
- разработаны приспособления и методика проведения экспериментальных работ, получены экспериментальные данные по вытягиванию образцов арматуры различного периодического профиля крупных диаметров из бетона с максимальным исключением влияния на прочность сцепления распорных составляющих силового взаимодействия;
- получены расчетные зависимости перемещения нагруженных арматурных стержней разных видов в бетоне, в том числе при разных значениях относительной площади смятия поперечных ребер арматуры f_R ;
- уточнено значение коэффициента η_2 в формуле расчета базовой длины анкеровки СП 63.13330.2012 для арматуры крупных диаметров в массивных железобетонных конструкциях.

Теоретическая значимость работы состоит в следующем:

- определены зависимости прочности сцепления от геометрических параметров периодического профиля арматуры и характера разрушения бетона;
- установлены теоретические зависимости перемещения арматурного стержня с различными видами периодического профиля относительно бетона при их нагружении;
- определены параметры и коэффициенты упругопластического деформирования бетона при сжатии и растяжении в модели пластичного разрушения бетона с повреждениями.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- предложена корректировка значения коэффициента $\eta_2=1,0$ при определении R_{bond} в формуле (10.2) СП 63.13330.2012 для диаметров 36 и 40мм вместо $\eta_2=0,9$ при расчете длины анкеровки выпусков арматуры из монолитных железобетонных массивов (фундаментов), что позволит уменьшить расход арматуры;

- разработана методика оценки прочности сцепления с бетоном арматуры различного периодического профиля на основе механических сил зацепления при различном характере разрушения;
- разработана компьютерная методика моделирования и расчета совместной работы арматуры с периодическим профилем разных видов и бетона с использованием объемных конечных элементов.

Внедрение результатов исследования:

- результаты исследований использованы при переработке типовой серии 1.011.1-10 вып.1 «Конструкции цельных свай сплошного квадратного сечения» с учетом применения ненапрягаемой арматуры классов А500С (А500СП) и В500С;
- материалы исследований и рекомендации автора вошли в пособие по проектированию «Армирование элементов монолитных железобетонных зданий» Тихонова И.Н., монографию Тихонова И.Н., Мешкова В.З., Расторгуева Б.С. «Проектирование армирования железобетона», а также СТО 36554501-005-2006 «Применение арматуры класса А500СП в железобетонных конструкциях», СТО 36554501-016-2009 «Строительство в сейсмических районах», СТО 36554501-059-2018 «Строительство в сейсмических районах»;
- разработанные оценочные и компьютерные методики были использованы для обоснования производства Тульским металлургическим заводом арматуры с четырехсторонним винтовым профилем класса Ав500П, в том числе для дальнейших исследований, а также включения данной арматуры в «реестр инновационных решений, технологий, продукции, изделий, материалов высокотехнологичных услуг в сфере капитального строительства объектов использования атомной энергии (база НТД) Госкорпорации «Росатом», 2018 год.

Методология и методы исследования.

Теоретические исследования сцепления арматуры различного периодического профиля с бетоном выполнены с использованием теории сцепления, теории упругости и пластичности на основе механики деформированного тела.

При выполнении экспериментальных работ использовались общепринятые нормы и порядок проведения исследований с учетом статистической обработки результатов, основанные на действующих нормативных документах, а также с учетом оригинальных авторских методик. Численные исследования выполнялись с использованием программных комплексов, верифицированных в РФ, в которых используются известные модели взаимодействия арматурной стали и бетона. Для расчета совместной работы арматуры различного периодического профиля применялся метод конечных элементов. Математические модели были

верифицированы с аналогичными моделями, выполненными другими авторами. Предлагаемые методики оценивались путем сопоставления результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Личное участие автора в получении результатов работы заключается:

- в проведении анализа технической литературы и работ отечественных и зарубежных авторов по исследованию вопросов сцепления стержневой арматуры и бетона;
- в разработке методики определения прочности сцепления арматуры с тяжелым бетоном на основе анализа механических сил зацепления при различных геометрических характеристиках профиля арматуры и классах бетона;
- в выполнении теоретического исследования влияния различных параметров периодического профиля арматуры на напряженно-деформированное состояние бетона и арматуры;
- в проведении экспериментальных исследований на вытягивание арматурных стержней из бетонных образцов жестко замоноличенных в массиве и обработке экспериментальных данных;
- в проведении численных исследований с учетом реальной конфигурации арматурного периодического профиля и анализе результатов численных и экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном;
- в разработке предложений по корректировке коэффициента η_2 в формуле расчета расчетного сопротивления R_{bond} свода правил СП 63.13330.2012.

Положения, выносимые на защиту.

На защиту выносятся:

- методика расчета эффективности сцепления различных видов арматурного профиля с тяжелым бетоном в зависимости от схемы разрушения контактного слоя;
- компьютерная методика численного моделирования совместной работы арматуры и бетона с использованием объемных конечных элементов и полученные по результатам конечно-элементных расчетов оптимальные значения геометрических параметров периодического профиля;
- приспособления и методика проведения испытаний натуральных образцов арматуры больших диаметров на вытягивание из бетонных элементов при максимальном исключении влияния распорных составляющих силового взаимодействия;

- анализ и сопоставление результатов экспериментальных и численных исследований совместной работы бетона и арматуры различного периодического профиля;
- теоретические зависимости по определению прочности и деформативности сцепления арматуры различного профиля с бетоном.

Степень достоверности.

Достоверность результатов исследований, выводов и заключения подтверждается: использованием законов строительной механики, теории упругости и пластичности; использованием достоверных моделей деформирования арматуры и бетона; использованием конечно-элементных моделей, в полной мере соответствующих физическим экспериментальным образцам; удовлетворительной сходимостью результатов численных конечно-элементных расчетов и результатов экспериментальных исследований.

Апробация результатов.

Основные результаты исследований доложены и обсуждены на следующих конференциях и семинарах:

- II Всероссийская (Международная) конференция по бетону и железобетону «Бетон и железобетон - пути развития», г. Москва, 2005г.;
- конференции и круглые столы в рамках ежегодных Международных выставок «Металл-Экспо», г. Москва, 2013, 2015, 2017г.;
- конференция по инновационным эффективным видам продукции в госкорпорации «Росатом», г. Москва, 2018г.

Публикации по теме диссертации.

Результаты диссертационной работы отражены в 5 научных публикациях, вышедших в профильных журналах, рекомендованных ВАК РФ. Общий объем публикаций составляет 2,96 печатных листа, из них лично автором 1,55 печатных листа.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, основного текста, состоящего из 5-ти глав, заключения и списка литературы из 121 источника. Объем диссертационной работы составляет 176 страниц, 12 таблиц, 90 рисунков и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и объект исследования, отмечены методология и методы проведения исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы.

В первой главе проведен анализ технической литературы и обзор работ отечественных и зарубежных авторов по исследованиям вопросов сцепления стержневой арматуры и бетона. Были рассмотрены вопросы развития стержневой арматуры для железобетонных конструкций, вопросы напряженно-деформированного состояния в зоне контакта арматуры и бетона, проведен анализ моделей сцепления арматуры и бетона и анализ экспериментальных исследований механизма сцепления.

