

**ХАРЬКОВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

**ЛЕ МИНЬ ЛОНГ**

УДК 624.012.35, 624.012.4, 539.319

**ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЗАЩИТНОГО  
СЛОЯ БЕТОНА В СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ  
НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ  
АРМАТУРЫ**

05.23.01 - строительные конструкции, здания и сооружения

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**ХАРЬКОВ – 2001**

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена на кафедре строительных конструкций Харьковской государственной академии городского хозяйства Министерства образования и науки Украины.

Научный руководитель: – кандидат технических наук, доцент  
**ШАПОВАЛОВ Александр Никитович**,  
доцент кафедры строительных конструкций  
Харьковской государственной академии  
городского хозяйства.

Официальные оппоненты: – доктор технических наук, профессор  
**ФОМИЦА Леонид Николаевич**,  
заведующий кафедрой строительных конструкций  
Сумского государственного аграрного университета;

– кандидат технических наук, доцент  
**ИЗБАШ Михаил Юрьевич**,  
доцент кафедры железобетонных и каменных  
конструкций Харьковского государственного  
технического университета строительства и  
архитектуры.

Ведущее учреждение: – Полтавский государственный технический  
университет имени Юрия Кондратюка,  
кафедра железобетонных и каменных конструкций  
Министерства образования и науки Украины,  
г. Полтава.

Защита диссертации состоится “ 31 ” мая 2001 г. в 14<sup>30</sup> час на заседании специализированного ученого совета Д 64.820.02 при Харьковской государственной академии железнодорожного транспорта по адресу: 61050, г. Харьков, площадь Фейербаха, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковской государственной академии железнодорожного транспорта по адресу: 61050, г. Харьков, площадь Фейербаха, 7.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_\_ ” апреля 2001 г.

Ученый секретарь  
специализированного ученого совета,  
кандидат технических наук, доцент  
Е.М.Ермак

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Распространенные в практике строительства и эксплуатации железобетонные сжатые элементы в ряде случаев имеют повреждения в виде разрушения защитного слоя бетона вдоль рабочей арматуры. Эти повреждения связаны с механическими, химическими, технологическими и другими причинами. В связи с этим возникает проблема оценки несущей способности таких поврежденных элементов, то есть их остаточной прочности, на этой основе разработки той или иной схемы усиления. В нормативной и справочной литературе данные вопросы упрощаются или не принимаются во внимание. Затраты на элементы усиления не всегда оправданы. А это дополнительный металл, арматура, бетон и трудоемкость работ. Поэтому тема диссертации имеет важное народнохозяйственное значение.

Встречаются случаи отслоения защитного слоя бетона, вызванные пожаром. В этом случае также необходимо оценивать эксплуатационные характеристики сечений с учетом снижения уровня сцепления бетона с арматурой и с учетом уменьшения всего бетонного сечения. При оценке влияния степени оголения арматуры на общую несущую способность железобетонного ослабленного сжатого элемента очень важно определить зависимость деформаций арматуры от деформаций бетона на всем этапе нагружения, поэтому в диссертации данному вопросу уделяется наибольшее внимание. Проведенные экспериментальные исследования позволили подтвердить теоретические выводы относительно процесса развития деформаций в арматуре при локальном отслоении защитного слоя бетона.

Существующие методы исследования сил сцепления между бетоном и арматурой базируются в основном на рассмотрении растянутых железобетонных элементов, затем эти результаты переносятся на прочностные и деформативные характеристики сжатых элементов, что нельзя считать правомерным подходом в решении поставленной в диссертации задачи.

### **Связь работы с научными программами, планами, темами.**

Диссертационная работа выполнена по тематике научно-исследовательской работы кафедры строительных конструкций Харьковской государственной академии городского хозяйства: «Реконструкция, ремонт и усиление промышленных и гражданских зданий и сооружений», и в соответствии с координационным планом Министерства образования и науки Украины, раздел 21 – «Создание новых технологий, методов организации и механизации строительных процессов, которые обеспечивают эффективность строительства и модернизацию зданий и сооружений». Госбюджетная тема: «Создание новых технологий, методов механизации, которые обеспечивают строительство и модернизацию зданий и сооружений» – № государственной регистрации 0199U004287.

### **Цель и задачи работы.**

Целью работы является оценка степени сцепления арматуры с бетоном в сжатых железобетонных негибких элементах с различной мерой охвата бетоном арматуры и определение на этой основе несущей способности железобетонных элементов с повреждением защитного слоя бетона, разработка рекомендаций по усилению ослабленных таким образом элементов.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить такие задачи:

1. Разработать методику расчета железобетонных сжатых негибких элементов с учетом нарушения степени сцепления бетона с арматурой на разных уровнях напряженного состояния.
2. Изучить напряженно-деформированное состояние железобетонных сжатых элементов в зоне ослабленного контакта бетона с арматурой.
3. Разработать условную схему распределения напряжений сцепления по контуру арматуры в случае передачи сжимающих напряжений через бетон.
4. Изучить степень влияния месторасположения арматуры и ее диаметра на развитие в ней продольных деформаций в случае передачи сжимающих напряжений через бетон.
5. Проанализировать на основании экспериментального материала механизм взаимодействия бетона и арматуры на параметры прочности бетона при сжатии.
6. Разработать теоретический аппарат, на основании которого можно было бы рассчитать напряженно-деформированное состояние сжатой арматуры на разных уровнях загрузки при полном и неполном охвате ее бетоном.
7. Экспериментально проверить развитие деформаций в сжатой арматуре при передаче напряжений на нее через бетон в случае полного и неполного охвата ее бетоном по периметру.
8. Внедрить результаты теоретико-экспериментальных исследований в практику обследования, реконструкции и усиления зданий и сооружений.

**Объектом исследования** являются сжатые короткие железобетонные элементы (колонны, элементы ферм, подкосы, столбы и др.), в которых может быть поврежден защитный слой бетона и оголена арматура.

**Предмет исследования.** Напряженно-деформированное состояние арматуры с учетом нарушения сил сцепления в зависимости от уровня напряженного состояния, месторасположения арматуры и ее диаметра, а также от степени оголения арматуры бетоном.

**Методы исследования.** Определение напряженно-деформированного состояния арматуры в сжатых коротких элементах выполняется теоретическим путем с использованием условия равновесия и заданием эмпирической функции для касательных напряжений. При этом не используется равенство деформаций арматуры деформациям бетона. Считается, что деформации арматуры уменьшаются относительно деформаций бетона, особенно при высоких уровнях нагружения.

Для теоретического решения поставленной задачи рассматривается модель железобетонного элемента как условно составного стержня с представлением связей между арматурой и бетоном в виде упругоподатливых элементов. Значение жесткости этих связей задается в виде аналитической функции, которая зависит от уровня напряженного состояния, расположения арматуры, степени оголения арматуры и других параметров. Принципиальным отличием теоретического аппарата по определению деформаций и напряжений в сжатой арматуре от существующих методов является то, что касательные напряжения определяются по уровню напряженного состояния в бетоне, а не по значению смещения арматуры в бетоне, которое всегда является неизвестной величиной.

**Научная новизна полученных результатов:**

- теоретически исследовано напряженно-деформированное состояние железобетонных сжатых коротких элементов, которые имеют локальные ослабления в зоне расположения продольных крайних стержней;
- разработана новая условная модель контакта бетона с арматурой в виде элементов жесткости для составных стержней;
- проведены многоплановые экспериментальные исследования по определению развития деформаций в арматуре и бетоне при сжатии для различных положений арматуры, учитывая ее центральное и краевое положения; при этом передача нагрузки производилась только через бетон;
- предложена эмпирическая зависимость, которая позволяет установить взаимосвязь деформаций арматуры и деформаций бетона на всем диапазоне нагружения с учетом положения арматуры в плоскости сечения и диаметра арматуры;
- разработана методика расчета несущей способности сжатых негибких элементов, имеющих неполный контакт бетона по периметру арматуры.

**Практическая ценность работы.** Теоретические и экспериментальные исследования позволяют более точно определять несущую способность железобетонных сжатых элементов с локальными повреждениями защитного слоя или неполным контактом бетона с арматурой по ее периметру, которые возникают при различных условиях эксплуатации.

Предложены четыре группы повреждений защитного слоя бетона железобетонных элементов. В зависимости от конкретной группы определяется методика расчета несущей (остаточной) способности сжатого элемента, на основе чего и решается вопрос усиления этого элемента.

Разработаны корректирующие параметры для предельных значений напряжений в сжатой арматуре в случае разрушения бетонной составной части железобетонной сжатой конструкции. Эти параметры дают снижение напряжений, которые в нормативных документах принимаются постоянными и равными  $R_{sc} = 400$  или 500 МПа для класса А-III и выше.

