

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ СЦЕПЛЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО ГЕЛЯ МЕЖДУ АРМАТУРОЙ И БЕТОНОМ

А. Н. Николюкин, В. П. Ярцев, С. А. Мамонтов,
И. И. Коломникова, А. С. Печников, Н. О. Никитин

*Кафедра «Конструкции зданий и сооружений», valax1@yandex.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: арматура; бетон; математическая модель; сцепление; численный метод.

Аннотация: Нарушение сцепления арматуры с бетоном вызывает значительные деформации конструкции, что впоследствии может привести к потере ее несущей способности. Возникает необходимость в изучении процесса сцепления между бетоном и арматурой при различных воздействиях. Представлены результаты численного эксперимента по испытанию на выдергивание арматуры периодического профиля из бетона. Построена математическая модель, позволяющая изучить процессы, протекающие в области заделки арматуры в бетон. Рассмотрены результаты численного моделирования.

Сцеплением называется способность арматуры под нагрузкой сопротивляться проскальзыванию в железобетонных изделиях. Железобетон рассматривается как единый композиционный материал до того момента, пока существует сцепление по контактной поверхности между арматурой и бетоном. При нарушении сцепления конструкция перестает существовать как единое целое.

Впервые про оценку прочности анкеровки арматуры заговорил немецкий исследователь Р. Залигер в начале XX века [1]. Первоначально их опыты были направлены на проверку прочности анкеровки арматуры в бетоне для концевых усилений отгибов, петель и крюков [2]. Данный метод позволил исследовать анкеровку за счет сцепления профиля с бетоном, обладающим высокой прочностью. При этом сцепление рассматривалось в качестве силовой характеристики, зависящей от многих факторов, удельное значение которых оценивалось учеными неоднозначно. Тем не менее в середине XX века Я. В. Столяров предположил, что сцепление напрямую зависит от клеящей способности цементного геля и трения, возникающего между материалами под действием радиального давления от усадки бетона.

В своих трудах Я. В. Столяров выделил две группы факторов [3]. Первая группа отражает факторы, влияющие на сопротивление скольжению арматуры в бетоне. К ним относятся зацепление выступов за бетон, трение от усадки и склеивание арматуры с бетоном. Вторая группа количественно определяет факторы первой группы, не влияя при этом на сцепление. К ней относят класс и возраст бетона.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) в зонах перераспределения напряжений весьма неоднозначно. Оно зависит от всех факторов в совокупности. Автор работы [4] установил, что НДС на участках действия касательных напряжений сцепления значительно изменяется под действием нагрузки [4].

Поскольку на сцепление оказывает влияние множество факторов, возникла необходимость в применении феноменологического подхода математического анализа опытных данных на основе упрощающих предпосылок.

Экспериментально определить значение величины сцепления $\tau_{сц}$ на участке перераспределения путем измерения нормальных напряжений в арматуре σ_s в зоне контакта довольно трудно [4 – 6]. Поэтому применение данной характеристики для оценки величины сцепления на участке контакта было ограничено.

В 1913 году Я. В. Столяров построил кривую, описывающую зависимость напряжений сцепления $\tau_{сц}$ от «деформаций скольжения» для стержня с переменным профилем [2]. Однако впервые о зависимости между напряжениями сцепления и взаимными смещениями арматуры относительно бетона заговорили ряд авторов еще в начале 40-х годов [2 – 4].

В результате испытаний М. М. Холмянский определил величину взаимных смещений арматуры относительно бетона [4]. Исследования заключались в наблюдении за смещением арматуры относительно бетона при передаче предварительных напряжений и выдергивании арматуры из призм, опирающихся торцом.

На основании проведенных работ Я. В. Столяров назвал выявленную зависимость законом сцепления [2].

Причиной повышенного внимания к вопросу сцепления в СССР в 1950 – 1960 гг. стало активное внедрение в строительство предварительно напряженных армированных конструкций. В целях поиска решения проблемы сцепления арматуры и бетона в данных конструкциях под руководством М. М. Холмянского и А. А. Оатула проведены фундаментальные экспериментально-теоретические исследования. Однако при интерпретации закона сцепления между арматурой и бетоном у Холмянского М. М. и Трост Н. возникли значительные разногласия.

Было установлено, что при взаимодействии прядей стержня (для канатов) и бетона под нагрузкой арматуре свойственно винтовое движение в бетоне. В стадии предварительного обжатия наблюдаются значительные смещения до 1 мм. При этом величина смещений g является условной характеристикой, описывающей относительное сцепление профилированной арматуры под нагрузкой (рис. 1).