Изучению сцепления арматуры и бетона, проведению экспериментальных исследований и разработке моделей сцепления посвящены работы многих ученых: Астрова Т.И., Веселов А.А., Гараи Т.И., Гвоздев А.А., Георгиев Г.Д., Карпенко Н.И., Мадатян С.А., Мулин Н.М., Холмянский М.М., Оатул А.А., Овчинникова Н.Г., Судаков Г.Н., Тихонов И.Н., Терин В.Д., Зикеев Л.Н., Саврасов И.П., Цыба О.О., Хотько А.А., Amleh L., Barbosa M., Choi O.C., Clark A.P., Darwin D., Ghosh A., Goto Y., Lundgren K., Rehm G., Tepfers R.A., Watstein D. и другие.

В результате анализа выполненных исследований установлено:

- На протяжении длительного периода различными авторами были разработаны эмпирические зависимости прочности сцепления в зоне контакта арматуры и бетона. Эмпирические зависимости не имеют универсального характера, в связи с чем необходимо разработать обобщенную методику оценки прочности сцепления арматуры и бетона.

- Исследования влияния геометрических параметров арматурных стержней на совместную работу с бетоном, выполненные различными авторами, показали что ключевыми факторами периодического профиля арматуры являются: относительная площадь смятия поперечных ребер арматуры f_R , отношение шага поперечного ребра к высоте ребра t/h и отношение высоты ребра к диаметру арматурного стержня h/d .

- Научные работы, в которых проводились исследования влияния профиля арматуры на сцепление с бетоном, отражают в основном только конечный результат с указанием предельных состояний прочности сцепления и показывают результаты измерений внешних факторов исследуемых образцов. В исследованиях не достаточно данных о влиянии периодического профиля на напряженно-деформированное состояние по длине анкеровки в арматуре и окружающем бетоне.

- Были рассмотрены результаты исследований по численному моделированию совместной работы арматуры и бетона в контактной зоне с применением программ конечно-элементного моделирования. Данные исследования посвящены применению программных комплексов для решения задач сцепления в пространственной постановке с учетом нелинейности. Установлена необходимость проведения исследований по численному моделированию арматуры с различными параметрами периодического профиля поверхности.

По результатам анализа состояния вопроса поставлены задачи и цели исследования в рамках диссертации.

Во второй главе приведена методика определения характера сцепления с бетоном арматуры различного периодического профиля на основе анализа механических сил зацепления при различных геометрических характеристиках профиля арматуры и классах бетона.

По данной методике определены параметры сцепления арматурных стержней, представленных на рисунке 1.



Рисунок 1 – Общий вид арматуры с различными видами периодического профиля.

На рисунке 2 показаны схемы разрушения бетонных шпонок при вытягивании арматуры из бетона, механизм которых зависит от типа и вида арматурного профиля, а также от характера взаимодействия арматуры с бетоном. Профиль считается «жестким» при вытягивании арматурного стержня из бетонного образца, если разрушение происходит резко вследствие среза бетонных консолей (Рисунок 2а). Профиль считается «мягким», если разрушение происходит в результате постепенного смятия бетонных консолей и образования трещин раскалывания (Рисунок 2б).

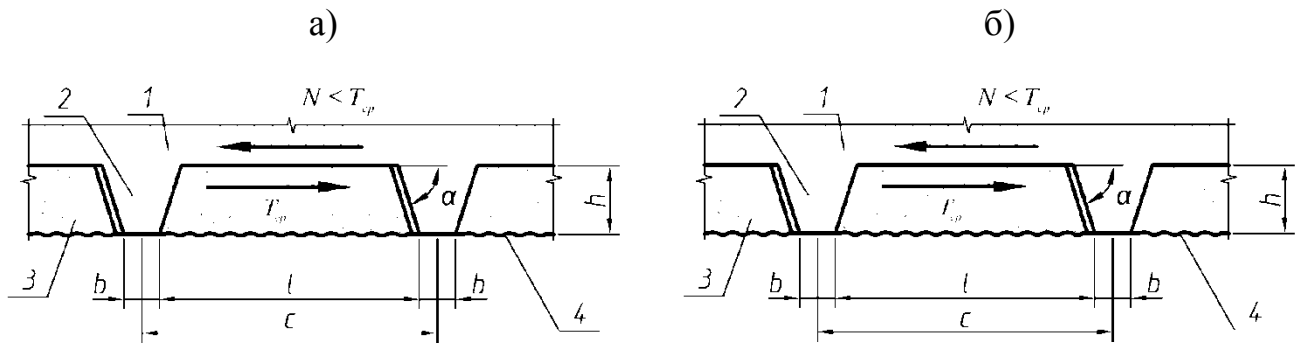


Рисунок 2 – Схемы разрушения бетонных шпонок:
а – «жесткий» профиль; б – «мягкий» профиль.

Индекс относительной площади смятия поперечных ребер периодического профиля f_R определяется из выражения:

$$f_R = kF_R / (\pi d c) \quad (1)$$

Для кольцевого профиля (Рисунок 1, а):

$$F_R^k = h \cdot (\pi d / 2 - b_1) \quad (2)$$

Для двухстороннего серповидного профиля (Рисунок 1, б):

$$F_R^c = 0.25 \cdot h \cdot \pi d \quad (3)$$

Относительная площадь смятия для четырехстороннего серповидного профиля (Рисунок 1, в) определяется по формуле:

$$f_R = \frac{kF_R}{\pi d c} \cdot \left(1 + \gamma \cdot \frac{h_2}{h}\right) \quad (4)$$

где h_2 и b_2 - высота и ширина двух дополнительных рядов ребер; γ - коэффициент равный:

$$\gamma = 1 - 4b_1 / (\pi d) \quad (5)$$

Фактическая площадь проекции одного ребра винтового профиля (Рисунок 1, г) определяется по формуле:

$$F_R^e = \frac{7\pi d h}{24} - h \cdot \left(\frac{e}{3} + b_1\right) \quad (6)$$

Приведенная ниже методика является более универсальной, чем оценка путем сопоставления относительной площади смятия f_R , поскольку позволяет определить характер взаимодействия арматуры различных видов периодического профиля с бетоном разных классов прочности.

Средняя прочность сцепления арматуры определяется упрощенной формулой:

$$t = T / (\pi d c) \quad (7)$$

где T – разрушающая нагрузка, равная:
при срезе:

$$T_{cp} = A_{cp} \cdot R_{cp,n} = A_{cp} \cdot R_{bt,n} \cdot q_{cp} \quad (8)$$

при смятии:

$$T_{cm} = A_{cm} \cdot R_{cm,n} = A_{cm} \cdot R_{b,n} \cdot q_{cm} \quad (9)$$

где A_{cp} и A_{cm} – площади среза и смятия бетонных шпонок между поперечными ребрами на интервале c .

$R_{cp,n}$ и $R_{cm,n}$ – нормативные значения сопротивления бетона при растяжении (срезе) и сжатии (смятии);

q_{cp} и q_{cm} – коэффициенты прочности бетона шпонок при срезе и смятии.