**Личный вклад соискателя:**

- проанализированы на основе литературных источников различные подходы к оценке напряженно-деформированного состояния сжатой арматуры в зависимости от уравнения касательных напряжений в зоне контакта “бетон – арматура”;
- проведен теоретический анализ определения напряжений и деформаций в сжатой арматуре при выполнении условия совместности деформаций бетона и арматуры в случае передачи нагрузки через бетон по традиционной схеме;
- разработана новая модель работы сжатого железобетонного элемента как составного стержня с представлением специфики работы контактной зоны в виде элементов жесткости;
- составлена алгоритмическая блок-схема определения напряжений в арматуре, исходя из принятой теоретической условной модели, реализована эта блок-схема в программе для расчета на персональном компьютере;
- проведены экспериментальные исследования по определению деформаций в арматуре в сжатых железобетонных образцах с учетом уровня загрузки, различного положения арматуры (центрального и краевого), различной степени оголения

арматуры (25%, 50%, 75% периметра), различных классов бетона, различных диаметров арматуры;

- теоретически проанализирована величина предельной сжимаемости бетона различных классов и предложена наиболее возможная ее величина для определения предельных напряжений в арматуре при сжатии железобетонных элементов;

- на основании теоретических и экспериментальных исследований предложена эмпирическая зависимость для деформаций сжатой арматуры, которая учитывает уровень нагрузки, расположение арматуры, ее диаметр, класс бетона и класс арматуры;

- выполнен теоретический анализ распределения касательных напряжений в зоне ослабленного контакта арматуры с бетоном, и на этой основе установлены соотношения жесткостных параметров как для частично оголенных стержней, так и полностью закрытых;

- разработана методика расчета сжатых коротких железобетонных элементов по несущей (остаточной) способности, имеющих неполный контакт бетона по периметру арматуры;

- предложены четыре схемы повреждений контактной зоны “бетон-арматура” и на этой основе выполнены расчеты несущей способности железобетонных элементов и предложены соответствующие схемы усиления.

**Внедрение результатов работы.** Методика расчета несущей способности поврежденных железобетонных сжатых элементов в случаях реконструкции и усиления зданий и сооружений внедрена на ЗЖБК-1 в г. Харькове и в научной части Харьковского ПромстройНИИпроекта и других организациях.

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на XXIX, XXX научно-технических конференциях Харьковской государственной академии городского хозяйства в 1998-2000 гг. Кроме того, отдельные материалы диссертации изложены в докладе на международной конференции в Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры (г. Днепропетровск) в 1999г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 6 научных статей, 2 публикации тезисов докладов.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, выводов, списка литературных источников, 4 приложений и насчитывает 181 страницу, в том числе 135 страниц машинописного текста, 16 таблиц, 43 рисунка и 9 страниц приложений. Список литературных источников состоит из 170 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

**Во введении** раскрывается состояние научной проблемы, обосновывается актуальность темы, сформулирована цель исследований, научная новизна, представлены практические и теоретические значения полученных результатов.

**В первом разделе** приводится детальный анализ литературных материалов, посвященных проблеме развития контактных напряжений для железобетонных элементов в зоне соединения арматуры с бетоном для различных видов напряженного состояния: растяжения, сжатия, изгиба. В последнее время в практике

реконструкции и усиления зданий и сооружений острой проблемой становится задача оценки несущей способности железобетонных сжатых элементов, которые имеют различные повреждения или разрушения защитного слоя бетона в зоне размещения продольной рабочей арматуры. В этом случае нужно определить степень остаточного сцепления арматуры с бетоном и участие арматуры в оценке несущей способности всего сжатого элемента. В связи с нарушением совместной работы бетона и арматуры возникает вопрос, как надо оценивать напряжения в арматуре в стадии разрушения железобетонного элемента и какие нужно применить конструктивные решения, чтобы усилить ослабленные элементы. Наиболее употребляемые мероприятия на современном этапе усиления сжатых элементов (колонн, столбов, элементов ферм и др.) – это устройство металлической или железобетонной обоймы по всей высоте, которая не всегда уместна да и экономически необоснованна.

Изучению контактных напряжений при сжатии на различных уровнях напряженного состояния посвящено очень мало теоретических и экспериментальных работ. Большинство этих исследований посвящено растянутым элементам. Первые шаги в изучении контактных сил сцепления были сделаны Баушингером, Бахом Г., Абрамсом Д.А., Фриче Р., Гленвилем К. и другими исследователями. Потом проводились широкомасштабные исследования сил сцепления при растяжении и сжатии целой группой ученых и специалистов различных научно-исследовательских институтов и подразделений. Появляются глубокие теоретические и экспериментальные исследования в этом направлении. Среди наиболее известных следует отметить работы Бабича В.М., Байкова В.Н., Бондаренко В.М., Букаченко А.И., Веселова А.А., Гвоздева А.А., Залесова А.С., Карпенко Н.И., Молодченко Г.А., Назаренко В.Г., Назаренко П.П., Оатула А.А., Овчинниковой И.Г., Ржаницина А.Р., Столярова Я.В., Савкина С.А., Талья К.Э., Тевелева Ю.А., Фомицы Л.Н., Фрайфельда С.Е., Холмянского М.М., Чистякова Е.А., Чихладзе Э.Д., Шагина А.Л., Шмуклера В.С. и многих других. Среди зарубежных исследователей следует отметить работы Гийона И., Бишара А., Гото Д.Ж., Одмана С.Т., Рэма Г., Шкорделиса А.С., Вестлюнга Г. и других. Все выполненные работы базировались на двух основных принципах. Во-первых, утверждается гипотеза равенства деформаций арматуры и бетона на всем этапе нагружения. Во-вторых, при определении напряженно-деформированного состояния арматуры рассматривается симметричное центральное положение арматуры в элементе, что совсем не соответствует реальной картине размещения арматуры в железобетонном элементе. Кроме этого, большинство исследователей автоматически переносит результаты теоретических и экспериментальных данных, полученных для растянутых элементов, на сжатые. В литературных источниках совсем нет данных о напряженном состоянии и сцеплении сжатой арматуры, если она охвачена бетоном не по всему периметру, а только частично. И, напоследок, следует отметить существенное противоречие в теории расчета сжатых железобетонных элементов, которое состоит в том, что в случае предельного состояния принимается равенство предельных деформаций бетона и арматуры, в то время как в этом случае резко нарушается контактная зона, и деформации арматуры не успевают за деформациями бетона.

В общей теории сцепления сейчас существует четыре основные направления оценки напряженно-деформированного состояния арматуры при симметричном ее положении. Первое – это контактная задача теории упругости с передачей напряжений бетона на арматуру; второе – эмпирический подход при определении касательных напряжений и составление на этой основе исходных зависимостей; третье – моделирование контактного слоя в виде конусов и призм с записью соотношений между деформациями и перемещениями на основе теории упругости; четвертое – использование условной модели “бетон-арматура” в виде составного стержня, где контактные связи представлены конечной жесткостью. Однако все эти направления обходят вопрос учета неполного контакта бетона с арматурой, который отмечается в поврежденных зонах бетона в процессе эксплуатации железобетонных элементов.

Первые шаги в направлении оценки влияния неполного контакта бетона с арматурой на несущую способность железобетонных изгибаемых элементов сделали Левин В.М., Савкин С.А., Стебленко Л.В., Решетарь Ю.Г., Яковленко Г.И. и другие. Но эти исследования не относились к анализу касательных напряжений в случае оголения и влияния степени оголения арматуры на напряженное состояние арматуры.

На основе проведенного анализа состояния вопроса о сцеплении арматуры с бетоном при сжатии и влияния на сцепление неполного контакта и расположения арматуры в сечении определены задачи диссертационной работы.

**Второй раздел** посвящен теоретическим задачам, которые возникают при определении напряжений и деформаций в сжатой арматуре, если нагрузка передается через бетон. Первый вариант решения задачи базируется на традиционной схеме определения напряжений в арматуре, если базовыми уравнениями служат: условие равновесия для произвольного сечения в железобетонном элементе, симметричное расположение арматуры, равенство деформаций  $\varepsilon_s = \varepsilon_b$  на всем этапе нагружения, эмпирическое задание зависимости нормальных напряжений в арматуре от касательных напряжений или смещения арматуры в бетоне. В качестве такого исходного уравнения была использована зависимость, предложенная С.Е.Фрайфельдом и А.И.Букаченко с введением множителя  $m$ :

$$\Delta\sigma_{sx} = A(1 - e^{-kq_x})m, \quad (1)$$

где  $\Delta\sigma_{sx}$  – прирост напряжений в арматуре вдоль элемента;

$q_x$  – смещение арматуры в бетоне;

$A, k$  – эмпирические коэффициенты;

$m$  – параметр, учитывающий снижение напряжений в арматуре за счет ее оголения.

Используя равенство  $\tau_{cu} = \frac{A_s}{u} \frac{d\sigma_{sx}}{dx}$  и соотношения  $\frac{E_s}{1 + \mu\alpha} \frac{dq_x}{dx} = \Delta\sigma_{sx}$ ,

$\sigma_{sx} - \frac{\alpha\sigma_{b_0}}{1 + \mu\alpha} = \Delta\sigma_{sx}$ , а также проинтегрировав (1) по  $dq_x$ , получим значение касательных напряжений:

$$\tau_{cu} = \frac{A_s}{u} \frac{1 + \mu\alpha}{E_s} A^2 m^2 k e^{-kq_x} (1 - e^{-kq_x}), \quad (2)$$

где  $A_s, u$  – площадь и периметр арматуры;  $E_s$  – модуль упругости арматуры;

$\alpha = E_s/E_b$  – коэффициент приведения;  $\mu$  – коэффициент армирования.