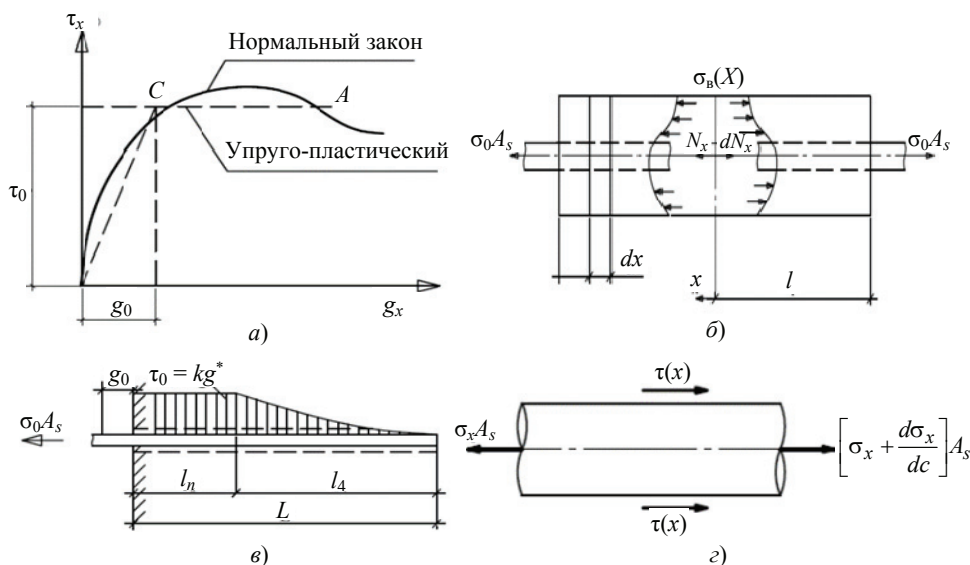


Рис. 1. Совместная работа арматурного стержня с бетоном:

a – диаграмма « τ – g »: упруго-пластический и нормальный законы сцепления; *б* – распределение напряжений сцепления по длине стержня при упруго-пластическом законе; *в* – расчет на сцепление и равновесие бетонного элемента; *г* – равновесие элемента dx стержня

Продольные усилия, возникающие в пряди, прижимают ее выступы к «бетонной гайке». При этом наблюдается взаимосвязь между трением от поперечного давления стержня о бетон в зоне контакта и периодическим профилем арматуры.

Феноменологический метод при определении касательных напряжений $\tau_{\text{сц}}$ имеет ряд недостатков:

- не учитываются стесненные деформации;
- невозможно определить НДС на участках контакта при образовании трещин и пластических деформаций;
- возможны деформации бетонной оболочки около арматурной области по всей длине анкеровки.

Вышеперечисленные недостатки возможно устранить с помощью моделей, основывающихся на положениях теорий ползучести и упругости.

Применение численных методов расчета и ЭВМ для моделирования сцепления позволит получить достоверные и подробные результаты без проведения трудоемких экспериментов.

Математическая модель сцепления арматуры с бетоном.

Современный аппарат механики деформируемого твердого тела позволяет решить данную задачу с учетом нелинейности работы материала на основе методов конечных элементов (МКЭ). На данный момент МКЭ получил широкое применение в инженерной практике, что способствовало разработке и совершенствованию таких программных комплексов как ANSYS, Abaqus и др. [7, 8].

В данной работе численное решение задачи сцепления арматуры с бетоном выполнялось на базе комплекса ANSYS 19.0 Workbench (рис. 2).

В качестве модели бетона принята модель Menetrey–Willam, основанная на поверхности пластичности Willam–Warnke, включающей зависимость от трех независимых инвариантов тензора напряжений [7 – 14].

Поверхность пластичности Willam–Warnke отличается от поверхности Мора–Кулона тем, что она не имеет острых краев, которые могли бы вызвать некоторые трудности в решении данной задачи.

Для описания работы стеклопластикового стержня (*далее СПА*) использован закон Гука для ортотропного материала, а для описания работы стальной арматуры принята билинейная изотропная модель.

Второстепенным фактором сцепления арматуры с бетоном является сцепление [11 – 13]. Для моделирования данного процесса применялась модель связанной зоны (*англ. Cohesive zone model (CZM)*), в которой разрушение матрицы связующего рассматривается как постепенное отделение поверхности профиля арматуры от основного стержня с последующим расслоением [13].

В работе применяется модель соединения и разрушения контакта соединения 2-го вида, а именно сдвига. Расслоение вдоль контактной поверхности арматуры, а в данном случае «стержень – бетон», обладает существенным значением для несущей способности сцепления стержня с бетоном.

На рисунке 3 показан график модели билинейного поведения профиля арматуры со стержнем [13]

$$\sigma_n = K_n u_n (1 - d_n), \quad (1)$$

где σ_n – напряжение; K_n – контактная жесткость; u_n – смещение по касательной в контактной области; d_n – параметр нарушения связывающей матрицы.