Площади среза и смятия для кольцевого профиля равны:

$$\begin{cases} A_{cp} = (c - b) \cdot (\pi d - 2b_1); \\ A_{cm} = 2 \cdot F_R^k; \end{cases} \quad (10)$$

Площади среза и смятия для серповидного профиля равны:

$$\begin{cases} A_{cp} = 0.75 \cdot (c - b) \cdot \pi d; \\ A_{cm} = 2 \cdot F_R^c, \end{cases} \quad (11)$$

Площади среза и смятия для четырехстороннего профиля равны:

$$\begin{cases} A_{cm} = 0.5 \pi d \cdot (h + h_2) - 2b_1 h_2; \\ A_{cp} = (c - b) \cdot (1.5 \pi d - 2b_1). \end{cases} \quad (12)$$

Площади среза и смятия для винтового профиля равны:

$$\begin{cases} A_{cm} = \frac{7 \pi d h}{6} - 4 \cdot h \cdot \left(\frac{e}{3} + b_1 \right); \\ A_{cp} = (c - b) \cdot \left(\frac{21 \pi d}{12} - 2e - 6b_1 \right). \end{cases} \quad (13)$$

Если разрушающая нагрузка T_{cp} меньше T_{cm} , то более вероятно разрушение от среза и профиль является «жестким», в противном случае вероятно разрушение от раскалывания и профиль является «мягким».

Из условия $T_{cm} < T_{cp}$ определяется формула, обеспечивающая «мягкость» профиля, в виде:

$$n = A_{cm} / A_{cp} < m = R_{cp,n} / R_{cm,n} = q \cdot R_{bt,n} / R_{b,n} \quad (14)$$

где q – коэффициент, определяемый по формуле:

$$q = q_{cp} / q_{cm} \quad (15)$$

По результатам ранее выполненных исследований шпоночных сопряжений значения равны $q_{cm}=1$, $q_{cp}=1,5$. Значения граничной величины m (14) для бетонов классов В15, В25, В40, В60 соответственно равны:

$$m = 0.15 - 0.126 - 0.109 - 0.096 \quad (16)$$

Осредненные значения n (14) равняются:

для кольцевого профиля:

$$n = n_k = 0.229 > m \quad (17)$$

для серповидного профиля:

$$\begin{cases} n = n_c = 0.102 < m \text{ для В15, В25 и В40;} \\ n = n_c = 0.102 > m = 0.096 \text{ для В60.} \end{cases} \quad (18)$$

При условии равенства высоты больших и малых ребер $h_2 = h$ среднее значение n для четырехстороннего профиля равняются:

$$n_n = 0.079 \quad (19)$$

Осредненное значение n для винтового профиля равняются:

$$n_g = 0.081 \quad (20)$$

Результаты выполненных расчетов прочности сцепления показывают, что максимальная прочность сцепления при смятии достигается при армировании четырехсторонним профилем (Рисунок 1в) для классов бетона В40 и В60. Максимальная прочность сцепления при срезе достигается при армировании кольцевым профилем (Рисунок 1а) для классов бетона В15 и В25. Четырехсторонний серповидный профиль превышает двухсторонний серповидный профиль (Рисунок 1б) по значениям прочности сцепления в пределах от 1,52 при В15 до 1,61 при В60. Значения прочности сцепления винтового профиля (Рисунок 1г) близки к соответствующим значениям профиля А500СП.

Таблица 1 – Средние характеристики прочности сцепления арматурных стержней

Вид профиля	h_{cp} мм	c_{cp} мм	b_{cp} мм	b_{1cp} мм	f_R	n_{cp}	t_{cp} МПа	t_{cm} МПа	l_{an}
кольцевой	1.67	8.67	1.50	2.21	0.1772	0.229	2.171	4.496	100%
двухсторонний	1.60	12.08	1.50	-	0.0664	0.102	1.834	1.684	78%
четырёхсторонний	1.54	14.17	1.50	2.21	0.1008	0.079	3.594	2.558	118%
винтовой	1,54	14,17	1,5	2,21	0,091	0,081	3.174	2.315	107%

По результатам проведенных исследований установлено:

- Разработанная методика определения характера совместной работы и прочности сцепления арматуры и бетона может быть использована для оценки эффективности сцепления с бетоном арматуры с периодическим профилями разных видов.
- Четырёхсторонние периодические профили имеют следующие преимущества:
 - значения прочности сцепления соответствуют значениям прочности сцепления кольцевого профиля, и превосходят значения прочности сцепления серповидного профиля для бетона классов по прочности от В15 до В60;
 - обеспечивают оптимальный уровень индекса сцепления (индекс Рема), который легко достигается при производстве арматуры;
 - по сравнению с другими широко используемыми образцами периодического профиля обеспечивают наиболее «мягкое» действие сцепления, исключая хрупкое разрушение даже при высокой прочности бетона;
 - не оказывают отрицательного влияния на заданную усталостную прочность арматурных стержней.

В третьей главе выполнено теоретическое исследование влияния различных параметров периодического профиля арматуры на напряженно-деформационное состояние в бетоне и арматуре. Для этих целей выполнены численные пространственные расчеты на вытягивание центрально расположенных стержней из бетонных цилиндров.

В рамках исследования были разработаны 55 образцов конечно-элементной модели в программном комплексе Abaqus. В качестве образцов на вытягивание используются три типа тяжелого бетона с кубиковой прочностью на сжатие 20, 30 и 40 МПа. Геометрические параметры периодического профиля арматуры и размеры бетонных образцов варьировались с целью получения общей картины взаимодействия арматуры и окружающего бетона. Диапазон значений относительной

площади смятия арматурных стержней составляет значения от 0,050 до 0,256; величина длины анкерки изменялась от 8d до 12d; величина защитного слоя изменялась от 2d до 6d. В качестве арматурной стали использовались стержни диаметром 25мм, центрально расположенные в бетонных образцах.

Численные исследования образцов на вытягивание выполнялись с учетом двух различных типов граничных условий: вариант с боковой фиксацией бетонной поверхности, и вариант с торцевым опиранием бетонной поверхности на неподвижную опору. Для описания материалов бетона и арматуры использовались упругие и пластические свойства. Для разработки конечно-элементной модели бетонного образца и арматурной стали использованы сплошные 8-узловые элементы типа C3D8R.

Выборочные результаты расчета представлены на рисунке 3 для арматурных стержней с различной относительной площадью смятия поперечных ребер при длине анкерки 12d и величиной защитного слоя 6d.