Значение напряжений в арматуре можно найти по следующей зависимости, если нагрузка передается через бетон:

$$\sigma_{sx} = \frac{\alpha \sigma_{b_0}}{1 + \mu \alpha} + \frac{E_s}{1 + \mu \alpha} \frac{dq_x}{dx}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{b_0}$  – внешнее напряжение в бетоне в месте передачи нагрузки.

Для определения  $\frac{dq_x}{dx}$  используется дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2 q_x}{dx^2} = L^2 k e^{-k q_x} (1 - e^{-k q_x}). \quad (4)$$

В этом уравнении  $L = \frac{A(1 + \mu \alpha)m}{E_s}$ .

Окончательное значение  $\sigma_{sx}$  с учетом решения уравнения (4)

$$\sigma_{sx} = \frac{\alpha \sigma_{b_0}}{1 + \mu \alpha} \left\{ 1 + \sqrt{1 - \frac{L^2 E_s^2}{\alpha^2 \sigma_{b_0}^2} \left[ e^{-k q_x} (2 - e^{-k q_x}) - e^{-k q_0} (2 - e^{-k q_0}) \right]} \right\}, \quad (5)$$

где  $q_0$  – начальное смещение арматуры в начале координаты  $x$ .

Затем напряжение в бетоне с использованием условия равновесия определяется:

$$\sigma_{bx} = \sigma_{b_0} - \sigma_{sx} \mu.$$

Полученные зависимости для  $\tau_{cy}$  и  $\sigma_{sx}$  зависят от экспериментальных параметров  $A$ ,  $k$ ,  $q_x$ , а определение их для каждой конкретной задачи составляет самостоятельную трудоемкую проблему, в особенности параметра  $q_x$ .

Поэтому традиционный путь теоретического определения напряжений для сжатой арматуры имеет целый ряд сложностей и предположений, которые обусловили поиски других вариантов решения поставленной задачи. И прежде всего надо было по возможности не использовать условие равенства деформаций  $\varepsilon_s = \varepsilon_b$ , а также избавиться от неопределенного параметра  $q_x$ .

Одним из вариантов определения напряженно-деформированного состояния сжатой арматуры с учетом полного и неполного охвата ее бетоном и с учетом различного уровня напряженного состояния является представление железобетонного элемента как составного стержня с определенной жесткостью контакта, которая изменяется в зависимости от уровня напряженного состояния, расположения арматуры в сечении и степени оголения арматуры.

Расчетная модель такого стержня приведена на рисунке 1.

В этом случае исходные предпосылки предусматривают: в уравнениях для  $\sigma_{sx}$  и  $\tau_{cy}$  не фигурирует значение смещения  $q_x$ , которое

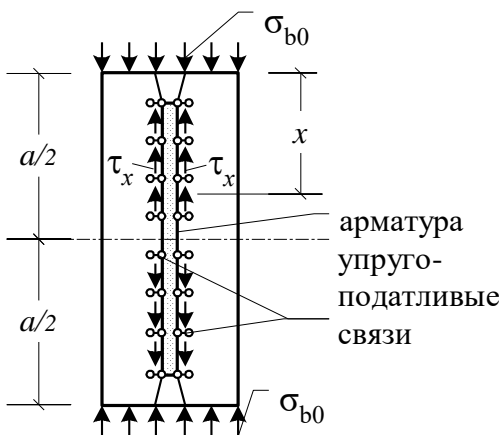


Рисунок 1 – Расчетная модель сжатого железобетонного элемента

всегда является неизвестной величиной; жесткость контактного слоя между бетоном и арматурой будет зависеть от уровня напряженного состояния и местонахождения арматуры в сечении элемента. Степень влияния оголения арматуры на его напряженное состояние оценивается одним параметром  $m$ , что воссоздает различный характер развития эпюр касательных напряжений по периметру арматуры. При всех перечисленных допущениях рассматривается плоская задача напряженного состояния железобетонного элемента, хотя реальная картина более соответствует пространственной задаче этого состояния. Однако решение пространственной задачи существенно усложнит инженерный подход для получения удовлетворительного решения и практического применения результатов расчета.

В основу предлагаемого решения поставленной задачи положены известные уравнения А.Р.Ржаницина для составного плоского стержня:

$$\frac{d\Gamma}{dx} = T \cdot \gamma, \quad (6)$$

где  $\Gamma$  – сосредоточенный сдвиг вдоль слоя между бетоном и арматурой;  
 $\gamma$  – параметр жесткости двух материалов: бетона и арматуры

$$\gamma = \frac{1}{E_s A_s} + \frac{1}{E_b A_b}; \quad (7)$$

$T$  – суммарное сдвигающее усилие,  $T = \int_0^x \tau_x dx$ .

Дифференциальное уравнение равновесия для составного стержня:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} \frac{1}{G} - T \cdot \gamma = 0; \quad (8)$$

$G$  – характеристика жесткости контактного слоя.

Решение уравнения (8) и конечное выражение для величины касательных напряжений имеют вид:

$$T = C_1 sh(\lambda x) + C_2 ch(\lambda x). \quad (9)$$

$$\tau_{cy} = \frac{(\tau_1 sh t - \tau_2 sh p) ch(\lambda x) + (\tau_2 ch p - \tau_1 ch t) sh(\lambda x)}{sh t ch p - sh p ch t}. \quad (10)$$

В формулах (9) и (10) приняты такие обозначения:  $\lambda = \sqrt{G \cdot \gamma}$ ;  $t = 0,5a\lambda$ ;  $p = 0,1a\lambda$ ;

$C_1$  и  $C_2$  – произвольные постоянные, которые определяются при граничных условиях:

при  $x = 0,1a$   $\tau = \tau_1$

при  $x = 0,5a$   $\tau = \tau_2$

Характеристика жесткости  $G$  может определяться по эмпирической формуле:

$$G = G_0 \frac{1 - \beta^3}{1 - \xi^3} m, \quad (11)$$

где  $G_0$  – начальная жесткость на 1 см,  $G_0 = (160 \div 180)R$  (кН/см<sup>3</sup>),  $R$  – кубиковая прочность бетона (кН/см<sup>2</sup>);

$\xi$  – относительная координата размещения арматуры;

$\beta = \sigma_{b_0} / R_b$  – уровень напряженного состояния элемента.

Величины  $\tau_1$  и  $\tau_2$  могут определяться по эмпирическим зависимостям:

$$\tau_1 = \frac{\sigma_{b_0} (1 - \beta^3) A_b}{u \cdot x} e^{\beta(\beta+1)} \left( 1 - \frac{E_b A_b}{E_b A_b + E_s A_s} \right) \lambda \cdot k, \quad (12)$$

$$\tau_2 = 0,2\tau_1$$

Обозначения в формуле (12) такие же, как и в формулах (2), (3), (11) кроме  $k$  – корректирующий коэффициент ( $k = 8 \div 10$ ).

Особого внимания заслуживает параметр  $m$ , который характеризует влияние ослабленного охвата бетоном арматуры.

Распределение напряжений по периметру арматуры при различном ее охвате бетоном можно представить в форме разных кривых: в форме кольца (полный охват бетоном), параболы, эллипса или лемнискаты Бернулли (при неполном охвате) (рисунок 2).

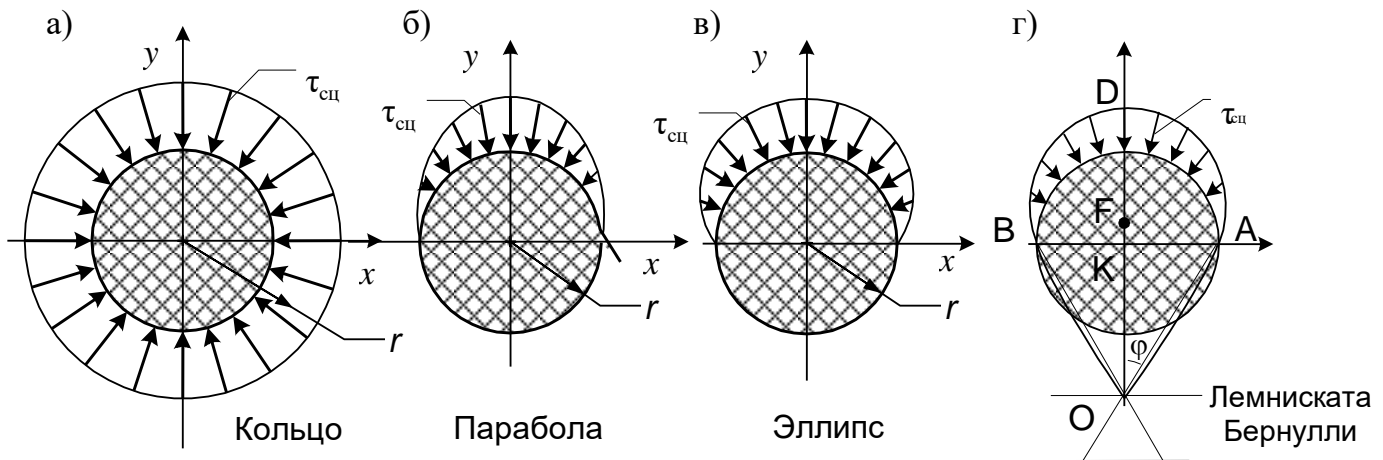


Рисунок 2 – Различные возможные формы распределения касательных напряжений вокруг арматуры

Тогда уменьшение касательных напряжений при определенном влиянии различного охвата бетоном арматуры можно принять как соотношение площадей эюр заданных кривых к полной площади эюры в форме кольца. Математический анализ показал, что для степени оголения 50% периметра арматуры снижение жесткости может достигать  $m = 0,27 \div 0,4$  (в зависимости от формы эюры), а для оголения только 25% периметра арматуры это снижение составляет  $0,70 \div 0,85$  от полного значения жесткости контактной зоны.

На основании установленных зависимостей для  $G$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $m$  определяются  $\tau_{сш}$  (10) и  $\sigma_{сх}$ :

$$\sigma_{сх} = \frac{u x \tau_{сш}}{A_s}. \quad (13)$$

Разработанный алгоритм расчета позволил составить программу “Кобзарь” (конструкции, ослабленные бетоном заармированные), использование которой на персональном компьютере помогает оперативно решать вопросы напряженного состояния арматуры в железобетонных сжатых элементах при различных условиях ее расположения и оголения.

**В третьем разделе** анализируются теоретические предпосылки по определению напряжений и деформаций в сжатой арматуре, исходя из эмпирических зависимостей между деформациями арматуры и бетона. Анализируя основное уравнение  $\varepsilon_s = \varepsilon_b$ , сделан вывод о том, что уравнение нарушается при

высоких уровнях напряженного состояния. Деформации арматуры не успевают за деформациями бетона. Обусловлено это явление тем, что в случае высокого уровня нагружения появляются микротрещины и сдвиги в зоне контакта бетона с арматурой, резко нарушается сцепление. Рационально равенство  $\varepsilon_s = \varepsilon_b$  заменить на  $\varepsilon_s = \varepsilon_b \omega(\beta, \xi)$ , где параметр  $\omega(\beta, \xi)$  воссоздает уровень напряженного состояния  $\beta = f(\sigma_b/R_b)$  и координату расположения арматуры в бетоне  $\xi$ .

Учитывая зависимость параметров  $\tau_{cu}$  и  $\omega(\beta, \xi)$  от уровня напряженного состояния и неизвестность зависимости смещения арматуры  $q_x$  от напряжений в бетоне  $\sigma_b$ , решение дифференциального уравнения

$$\frac{d^2 q_x}{dx^2} = \frac{u \tau_{cu}}{E_s A_s} \left[ 1 - \frac{1}{\omega(\beta, \xi)} \right] \quad (14)$$

составляет значительную трудность. Поэтому предлагается определять связь между деформациями арматуры и бетона в виде эмпирической зависимости, установленной на основе проведенных экспериментальных данных и литературных источников. Если такое соотношение будет установлено, тогда можно определять и касательные напряжения  $\tau_{cu}$ , и наконец, полностью описать напряженно-деформированное состояние сжатой арматуры с учетом теоретических значений  $\tau_{cu}$  по формуле (10) и эмпирических зависимостей между  $\varepsilon_s$  и  $\varepsilon_b$ .

В связи с тем, что на предельное значение расчетного сопротивления арматуры  $R_{sc}$  имеет существенное влияние предельная деформация бетона  $\varepsilon_R$ , проведен дополнительный детальный анализ экспериментальных исследований в этом направлении, которые опубликованы в литературе. За основу были приняты работы О.Я.Берга, Г.Н.Писанко, Е.Н.Щербакова, А.Ф.Ильина, В.В.Михайлова, М.П.Емельянова, Е.А.Чистякова, К.К.Бакирова, М.К.Бейсембаева, П.Ф.Вахненко, В.Г.Назаренко, В.Н.Конделя, А.Н.Бамбуры и других. В этих работах есть два параметра:  $\varepsilon_R$  – предельная деформация бетона, которая соответствует максимальному напряжению в бетонных примах  $R_b$ , и  $\varepsilon_{b,u}$  – общая полная деформация бетона с учетом ниспадающей ветви диаграммы сжатия бетона. За исходный критерий прочности железобетонного сжатого элемента принимается параметр  $\varepsilon_R$ , значение которого и влияет на максимальное напряжение в арматуре  $\sigma_s$ . Отмечается, что значения  $\varepsilon_R$  для различных авторов существенно разнятся. При больших значениях  $\varepsilon_R$  контактная зона нарушается, и напряжения в арматуре уменьшаются. Учитывая данные, полученные А.Н.Бамбурой, средняя величина  $\varepsilon_R = 1,7 \cdot 10^{-3}$  для разных классов бетона. Значение  $\sigma_{sc,u}$  рекомендуется для сжатой арматуры принимать в виде:

$$\sigma_{sc,u} = (R_{sc} + 50) \left[ 1 - \left( \frac{d}{d_{max}} \right)^5 \right] m \cdot \zeta \cdot \sqrt[6]{\frac{2a}{h_x}}, \quad (15)$$

где  $d$  – диаметр арматуры, мм;  $d_{max} = 40$  мм;

$R_{sc}$  – расчетное сопротивление арматуры сжатию в МПа;

$m$  – параметр оголения,  $m=0,7$  для оголения 25% периметра арматуры;  $m=0,38$  для оголения 50%; для сплошного слоя  $m=1$ ;

$\zeta$  – коэффициент поверхности арматуры,  $\zeta=1$  для периодического профиля, и  $\zeta=0,8$  для гладкого;

$a$  – расстояние от центра тяжести арматуры до грани элемента;

$h_x$  – высота сечения.

Не менее важным является установление взаимосвязи между деформациями бетона и арматуры на всем этапе нагружения от нуля до разрушения. Проведенные экспериментальные исследования позволили в первом варианте установить эту взаимосвязь.

Эмпирическая зависимость между  $\varepsilon_s$  и  $\varepsilon_b$  может быть представлена в виде:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_b \left( 1 - \beta \cdot \sqrt{0,09 \frac{d}{d_{\max}}} \right) \left[ 1 - \left( 0,5 - \frac{a}{h} \right) \beta \frac{d}{d_{\max}} e^{(1,9\beta-1)} \right]^{1+\beta}, \quad (16)$$

где  $\beta = \frac{\sigma}{R_b}$  – уровень напряженного состояния;

$\xi = a/h$  – относительная привязка арматуры к середине сечения;

$d$  – диаметр арматурного стержня;

$d_{\max}$  – максимальный диаметр арматуры,  $d_{\max} = 40$  мм.

На первый взгляд, зависимость (16) слишком громоздкая, но она не может быть простой, так как учитывает три основных фактора, которые влияют на связь между  $\varepsilon_s$  и  $\varepsilon_b$  – уровень нагружения, месторасположение арматуры и диаметр арматуры.

На основе зависимости (16) составлены таблицы взаимосвязи деформаций арматуры и бетона для различных классов бетона, различных уровней напряженного состояния, различных диаметров арматуры и различных расположений арматуры в поперечном сечении.

В этом же разделе проведен анализ предельных значений  $\varepsilon_R$ , которые существуют в исследованиях разных авторов и опубликованы в литературе. На основе этой величины устанавливается параметр  $R_{sc}$ , нормативное значение которого составляет 400÷500 МПа. Диапазон изменения  $\varepsilon_R$  составляет от 1,47‰÷5,6‰ для разных классов бетона и разных авторов. Нормативная величина  $\varepsilon_R = 2$ ‰. Однако теоретические и экспериментальные исследования показывают, что связь между  $\varepsilon_s$  и  $\varepsilon_b$  нарушается, особенно при высоких уровнях нагружения, поэтому значение  $R_{sc}$  должно быть уменьшенным на ту величину, которая соответствует определенному расположению арматуры в сечении, диаметру арматуры, степени ее оголения и другим факторам в соответствии с формулой (15).

На основе выполненных теоретических исследований приведены практические рекомендации по определению остаточной несущей способности сжатого железобетонного элемента с повреждением защитного слоя бетона:

$$N = \eta \varphi \left( \sum_i^n \sigma_{si} A_{si} + \gamma_{b_2} R_b A_b \right), \quad (17)$$

где  $\varphi$  – коэффициент продольного изгиба, который определяется по существующей методике;

$\eta$  – характеристика размеров поперечного сечения;

$\sigma_{si}$  – напряжения в арматуре в  $i$ -тых стержнях в зависимости от их расположения, величины повреждения защитного слоя и их диаметра, определяются в соответствии с выполненными исследованиями;

$A_{si}$  – соответствующие площади сечения арматуры.