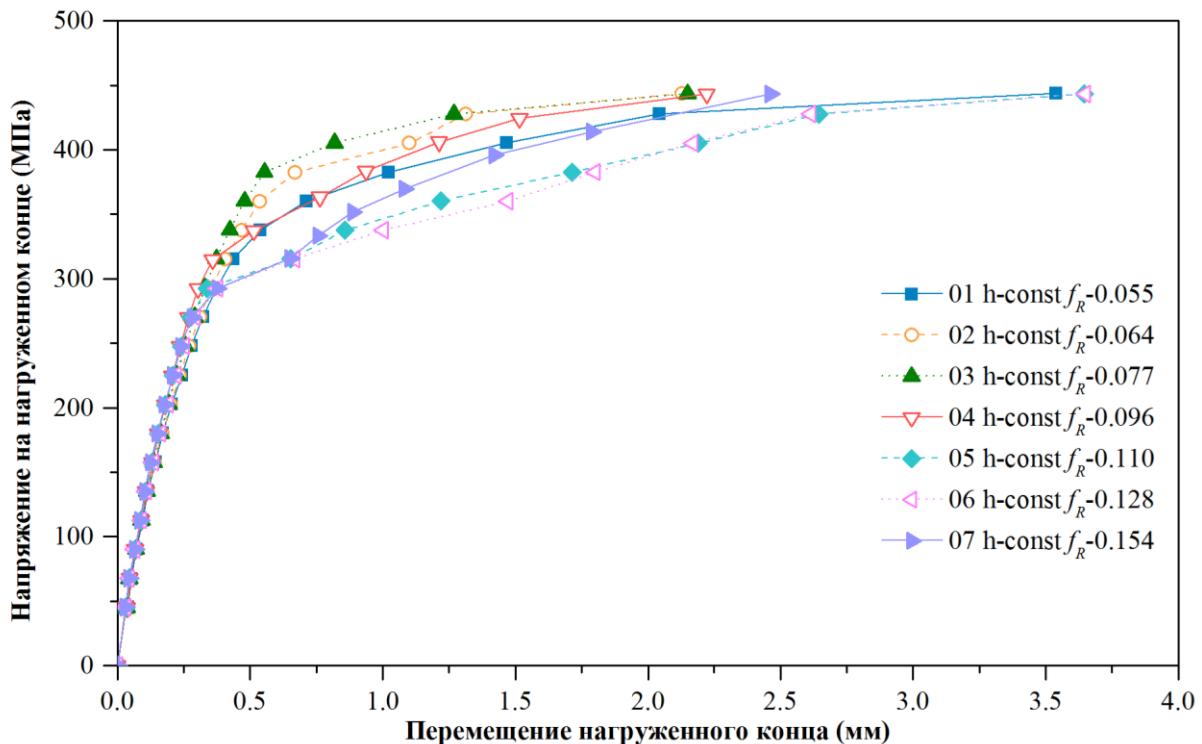


Рисунок 3 – Зависимость перемещения нагруженного конца от напряжения в арматуре при классе бетона В20

В результате выполненных компьютерных расчетов контрольных моделей с целью определения оптимальных значений геометрических параметров периодических профилей арматуры установлено, что параметры периодического

профиля не оказывают существенного влияния на напряженно-деформированное состояние арматуры и бетона при повышении прочности бетона на сжатие;

Полученные расчетные материалы, их анализ и результаты сопоставления с опытными данными, позволяют сделать вывод о работоспособности предлагаемой компьютерной расчетной методики.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований на вытягивание арматурных стержней из бетонных образцов жестко замоноличенных в массиве (Рисунок 4).

В процессе исследований получены сравнительные экспериментальные данные по перемещениям стержневой арматуры различных периодических профилей относительно бетонного образца. Определены длины анкеровки, достаточные для восприятия усилий в арматуре, соответствующих физическому или условному пределу текучести арматурного стержня при различных прочностях бетона и диаметрах арматуры.

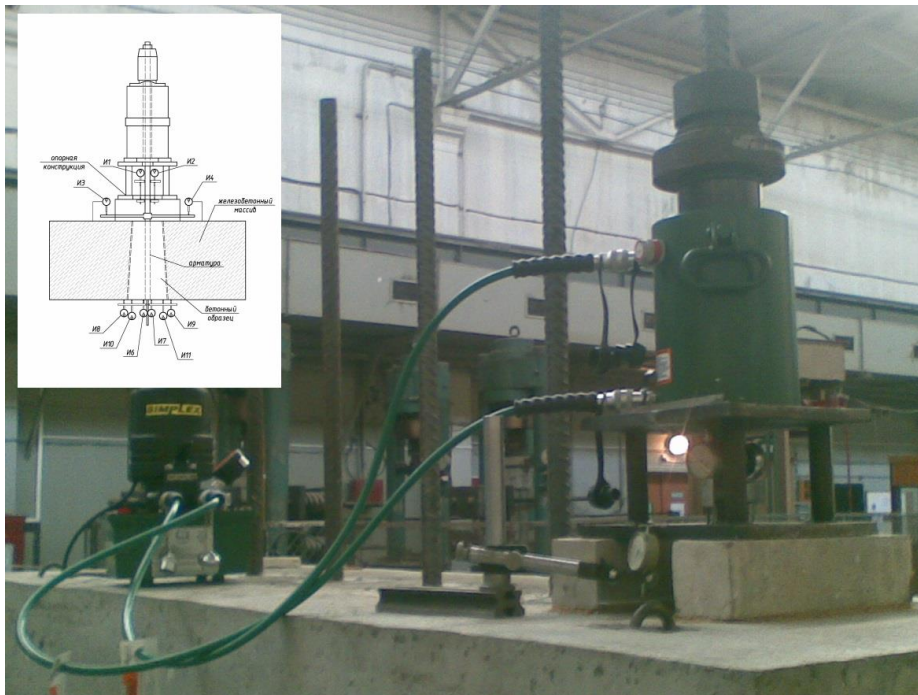


Рисунок 4 – Общий вид испытаний.

В описываемых исследованиях было смоделировано взаимодействие бетона и арматуры с различным периодическим профилем при предельно ограниченных радиальных деформациях в бетонных образцах. Это дало возможность более подробно изучить влияние вида периодического профиля и относительной площади смятия (критерия Рема) на совместную работу арматуры с бетоном, так как такой метод позволяет исключить продольные трещины раскола бетона.

Исследования производили при вытягивании центрально расположенных стержней из бетонных блоков в форме усеченной правильной четырехугольной пирамиды высотой 400мм со сторонами нижнего и верхнего оснований 200мм и 150мм соответственно. Бетонные блоки были изготовлены в жестком железобетонном массиве со встроенной опалубкой в виде металлических обойм многократного использования. Образцы извлекались из железобетонного массива только после испытаний. Было проведено 4 серии испытаний со стержнями класса А500С диаметром 28мм и 40мм из арматуры трех разных периодических профилей, которые имели длину заделки в бетоне, равную 5d, 6.5d, 8d. Усилие в стержне создавали ступенями проходным домкратом. Опоры для передачи силы реакции на массив были удалены от стержня на расстояние, при котором они практически не оказывали воздействия на бетонный образец.

Выборочные результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 5.