Приведена регламентационная классификация дефектов защитного слоя бетона в зависимости от степени их развития; предлагаются четыре категории: I (незначительное повреждение) – оголение арматуры меньше 25%; II (фиксированное) – оголение более 25%; III (расчетное) – оголение от 25% до 50% и IV (чрезмерное) – оголение 75% и больше. Для III и IV категорий повреждений усиление элементов обязательное, для I и II усиление может ограничиваться восстановлением защитного слоя бетона с добавкой к цементному раствору клеящих средств.

Основные рекомендации относительно оценки состояния повреждений защитного слоя бетона и определение в первом приближении этого состояния в расчетных зависимостях приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Регламентационная таблица оценки повреждений защитного слоя бетона

Зона расположения повреждения	Характеристика нарушения сплошности защитного слоя и длина зоны повреждения	Категория повреждения	значение $m$	Эскиз нарушения сплошности защитного слоя
Угловая	Оголение арматуры $u_s \leq 20\%$ , расстояние $l > 1,5\text{м}$ , $l_g \leq 3,5d$	I	1	
	Оголение арматуры $u_s = 20\% \div 25\%$ , расстояние $l \leq 1\text{м}$ , $3,5d < l_g \leq 10d$		0,9	
Средняя	Оголение арматуры $20\% \leq u_s \leq 30\%$ , расстояние $l > 1,5\text{м}$ , $l_g \leq 4,5d$	1		
Угловая	Оголение арматуры $u_s = 25\% \div 30\%$ , расстояние $1\text{м} < l \leq 1,5\text{м}$ , $l_g > 10d$	II	0,75	
	Оголение арматуры $25\% \leq u_s \leq 30\%$ , расстояние $l \leq 1\text{м}$ , $l_g > 10d$		0,68	
Средняя	Оголение арматуры $u_s = 30\%$ , расстояние $l > 1,5\text{м}$ , $5d < l_g \leq 15d$	0,68		
Угловая	Оголение арматуры $u_s = 50\%$ , расстояние $l \leq 1\text{м}$ , $3,5d < l_g < 5d$	III	0,5	
	Оголение арматуры $50\% \leq u_s \leq 60\%$ , расстояние $1\text{м} \leq l \leq 1,5\text{м}$ , $10d \leq l_g \leq 15d$		0,4	
Средняя	Оголение арматуры $u_s = 50\%$ , расстояние $l \leq 1\text{м}$ , $l_g = 5d$	0,5		
Угловая	Оголение арматуры $u_s = 65\% \div 75\%$ , расстояние $l \geq 1\text{м}$ , $l_g \leq 10d$	IV	0,1	
	Оголение арматуры $u_s \geq 75\%$ , расстояние $l \leq 1\text{м}$ , $3,5d \leq l_g \leq 15d$		0,05	
Средняя	Оголение арматуры $u_s \geq 50\%$ , расстояние $l \geq 1\text{м}$ , $3,5d \leq l_g \leq 5d$	0,1		

Все возможные случаи дефектов защитного слоя бетона трудно описать только рекомендациями таблицы 1, но свести их условно к предложенным вариантам целиком возможно. Такой подход имеет практическое значение при обследовании зданий и сооружений и намного облегчает расчетную методику при определении напряжений в арматуре.

**В четвертом разделе** приведены материалы экспериментальных исследований на образцах–призмах, заармированных вертикальными стрежнями без поперечной арматуры. Нагрузка таких образцов осуществлялась через бетон, то есть передача усилия шла от плиты пресса на бетонную поверхность образца, арматурные стрежни не доводились к поверхности призм на 50 мм. Размер призм 15x15x45 см.

Было изготовлено и испытано 7 серий образцов, в каждой серии по 6 призм. Армирование образцов осуществлялось 5-ью стрежнями, четыре по углам, один в середине, диаметры арматуры были в разных сериях 20А-I, 18 А-III, 10А-III. В каждой серии были 3 призмы с полностью закрытой арматурой, а 3 с частично оголенной арматурой диагонально расположенной. В одной серии оголение вдоль всей длины арматуры составляло 25% периметра арматуры, в другой – 50% и в третьей – 75%. В других сериях изменялись диаметры арматуры. Призменная прочность бетона в разных сериях составляла от 1,73 кН/см<sup>2</sup> до 3,65 кН/см<sup>2</sup>, соответствующая кубиковая прочность от 2,12 кН/см<sup>2</sup> до 4,94 кН/см<sup>2</sup>.

Загрузка происходила этапами по 40 кН до полного разрушения с выдержкой на каждом этапе 3 минуты. Измерялись деформации бетона по четырем граням и деформации арматуры в средней части общей длины арматуры. Характерные закономерности развития деформаций в бетоне, центральном стержне и краевом с полным охватом бетоном и частичным приведены на рисунке 3. На этом рисунке приведены данные для II-ой серии испытаний с диаметром арматуры 18 мм, класс А-III, степень оголения арматуры составляла 50%. Четко можно отметить, что деформации арматуры и бетона практически совпадают до уровня  $0,5 \div 0,6 R_{пред}$ , потом

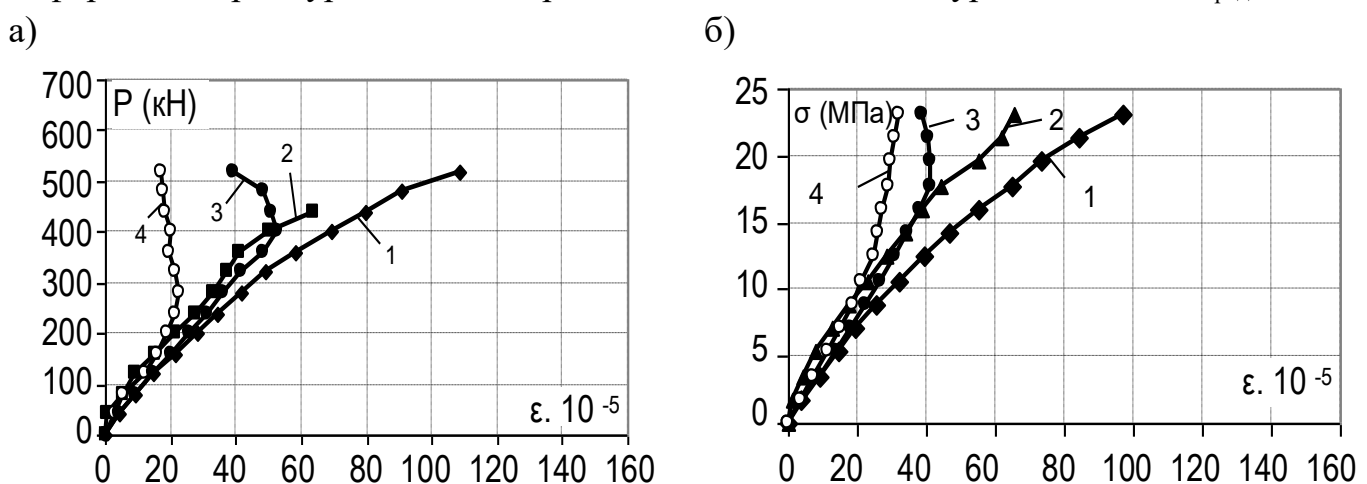


Рисунок 3 – Характер развития деформаций бетона и арматуры у образцов II-ой серии:

а) для единичного образца; б) усредненные для всех образцов данной серии;

1 – деформация бетона; 2 - деформация центрально расположенных стержней;

3 – деформация краевых, целиком закрытых стержней; 4 – деформация краевых частично оголенных стержней.

эти деформации начинают различаться. Причем деформации центрально расположенного стержня ближе находятся к деформациям бетона, чем деформации краевых стержней. Оголенные краевые стержни (кривая 4) имеют существенно меньшую деформацию, чем краевые закрытые стержни и центрально расположенный стержень.

Все эти проявления деформаций арматуры связаны с развитием контактных напряжений в месте соединения арматуры с бетоном. Чем выше уровень внешних напряжений, тем больше разрушение контактного слоя, поэтому в краевых стержнях деформации арматуры заметно уменьшаются при увеличении внешних напряжений. В экспериментальных исследованиях неоднократно было зафиксировано такое явление, как уменьшение деформаций в арматуре при высоких уровнях напряженного состояния образцов, то есть разрушение зоны контакта приводит к уменьшению напряжений и деформаций в арматуре. Такое явление было названо “пружинным эффектом”, которое характеризует стремление арматуры возвратиться к своему начальному напряженному состоянию. На рисунке 3 это явление рельефно описывается развитием кривой 3. В центральных стержнях (кривая 2) проявления задержки деформаций также имели место, но не так четко, как это зафиксировано в краевых стержнях.