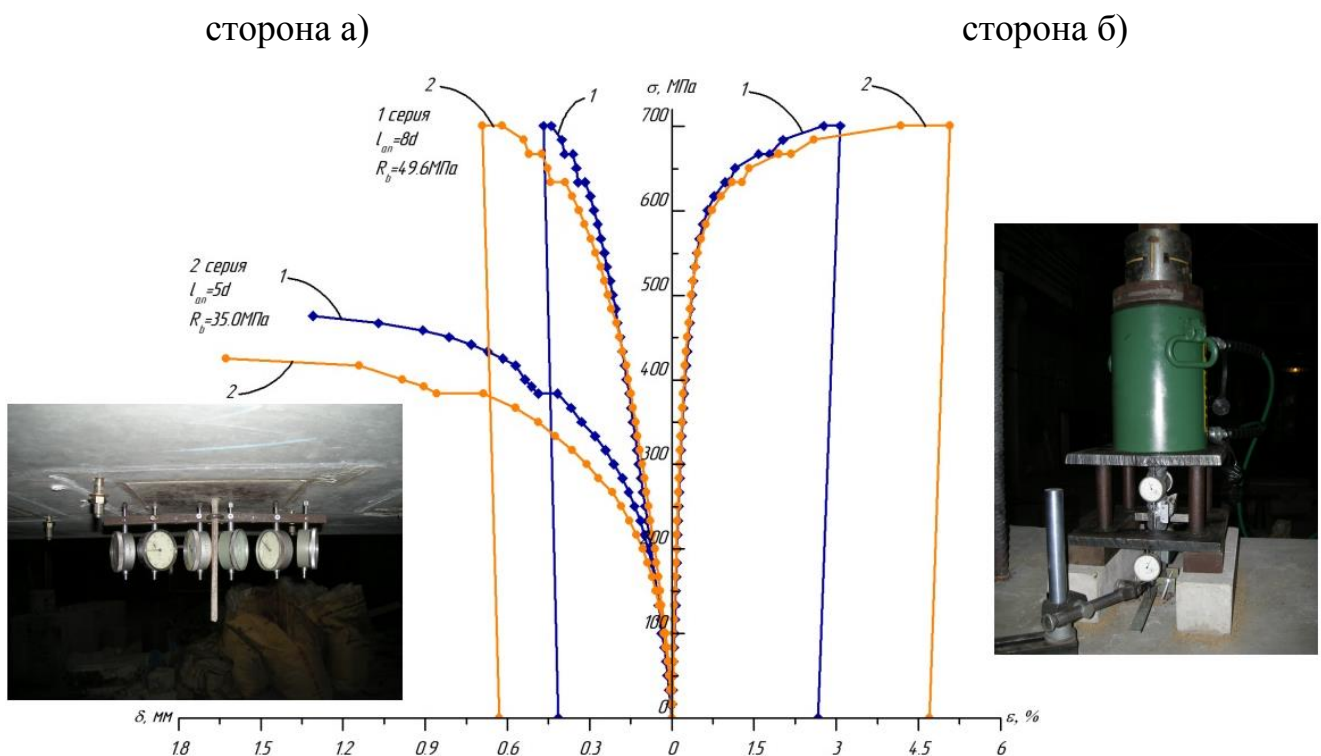


Рисунок 5 – Перемещения ненагруженного конца арматуры (сторона «а») и деформации нагруженного конца арматуры (сторона «б») (1 и 2 серии).
1 – четырехсторонний серповидный профиль; 2 – серповидный профиль.

В результате выполненных экспериментов установлено:

- При ограничении влияния распорных усилий увеличение критерия $R_{ма}$ за счет изменения конфигурации профиля с двухстороннего на четырехсторонний с $f_R=0,0595$ до 0,0762 увеличило прочность сцепления арматуры на 5–6% при длине

заделки в бетоне равной 5d и 6d. При длине заделки 8d прочность стержней обоих типов была одинакова и достигала своих предельных величин одновременно с достижением пределов текучести в металле арматуры. Абсолютные значения перемещений арматуры с профилем двухстороннего типа превышают значения перемещений арматуры с профилем четырехстороннего типа на 80% на отдельных этапах нагружения.

- Сравнительные испытания образцов с арматурой имеющей четырехсторонний ($f_R=0,0781$) и кольцевой профиль ($f_R=0,2049$) показали практически одинаковые результаты по прочности и деформативности сцепления с бетоном при заделке равной 5d.

- Важным критерием взаимодействия арматурного стержня и окружающего бетона в упругой стадии является относительная площадь смятия поперечных ребер арматуры; в упруго-пластической и пластической стадии, дополнительно к геометрическим параметрам, влияние на прочность и жесткость сцепления оказывает способность периодического профиля перераспределять усилия в продольном и радиальном направлении, наличие необходимого защитного слоя и поперечного армирования.

В пятой главе проведены численные исследования конечно-элементного расчета с учетом реальной конфигурации периодического профиля пяти различных типов арматурных стержней - кольцевой с поперечными ребрами постоянной высоты по ГОСТ 5781-82; двусторонний с серповидными ребрами в одном направлении по ГОСТ 52544-2006; четырехсторонний с серповидными ребрами в двух направлениях по ТУ 14-1-5526-2006; винтовой с серповидными ребрами по ТУ 0950-007-83936644-2018 и кольцевой с поперечными ребрами постоянной высоты и разреженным шагом поперечных ребер.

Результаты конечно-элементного расчета показывают, что максимальные эквивалентные напряжения, достигаемые в бетоне при армировании четырехсторонними профилями выше в 1,24 раза по сравнению с двухсторонним профилем. Зона максимальных напряжений у двухстороннего профиля значительно больше, чем у четырехсторонних профилей, что определяет их высокую двухстороннюю распорность. Деформации ненагруженного конца арматуры с двухсторонним профилем в 1,35 раза выше по сравнению с четырехсторонними профилями, что свидетельствует об эффективности пространственной работы последних, их низкой распорности и, следовательно, высокой прочности сцепления с бетоном.

На рисунках 6, 7 и 8 приведены изополя распределения эквивалентных напряжений в бетоне.

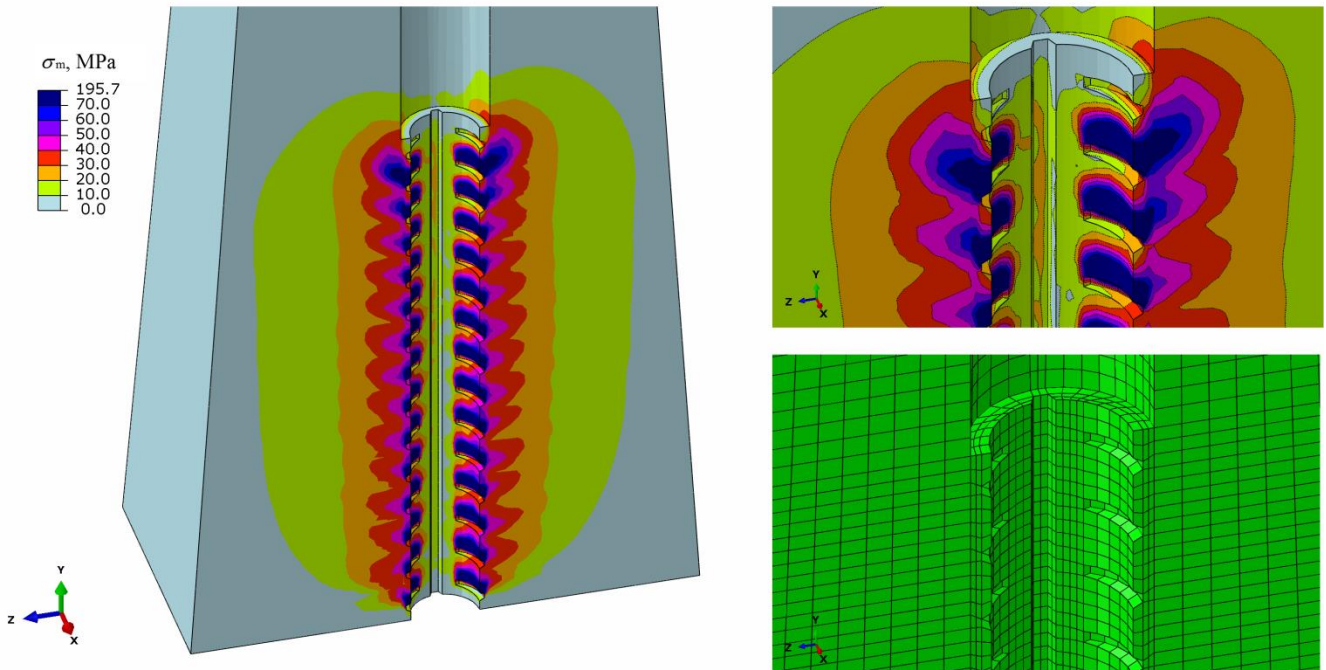


Рисунок 6 – Распределение эквивалентных напряжений σ_m (МПа) в бетоне для образца с серповидным профилем

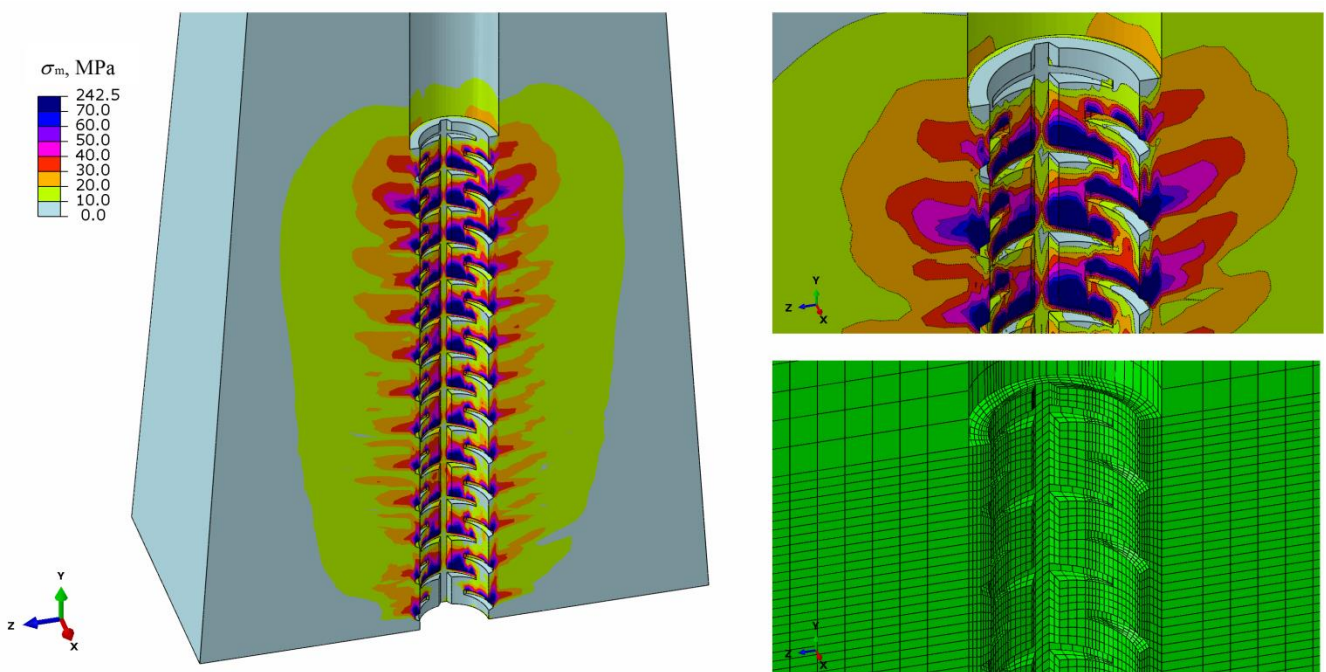


Рисунок 7 – Распределение эквивалентных напряжений σ_m (МПа) в бетоне для образца с четырехсторонним профилем

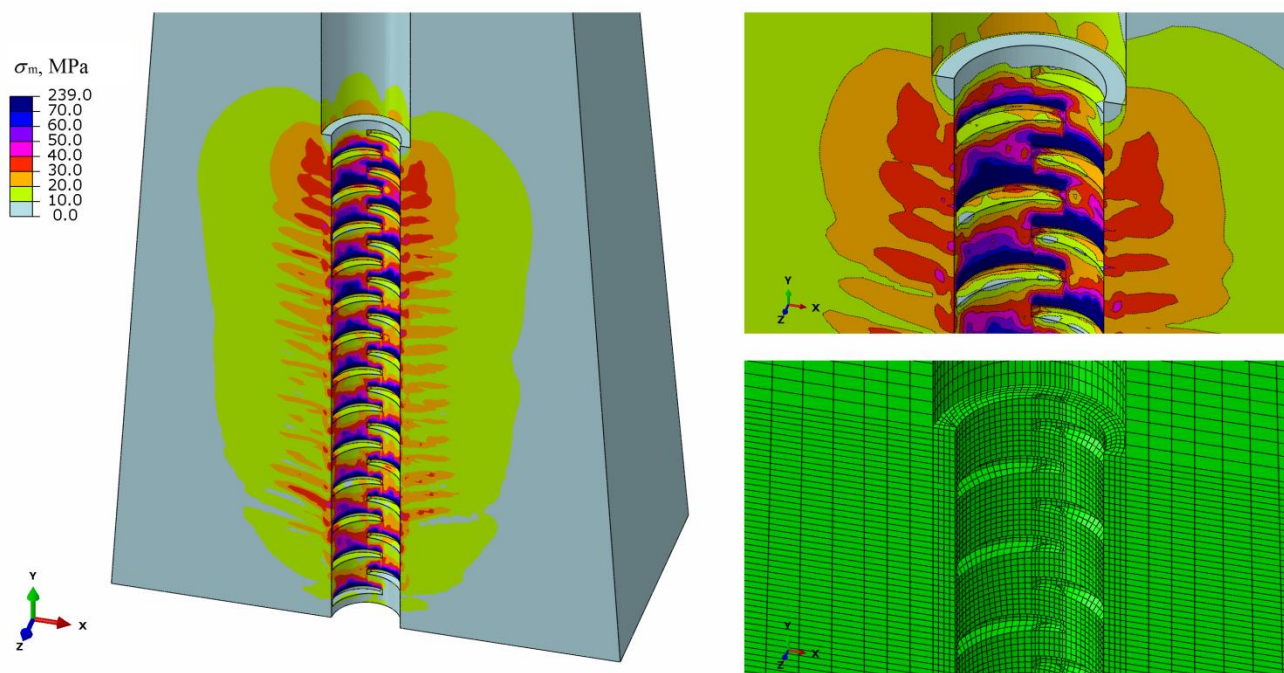


Рисунок 8 – Распределение эквивалентных напряжений σ_m (МПа) в бетоне для образца с винтовым профилем

Результаты конечно-элементного расчета были сопоставлены с экспериментальными данными арматуры с двусторонним серповидным профилем и с четырехсторонним серповидным профилем. Результаты расчета представлены на рисунке 9.