На рисунке 4 приведены деформации арматуры  $\varnothing 10A-III$  вместе с деформациями бетона, которые были определены в VI серии. Развитие деформаций арматуры в этой серии имеет совсем другой характер, чем в предшествующих сериях. Деформации арматуры приближаются к деформациям бетона почти на всем этапе нагружения. И только на высоких уровнях есть заметное отставание деформаций арматуры от деформаций бетона. Объясняется такое явление тем, что для арматуры больших диаметров с существенными выступами рифов контактная зона менее однообразная, чем у арматуры уменьшенных диаметров, поэтому нарушение контактного слоя для маленьких диаметров происходит более поздно, сравнительно с арматурой больших диаметров. Определенное влияние на развитие деформаций и разрушение зоны контакта оказывает и усадка бетона. Для меньших диаметров это

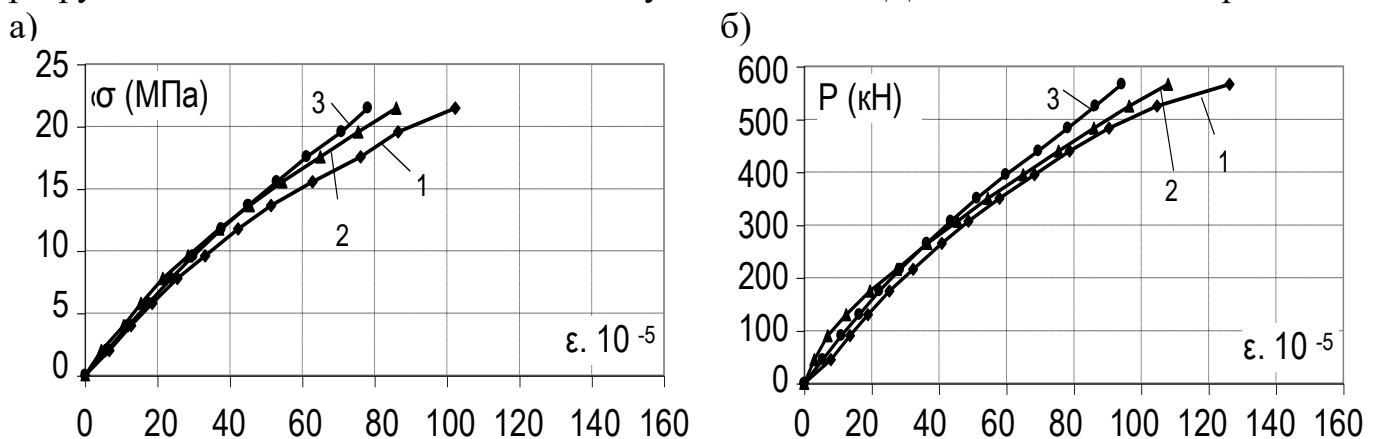


Рисунок 4 – Экспериментальные данные развития деформаций в арматуре и бетоне при сжатии ( $\varnothing 10 A-III$ ),  $R_b = 2,74 \text{ кН/см}^2$ :

- а) для одного образца; б) усредненные значения для образцов всей серии VI;  
 1 - деформации бетона; 2 - деформации центрально расположенных стержней;  
 3 – деформации краевых, полностью закрытых стержней.



влияние меньше, для больших оно более выразительное в связи с неоднородностью окружающего контактного слоя.

Общие закономерности развития деформаций при сжатии (то есть отставание деформаций арматуры от деформаций бетона на высоких уровнях напряженного состояния, уменьшенная деформация арматуры краевых стержней по сравнению с центральным стержнем) остаются одинаковыми независимо от диаметра арматуры, которые дополнительно подчеркивают однотипность полученных результатов эксперимента. Оголение арматуры  $\varnothing 10$  не производилось из-за сложности этой работы.

Оценка правомерности и надежности использования формулы (16) для практических задач была выполнена при сопоставлении экспериментальных данных деформаций арматуры с теоретическими, полученными при использовании формулы (16). Развитие деформаций анализировалось на всем этапе нагружения вплоть до разрушения.

На рисунке 5 приведены экспериментальные и теоретические кривые развития деформаций в арматуре для I и II серии испытаний. На графиках можно отметить, что до уровня нагрузки  $(0,6 \div 0,7)R_b$  теоретические и экспериментальные значения деформаций арматуры для краевых и центральных стержней очень близкие, разность составляет только  $8 \div 10\%$ .

При уровне нагружении  $(0,8 \div 0,9)R_b$  эта разность увеличивается и достигает  $25 \div 40\%$ , что обусловлено сложностью развития деформаций в арматуре в стадии разрушения. Тем не менее, качественные закономерности теоретические кривые описывают удовлетворительно.

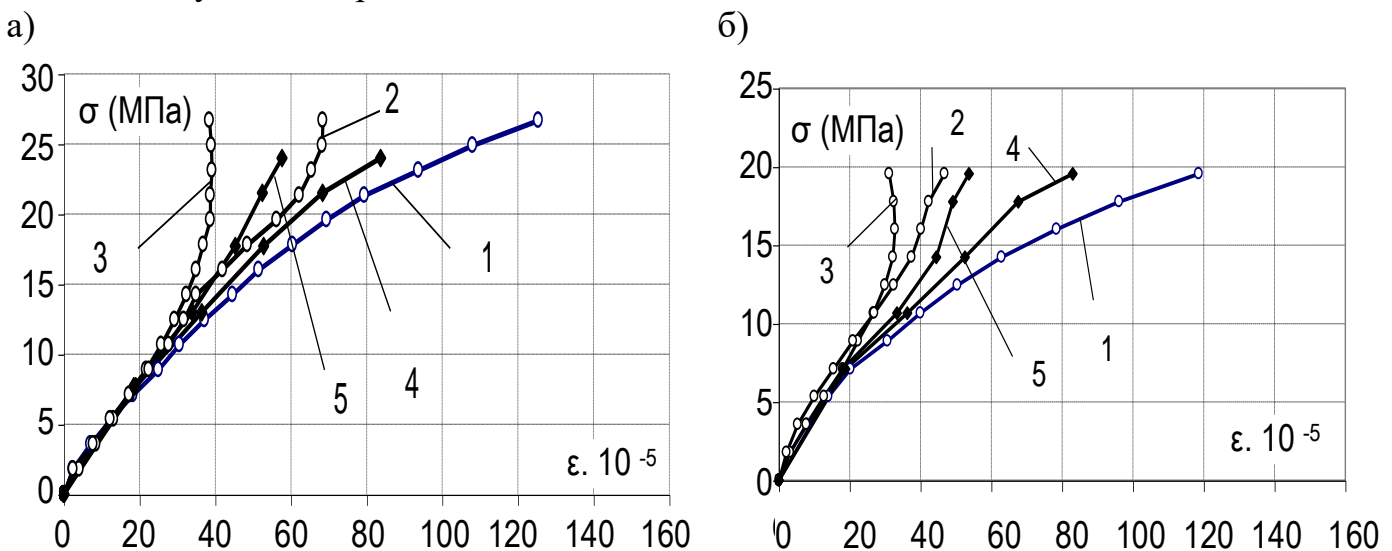


Рисунок 5 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных для серий I (а) и II (б) с использованием формулы (16):

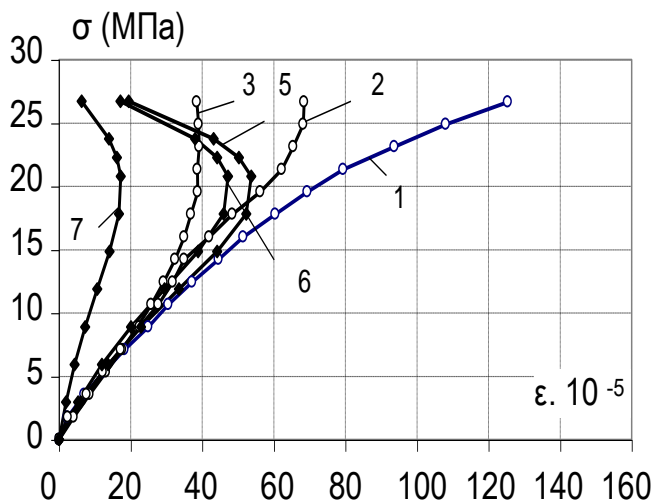
- экспериментальные кривые деформаций: 1 – бетона; 2 – центральных стержней; 3 – краевых стержней;
- теоретические кривые деформаций: 4 – центральных стержней; 5 – краевых стержней

Более точный результат в сопоставлении теоретических и экспериментальных данных дают формулы для  $\tau_{сц}$  (10) и для  $\sigma_{sx}$  (13). Эти зависимости позволяют учитывать не только уровень напряженного состояния бетона, месторасположение арматуры, класс бетона, класс арматуры и его диаметр, но и различную степень

оголения арматуры, которая очень важна для оценки влияния повреждений защитного слоя бетона на напряженно-деформированное состояние арматуры.

На рисунке 6 приводятся графики развития деформаций в арматуре в зависимости от уровня напряженного состояния в бетоне, полученные теоретическим путем для серий I и II. Здесь же нанесены и экспериментальные значения деформаций бетона и арматуры, имеющей оголение 50% периметра. При высоких уровнях напряженного состояния имеется различие в опытных и теоретических значениях деформаций арматуры, расхождение составляет 15÷40%. По отдельным группам образцов данное расхождение составляло всего лишь 10÷15%, но для усредненных параметров это расхождение оказалось существенно бóльшим. Очевидно, на такое расхождение оказывает влияние и сложность развития деформаций арматуры в период разрушения бетона и некоторая неточность измерительных приборов. И, несмотря на это, можно считать, что предлагаемый расчетный аппарат позволяет до эксплуатационных нагрузок довольно точно оценивать напряженно-деформированное состояние железобетонных сжатых элементов с учетом как расположения арматуры в сечении элемента, так и уровня напряженного состояния и степени оголения арматуры в случае повреждения защитного слоя бетона.