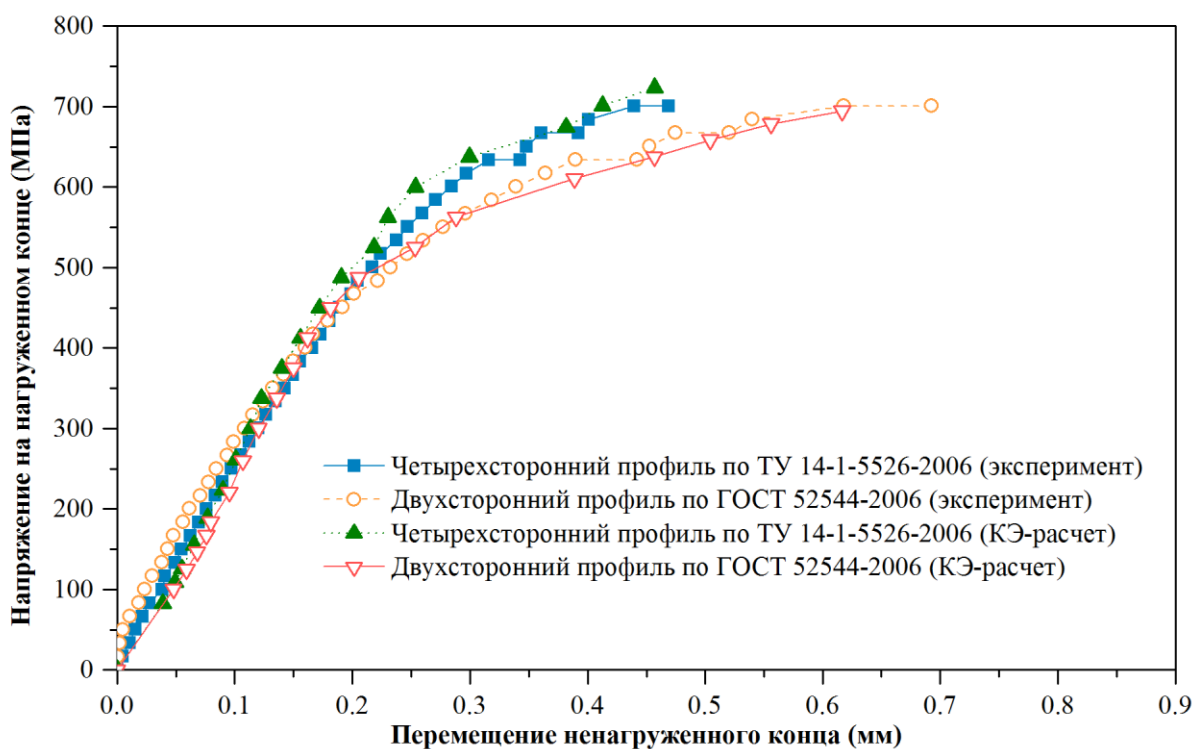


Рисунок 9 – Зависимость перемещения ненагруженного конца от напряжения в арматуре по результатам эксперимента и КЭ расчета

Максимальное отклонение деформаций при конечно-элементном расчете от деформаций при эксперименте составляет 13,76% и 15,1% для четырехстороннего профиля арматуры по ТУ 14-1-5526-2006 и для двухстороннего профиля арматуры по ГОСТ 52544-2006, соответственно. Удовлетворительная сходимость результатов конечно-элементного расчета и экспериментальных данных свидетельствует о работоспособности расчетных предпосылок и возможности их использования для решения различных практических задач.

На рисунке 10 приведены сводные результаты расчета пяти типов арматурных стержней.

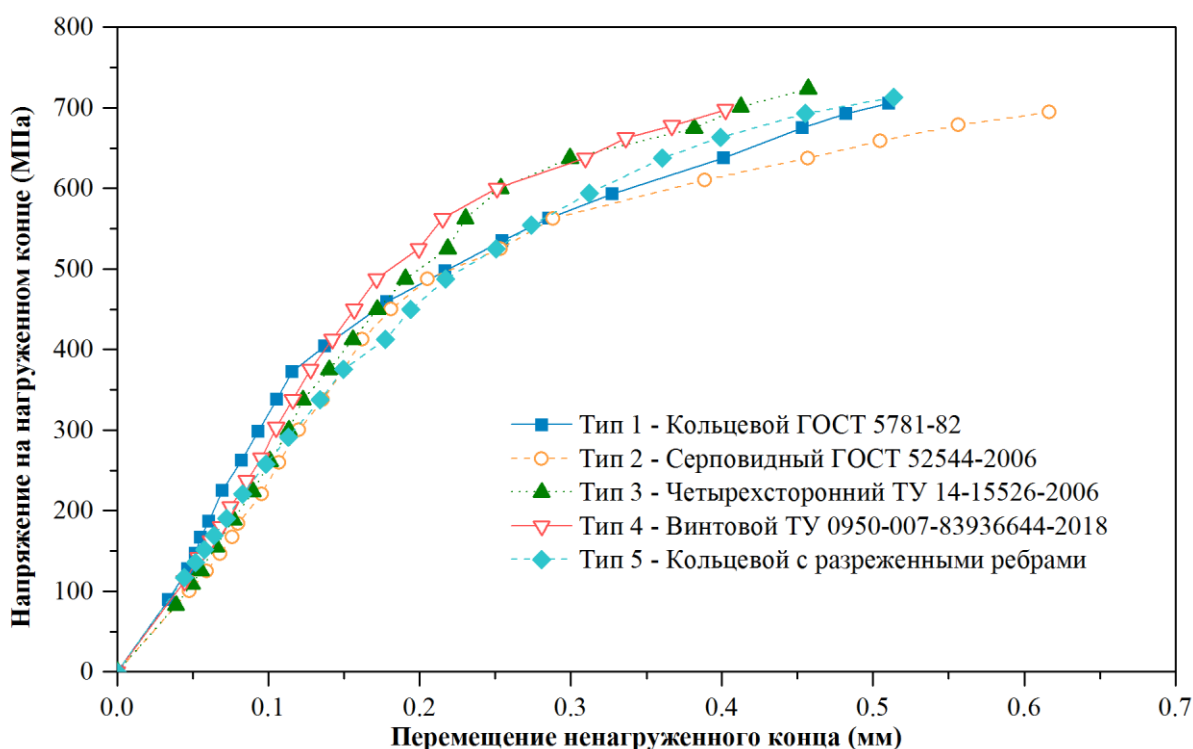


Рисунок 10 – Зависимость перемещения ненагруженного конца от напряжения в арматуре различного периодического профиля

Перемещения арматурного стержня до достижения нагрузки 40% от разрушающей графики стержней 2, 3, 4 и 5-го типов относительно совпадают, график образца 1 типа имеет более крутой угол наклона, т.е. профиль более жесткий, что вызвано большим значением критерия Рема, равным 0,21. При достижении нагрузки 65% от разрушающей профиль 1-го типа начинает проскальзывать, график меняет угол наклона – деформационные характеристики сравниваются с показателями стержня 3-го типа. На данном этапе серповидный профиль 2-го типа имеет преимущество перед кольцевым профилем 5-го типа за счет более высоких показателей зацепления двусторонне расположенных поперечных ребер. Свыше

нагрузок 75% от разрушающей заметно преимущество профилей 3-го и 4-го типов по сравнению со всеми образцами; кольцевой профиль 5-го типа показывает равномерно-плавные характеристики сцепления, что вызвано более равномерным распределением напряжений по окружности стержня.

На основе исследований 3-ей главы были определены полиномиальные выражения 4-го порядка зависимости перемещения нагруженного конца арматурного стержня от напряжения в арматурном стержне и относительной площади смятия при классах бетона В20, В30 и В40, соответственно:

$$s = 0.000009 \cdot 1.053^\sigma - 0.000954 \cdot 1.047^\sigma \cdot f_R + (0.2011 \cdot 1.021^\sigma \cdot f_R)^2 - (0.7758 \cdot 1.013^\sigma \cdot f_R)^3 + (1.01275 \cdot 1.009^\sigma \cdot f_R)^4 \quad (21)$$

$$s = 0.00054 \cdot 1.028^\sigma - 0.0466 \cdot 1.025^\sigma \cdot f_R + (0.08858 \cdot 1.012^\sigma \cdot f_R)^2 - (1.477 \cdot 1.008^\sigma \cdot f_R)^3 + (1.45 \cdot 1.006^\sigma \cdot f_R)^4 \quad (22)$$

$$s = 0.000065 \cdot 1.031^\sigma - 0.000278 \cdot 1.036^\sigma \cdot f_R + (0.0746 \cdot 1.017^\sigma \cdot f_R)^2 - (0.3977 \cdot 1.011^\sigma \cdot f_R)^3 + (0.649 \cdot 1.008^\sigma \cdot f_R)^4 \quad (23)$$

Также в данной главе разработаны рекомендации по расчету железобетонных конструкций с использованием объемных конечных элементов для бетона и арматурной стали.