а)



б)

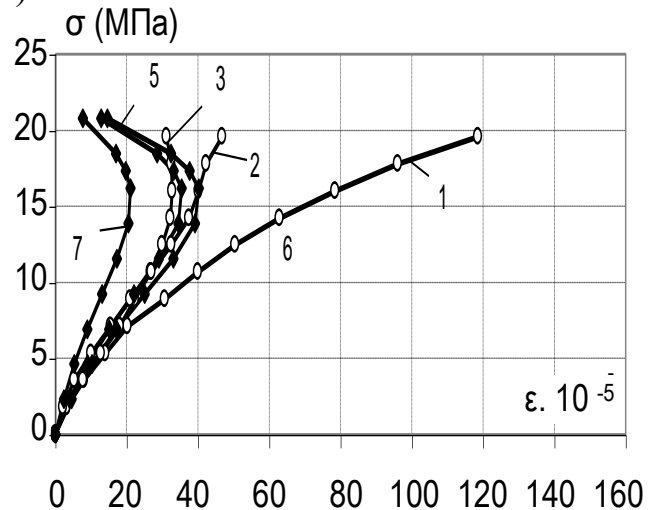


Рисунок 6 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных для серий I (а) и II (б) с использованием формул (10) и (13):

- экспериментальные кривые деформаций: 1 – бетона; 2 – центральных стержней; 3 – краевых стержней; 4 – краевых оголенных стержней;
- теоретические кривые деформаций: 5 – центральных стержней; 6 – краевых стержней; 7 – краевых частично оголенных стержней.

Проведенная статистическая обработка результатов эксперимента показала, что полученные данные имеют удовлетворительную достоверность. Так, для краевых стержней в замерах деформаций арматуры величина средней ошибки составляет 0,7÷1,2, показатель точности не превышает 4% при допустимой точности в 5%, а коэффициент вариации равняется 14÷16%, что следует считать удовлетворительным показателем для железобетонных элементов. Для оголенных

стержней эти показатели на 15–20% хуже, но качественную картину они описывают достаточно точно. В центральных стержнях количество полученных результатов не позволяло сделать статистический анализ, но расхождения в результатах были незначительны, поэтому за основу принимались средние значения.

Материалы выполненных теоретических и экспериментальных исследований внедрены в научной части Харьковского “ПромстройНИИпроекта” при обследовании и усилении конструкций колонн Керченского металлургического завода, а также на заводе железобетонных конструкций №1 (ЗЖБК-1) в г. Харькове при качественной оценке изготовленных конструкций.

## ВЫВОДЫ

1. Анализ литературных источников по определению сил сцепления между бетоном и арматурой при сжатии показал, что теоретических и экспериментальных работ в этом направлении недостаточно. Особенно это касается элементов с повреждением защитного слоя бетона. Все существующие опыты базируются на анализе растянутых элементов при передаче нагрузки через арматуру.
2. В диссертационной работе использован принцип определения напряженно-деформированного состояния сжатого элемента в представлении его как составного стержня при передаче нагрузки через бетон. Этот подход позволил отказаться в прямой форме от общепринятой гипотезы равенства деформаций бетона и арматуры на всем этапе загрузки сжатого элемента. Получена аналитическая зависимость для касательных напряжений в зоне контакта “бетон-арматура” без использования этой гипотезы.
3. Предложенный расчетный теоретический аппарат позволяет учитывать при определении напряжений в сжатой арматуре такие факторы: 1) расположение арматуры в поперечном сечении элемента; 2) уровень напряженного состояния железобетонного элемента; 3) степень оголения арматуры защитным слоем бетона; 4) размер диаметра арматуры; 5) класс бетона по прочности на сжатие. Кроме этого в данном аппарате могут учитываться нелинейные свойства деформирования бетона, ползучесть и усадка, различные классы арматуры.
4. В существующих нормативных документах величина расчетного сопротивления арматуры при сжатии  $R_{sc}$  принимается в зависимости от предельных деформаций бетона, при этом не берется во внимание уменьшение сил сцепления в период разрушения бетона. Требуется корректировка значения  $R_{sc}$  в сторону ее уменьшения в зависимости от месторасположения арматуры, ее диаметра, степени насыщения поперечной арматурой, класса бетона, степени оголения арматуры защитным слоем бетона.
5. Установлена эмпирическая зависимость между деформациями бетона и деформациями арматуры, которая учитывает уменьшение сил сцепления между бетоном и арматурой в зависимости от уровня напряженного состояния, месторасположения арматуры, ее диаметра, класса бетона. Составлены таблицы взаимосвязи деформаций арматуры с деформациями бетона для всех вышеупомянутых факторов.

6. Аналитически и экспериментально установлены соотношения в деформациях бетона, центрально расположенного стержня и краевых стержней. Согласно этим данным, центральный стержень имеет меньшие деформации, чем бетон на  $70\div 90\%$  в стадии нагружения  $0,95\sigma/R_b$ , а краевые стержни еще меньшие, которые составляют половину деформаций бетона.
7. Зафиксирована в экспериментальных исследованиях тенденция возвращения деформаций арматуры в свое исходное положение (“пружинный эффект”). Это явление объясняется резким нарушением контактной зоны сцепления в период высоких напряжений. Предварительно сжатая арматура начинает возвращаться в первоначальное положение, поэтому деформации в ней замедляются и даже уменьшаются.
8. Дана оценка влияния степени повреждения защитного слоя бетона на развитие напряжений в арматуре. При оголении арматуры меньше 25% периметра снижение напряжений в арматуре почти не происходит ( $m = 1\div 0,85$ ), при оголении на 50% вводится параметр  $m = 0,4$ , при оголении на 75%  $m = 0,1$ .
9. Установлены IV категории повреждений защитного слоя бетона. Предложены рекомендации по усилению дефектных конструкций для каждой категории.
10. Составлена индивидуальная программа “Кобзарь” (конструкции, ослабленные бетоном заармированные) для расчета на ПК сжатых железобетонных элементов с нарушением защитного слоя бетона.
11. Проведены экспериментальные исследования на 42 образцах-призмах, которые имели продольную арматуру, расположенную по углам образцов и в центре. Нагрузка передавалась через бетон. Отмечено, что деформации арматуры отстают от деформаций бетона, начиная с уровня  $0,6\sigma/R_b$ . Для центральных стержней это отставание меньше, для краевых (угловых) – больше.
12. Статистическая обработка результатов эксперимента показала, что коэффициент вариации в деформациях арматуры находится в пределах  $14\div 16\%$ , показатель точности не превышает 4,5%, средняя ошибка  $0,7\div 1,2$ . Эти данные позволяют оценить эксперимент как удовлетворительный.
13. Сравнение теоретических и экспериментальных данных свидетельствует о том, что при уровне напряженного состояния  $(0,5\div 0,6)\sigma/R_b$  совпадение теоретических и экспериментальных значений деформаций арматуры высокое (расхождение до  $10\div 12\%$ ), при высоких уровнях  $(0,8\div 0,95)\sigma/R_b$  расхождение достигает  $30\div 40\%$ . Это расхождение объясняется сложностью процессов развития деформаций в арматуре в стадии, близкой к разрушению, а также сложностью замеров деформаций. Качественная картина развития деформаций арматуры описывается одинаково как в экспериментальных, так и в теоретических исследованиях.
14. Разработанные рекомендации и предложения успешно использовались в практических задачах обследования и усиления сжатых конструкций в проектных и строительных организациях.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАНИХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ле Минь Лонг, Шаповалов А.Н. Влияние продольных повреждений защитного слоя бетона на несущую способность сжатых железобетонных элементов // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. пр. ХДТУБА ХОТВ АБУ. – Вип. 1. – Харків: Изд. дом Ватерпас, 1997. – С. 83–84.
2. Ле Минь Лонг Оценка степени сцепления арматуры с бетоном при сжатии в случае загрузки бетонной части сечения // Коммунальное хозяйство городов: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – №23. – К.: Техника, 2000. – С. 60–64.
3. Ле Минь Лонг Влияние сил сцепления на развитие напряжений в сжатой арматуре // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. пр. ХДТУБА ХОТВ АБУ. – Вип. 10. – Харків: Изд. дом Ватерпас, 2000. – С. 155–159.
4. Ле Минь Лонг, Шаповалов А.Н. Влияние повреждений защитного слоя бетона в сжатых железобетонных элементах на развитие сил сцепления в зоне контакта бетона и арматуры // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. пр. ХДТУБА ХОТВ АБУ. – Вип. 12. – Харків: Изд. дом Ватерпас, 2001. – С. 158–163.
5. Шаповалов А.Н., Ле Минь Лонг Влияние различных условий контакта сжатой арматуры с бетоном на величину напряжений в ней // Коммунальное хозяйство городов: Респ. межведом. науч.-техн. сб. – Вып. 16. – К.: Техника, 1998. – С. 48–50.
6. Шаповалов А.Н., Ле Минь Лонг Влияние различных условий охвата бетоном арматуры на развитие напряжений в арматуре // Проблеми реконструкції та експлуатації промислових та цивільних об'єктів: Зб. наук. пр. ПДАБА. – Дніпропетровськ, 1999. – С. 195–197.
7. Ле Минь Лонг Теоретическая оценка сил сцепления вертикальной арматуры с бетоном при нарушениях сплошности бетона // Тезисы докладов XXIX науч.-техн. конф. преподавателей, аспирантов и студентов ХГАГХ: “Строительство, архитектура и экология”. – Харьков, 1998. – С. 8–9.
8. Ле Минь Лонг Анализ совместной работы арматуры и бетона в сжатых железобетонных элементах // Тезисы докладов XXX науч.-техн. конф. преподавателей, аспирантов и сотрудников ХГАГХ: “Строительство, архитектура и экология”. – Ч. 1, Харьков, 2000. – С. 9.

## АНОТАЦІЯ

**Ле Минь Лонг Вплив локальних пошкоджень захисного шару бетону в стиснутих залізобетонних елементах на напружено-деформований стан арматури.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук із спеціальності 05.23.01 - будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Харківська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2001.

Дисертація присвячена побудові наукових принципів розрахунку стиснутих залізобетонних елементів, які мають різні пошкодження захисного шару бетону під впливом технологічних, експлуатаційних, аварійних та інших умов. Розглядається

модель стиснутого елемента як умовно складового стрижня з елементами жорсткості в зоні контакту бетон-арматура.

Теоретично визначаються дотичні напруження в зоні контакту, на основі чого можна знайти деформації та напруження в арматурі з урахуванням таких факторів: рівень напруженого стану, місцезосташування арматури, діаметр арматури, клас бетону та арматури, ступінь оголення арматури.

На основі проведених експериментів встановлена емпірична залежність між деформаціями арматури та бетону. Встановлено, що деформації арматури не дорівнюють деформаціям бетону, особливо при високих рівнях завантаження. Деформації арматури зменшуються порівняно з деформаціями бетону.

Запропонована методика оцінки різних пошкоджень захисного шару бетону (IV категорії пошкоджень), на основі чого визначається залишкова несуча здатність залізобетонного елемента.

З урахуванням залишкової несучої здатності назначаються різні методи підсилення пошкоджених елементів.

Розроблена методика визначення напружень та деформацій в арматурі при пошкодженні захисного шару бетону впроваджена в проектних, науково-дослідних організаціях та заводах залізобетонних конструкцій.

**Ключові слова:** стискання, залізобетонний елемент, зчеплення, пошкодження, захисний шар бетону, контактна зона, деформація і напруження арматури, несуча здатність.

## АННОТАЦІЯ

**Ле Минь Лонг Влияние локальных повреждений защитного слоя бетона в сжатых железобетонных элементах на напряженно-деформированное состояние арматуры.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Харьковская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2001.

Диссертация посвящена построению научных принципов расчета сжатых железобетонных элементов, которые имеют различные повреждения защитного слоя бетона под влиянием технологических, эксплуатационных, аварийных и других условий. Рассматривается модель сжатого элемента как составного стержня с элементами жесткости в зоне контакта бетон–арматура.

Теоретически определены касательные напряжения в зоне контакта, на основе чего можно найти деформации и напряжения в арматуре с учетом таких факторов: уровень напряженного состояния, месторасположение арматуры, диаметр арматуры, класс бетона и арматуры, степень оголения арматуры.

При теоретическом анализе поставленной задачи рассматривался вопрос определения касательных напряжений  $\tau_{cy}$  в зоне контакта и напряжений в арматуре  $\sigma_{sx}$  сжатых элементов с использованием традиционных решений, но с передачей нагрузки через бетон, и с учетом расчетной модели в виде составного плоского стержня по предложению А.Р.Ржаницына также с передачей нагрузки через бетон.

Традиционное решение не давало специфики развития напряжений в сжатой арматуре, заключающееся в уменьшении этих напряжений при высоких уровнях напряженного состояния, использование предложенной модели приближало теоретические значения  $\tau_{сц}$  и  $\sigma_{sx}$  к экспериментальным данным.

Проанализирована предельная сжимаемость бетонов  $\varepsilon_R$  с учетом максимального значения сжимающих напряжений в бетоне  $R_b$  и с учетом ниспадающей ветви  $\varepsilon_{b,u}$ . Такой анализ показал, что для определения максимальных напряжений в арматуре при сжатии более существенным параметром является  $\varepsilon_R$ . Средняя его величина может быть принята  $\varepsilon_R = 1,8\%$ .

Степень оголения арматуры и влияние этого оголения на распределение напряжений в арматуре оценивается усредненным параметром  $m$ , который определяется как отношение площади охвата касательных напряжений по неполному периметру арматуры к площади охвата по полному периметру, т.е. по кольцу. Для оголения на 50% периметра  $m = 0,38 \div 0,4$ , для оголения на 25%  $m = 0,75 \div 0,9$ . Коэффициент  $m$  вводится сомножителем к напряжениям в арматуре, полученным теоретическим путем.

Установлены IV категории повреждения защитного слоя бетона: I (незначительное повреждение) – оголение арматуры меньше 25% периметра ( $m = 0,9 \div 1$ ); II (фиксированное) – оголение более 25% ( $m = 0,68 \div 0,75$ ); III (расчетное) – оголение от 30% до 50% периметра арматуры ( $m = 0,4 \div 0,5$ ); IV (чрезмерное) – оголение 75% и более ( $m = 0,1$ ). Для III и IV категорий требуется локальное усиление сжатого железобетонного элемента. Такой подход имеет практическое значение при обследовании зданий и сооружений и позволяет рационально назначать схему усиления.

На основе проведенных экспериментов установлена эмпирическая зависимость между деформациями арматуры и бетона. Установлено, что деформации арматуры не равняются деформациям бетона, особенно при высоких уровнях нагружения. Деформации арматуры меньше по сравнению с деформациями бетона.

Деформации краевых стержней меньше деформаций центрально расположенного стержня на 50%  $\div$  60% и более при высоких уровнях напряженного состояния ( $\sigma/R_b = 0,8 \div 0,9$ ). Отмечен эффект возврата деформаций арматуры к уменьшенным ее значениям, что объясняется резким нарушением контактного слоя бетона в стадии, близкой к разрушению. Данное явление четко проявляется в краевых стержнях и менее выражено в центральных.

Сопоставление теоретических и экспериментальных данных дало удовлетворительные результаты до уровня  $\sigma/R_b = 0,85$ , при более высоких уровнях расхождение в данных составляет 20  $\div$  40%.

Предложенный теоретический аппарат расчета ослабленных в защитном слое сжатых железобетонных элементов позволяет обоснованно определять остаточную несущую способность этих элементов и принимать экономически оправданную в необходимых случаях схему усиления.

Разработанная методика определения напряжений и деформаций в арматуре при повреждении защитного слоя бетона внедрена в проектных, научно-исследовательских организациях и заводах железобетонных конструкций.

**Ключевые слова:** сжатие, железобетонный элемент, сцепление, повреждение, защитный слой бетона, контактная зона, деформация и напряжение арматуры, несущая способность.

## ANNOTATION

**Le Minh Long Influence of local damages of a concrete cover in the compressed reinforced concrete elements on stress and strain state of the fixture.**  
– Manuscript.

The thesis for the degree of Candidate of Science (Engineering) by the speciality 05.23.01 – building constructions, buildings and structures. – Kharkov state academy of railway transport, Kharkov, 2001.

The dissertation is devoted to construction of scientific principles of design of the compressed reinforced concrete elements, which have various damages of a concrete cover under influence of technological, operational, emergency and other conditions. The model of the compressed element as built-bar with elements of rigidity in a contact zone of the concrete-fixture is considered.

Tangent tensions in a contact zone are defined theoretically. On the basis of that it is possible to find deformations and stresses of the fixture with the account of such factors: a level of the stress and strain state, site of the fixture, diameter of the fixture, class of concrete and fixture, denudation degree of the fixture.

On the basis of the carried out experiments the empirical dependence between deformations of the fixture and concrete is established. It is established that the deformations of the fixture are not equaled to deformations of concrete, especially at high levels of loading. The deformations of the fixture are less in comparison with deformations of concrete.

The procedure of an estimation of various damages of a concrete cover (4 categories of damages) is offered, on the basis of that the residual load-carrying ability of a reinforced concrete element is defined.

With the account of residual load-carrying ability the different methods of strengthening of defective units are nominated.

The developed method of definition of stresses and deformations of the fixture at damage of a concrete cover is introduced in design-research organizations and reinforced concrete designs factories.

**Key words:** compression, reinforced concrete element, coupling, damage, concrete cover, contact zone, deformation and stress of the fixture, load-carrying ability.