Для расчета железобетонных конструкций рекомендуется использовать решатель Abaqus / Explicit. При расчете пользователю необходимо отслеживать этапы напряженно-деформированного состояния системы и геометрической неизменяемости. В процессе расчета могут быть достигнуты сверхвысокие перемещения и напряжения в конструкции, которые устанавливаются пользователем как предельные. Одним из факторов нарушения равновесного состояния конструкции является несоответствие опорных реакций приложенным к модели нагрузкам.

Для описания свойств бетона используется модель пластичного разрушения бетона с повреждениями «concrete damaged plasticity»; для описания свойств арматурной стали – модель пластичности «plastic». Поведение бетона и арматуры задается с помощью криволинейные диаграмм деформирования при растяжении и сжатии. Значения параметров свойств материалов необходимо согласовывать с результатами натуральных исследований.

Для конечно-элементной модели рекомендуется использовать 8-узловые гексаэдры типа C3D8R. В процессе разработки КЭ-модели возможны

несогласованности разбиения на 8-узловые элементы, вследствие чего рекомендуется при наличии малых геометрических форм исключать данные формы из расчетных моделей, если влияние данных объемов не оказывает существенного влияния на результаты расчета. Размер конечных элементов должен быть согласован с параметрами геометрической модели, в местах перехода или малых форм возможно применение сгущения конечно-элементной сетки. Численные исследования контрольных бетонных образцов размером 150мм показывают, что лучшее согласование с исходной кривой деформирования модели бетона с равномерным трещинообразованием достигается при размере конечных элементов $1/6$ стороны образца. Лучшее согласование с исходной кривой деформирования модели пластичного разрушения бетона с повреждениями достигается при размере конечных элементов $1/10$ стороны образца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ технической литературы по исследованиям сцепления стержневой арматуры с бетоном показал, что вопросы изучения напряженно-деформированного состояния и особенностей совместной работы арматуры различного периодического профиля и бетона недостаточно изучены, что послужило основанием для экспериментально-теоретических исследований диссертационной работы.

2. С целью оценки влияния различных видов периодического профиля на сцепление с бетоном разработана расчетная методика, основанная на учете геометрических параметров профиля арматуры; разработана компьютерная модель взаимодействия арматуры различного периодического профиля и тяжелого бетона с использованием объемных конечных элементов; выполнены экспериментальные работы, сопоставление результатов которых с результатами расчета по предложенным методикам показало хорошую сходимость.

3. По результатам теоретических исследований, оптимальные значения относительной площади смятия поперечных ребер арматурных стержней f_R находятся в интервале 0,064 ... 0,077. Оптимальные значения отношения шага поперечных ребер к высоте поперечного ребра t/h находятся в интервале 10,3 ... 14,6. Оптимальные значения отношения высоты поперечного ребра к диаметру стержня h/d находится в интервале 0,062 ... 0,075. Полученные результаты хорошо согласуются с исследованиями различных авторов. Получены эмпирические зависимости перемещений арматурного стержня в бетоне от относительной площади смятия поперечных ребер.

4. Разработаны приспособления и методика проведения экспериментов для оценки сцепления арматуры крупного диаметра с бетоном при ограничении влияния распорных составляющих силового взаимодействия. Экспериментально установлено, что при вытягивании арматурных стержней из бетонного массива в условиях ограниченных поперечных деформаций арматура с четырехсторонним профилем демонстрирует лучшие прочностные и деформативные показатели сцепления, чем арматура с двухсторонним серповидным профилем и практически одинаковые показатели по сравнению с арматурой кольцевого профиля.

5. Результаты численного расчета совместной работы арматуры различного периодического профиля имеют хорошее согласование с результатами экспериментальных работ, выполненных другими авторами при различных внешних условиях и параметрах модели, что указывает на универсальность предлагаемой методики.

6. По результатам экспериментальных исследований предлагается корректировка коэффициента η_2 , учитывающего влияние вида поверхности арматуры $\varnothing 36$ и $\varnothing 40$ мм в формуле (10.2) расчета расчетного сопротивления R_{bond} свода правил СП 63.13330.2012, на значение, равное 1,0 вместо 0,9 для армирования массивных конструкций, где влияние распорных усилий снижается за счет большого объема бетона или за счет развитого арматурного каркаса. Данная корректировка сделана в СТО 36554501-005-2006.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Методика компьютерного моделирования бетона и арматуры объемными конечными элементами может быть использована для оценки эффективности арматуры с различными видами профиля, а также при расчетах железобетонных конструкций как обычных, так и технически сложных и уникальных зданий и сооружений, в том числе при особых условиях нагружений.

2. Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение напряженно-деформированного состояния сжатых и изгибаемых конструкций с учетом моделирования арматуры с периодическим профилем.

3. Учитывая особенности совместной работы арматуры с бетоном разных видов и классов целесообразно проведение численных исследований сцепления арматуры различного периодического профиля с мелкозернистыми, легкими и ячеистыми бетонами, в том числе для арматуры мелких диаметров.

4. Для получения эффективного профиля арматуры необходимо проведение исследований по оптимизации геометрических параметров существующих видов периодических профилей, с целью снижения металлоемкости при сохранении прочности сцепления с бетоном.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Квасников А.А.** Совместная работа арматуры различного периодического профиля и бетона при ограниченных поперечных деформациях / А.А. Квасников // Бетон и железобетон. – 2009. – №4. – с.21-24.
2. **Квасников А.А.** Анализ экспериментально-теоретических исследований на сдвиг сопряжений сборных перекрытий / А.А. Квасников, А.С. Семченков, С.К. Макаренко // Бетон и железобетон. – 2008. – №1. – с.2-6.
3. **Квасников А.А.** Характер сцепления с бетоном стержневой арматуры различных профилей / А.С. Семченков, А.С. Залесов, В.З. Мешков, А.А. Квасников // Бетон и железобетон. – 2007. – №5. – с.2-7.
4. **Kvasnikov A.** Bond to concrete action of reinforcing bars with different deformation patterns / A. Kvasnikov, A. Semchenkov, V. Meshkov // Structural concrete. – 2009. – Vol. 10, No. 4. – P.203-209.
5. **Квасников А.А.** Методика расчета взаимодействия бетона и арматуры железобетонных конструкций в программном комплексе Abaqus / А.А. Квасников // Строительная механика и расчет сооружений. – 2019. – №1. – с.65-70.

Публикации в других изданиях:

6. **Квасников А.А.** Сравнительная оценка некоторых опытных и расчетных результатов определения совместной работы стержневой арматуры с бетоном / Г.Н. Судаков, А.А. Квасников // Научные труды 2-ой Всероссийской (Международной) конференции по бетону и железобетону: Сб. тр. НИИЖБ. – М., 2005. – Том 5. – С.483-485.