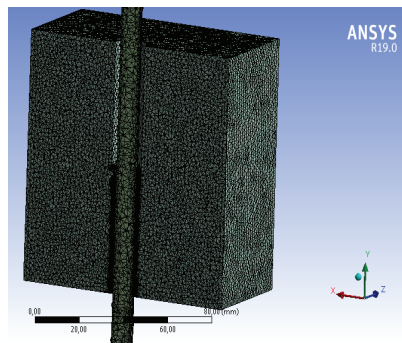


Рис. 2. Расчетная конечная элементная модель

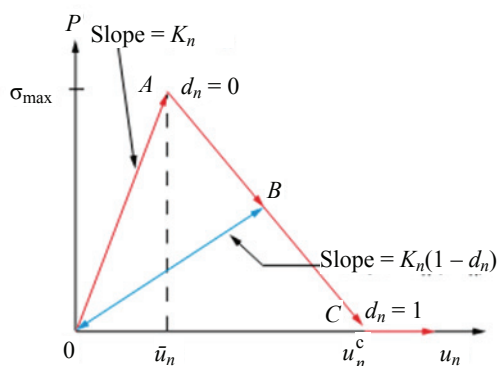


Рис. 3. Модель билинейного поведения цементного геля в зоне контакта арматуры с бетоном [13]

Параметр нарушения склеивающей матрицы

$$d_n = \left(\frac{u_n - \bar{u}_n}{u_n} \right) \left(\frac{u_n^c}{u_n^c - \bar{u}_n} \right), \quad (2)$$

где \bar{u}_n , u_n^c – смещение (длина скольжения) в контактной зоне при максимальном напряжении и разрушении склеивающей матрицы соответственно.

При этом энергия критического разрушения вычисляется по формуле

$$G_{cn} = \frac{1}{2} \sigma_{\max} u_n^c, \quad (3)$$

где σ_{\max} – максимальное контактное напряжение.

Для расчета требуются ориентировочные данные экспериментальных исследований, а именно должны быть заданы \bar{u}_n , u_n^c и K_n . Для этого приведем серию из 100 численных экспериментов в пакете ANSYS optiSLang [7], в котором искомые параметры будут заданы в диапазоне случайным образом (табл. 1), где σ_{HH} – начальные напряжения (НН).

Предположим, что функция принимает вид $y = f(X, p_1, \dots, p_n)$. Приведем ее к виду $y = f(X, p)$, где X – вектор входных данных, формирующих модель (в данном случае смещение арматурного стержня относительно бетона от прикладываемой нагрузки), p – вектор параметров из табл. 1.

Отметим, что язык реализуемого в ANSYS optiSLang пакета отличается от кода на MATLABV.R2014a. По содержанию программы существенно разные. Код на MATLABV.R2014a проводит вычисление значения среднеквадратичной ошибки MSE.

Таблица 1

Диапазон предлагаемых величин искомых параметров*

Значения	σ_{\max} , МПа	K_n	\bar{u}_n , мк	u_n^c , мк	σ_{HH} , МПа
min			0		
max	3,2	20	25	50	3

*Данные значения получены авторами [1 – 6]

Проведем поиск среднеквадратичной ошибки

$$\text{MSE} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (z_i - \bar{z}_1)^2, \quad (4)$$

где m – объем выборки; z_i – i -й элемент выборки; \bar{z}_1 – среднее арифметическое значение выборки.

В то же время ANSYS optiSLang не проводит никаких вычислений MSE, а формирует поток данных по изменению модели в ANSYS, из которых получается величина смещения арматурного стрежня относительно бетона. Вследствие этого необходимо работать в двух отдельных пакетах, так как расчет проводится параллельно, и приходится переносить данные с одного пакета в другой (то есть передавать массивы данных предлагаемых величин параметров MATLABV.R2014a для дальнейшего вычисления в ANSYS, а результат переносим обратно MATLABV.R2014a для поиска MSE). При передаче тензоров в MATLABV.R2014a формируется подгруппа потока данных в виде матрицы.

Как и в одномерном случае, характер задачи и, соответственно, возможные методы решения существенно зависят от информации о целевой функции, которая нам доступна в процессе ее исследования. В данном случае целевая функция задается аналитической формулой, являясь при этом дифференцируемой. Следовательно, можно вычислить ее частные производные, получить явное выражение для градиента, определяющего в каждой точке направления возрастания и убывания функции, и использовать данную информацию для решения задачи.

В других случаях никакой формулы для целевой функции нет, а имеется лишь возможность определить ее значение в любой точке рассматриваемой области (в нашем случае в результате эксперимента), что существенно помогает при выборе метода оптимизации начальной точки поиска. Целевая функция рассматриваемой области значений обладает рядом специальных свойств, что затрудняет анализ. Конкретизация задачи, выделение определенных классов функций и областей позволяют провести более глубокое исследование и разработать методы, которые решают задачу исчерпывающим образом. Важным классом таких «специализированных» задач оптимизации являются задачи линейного программирования.

Сплошной перебор.

Данный метод используется для решения одномерных задач, иногда двумерных, реже трехмерных. Однако, для задач большей размерности он практически непригоден, поскольку требует больших затрат времени, необходимых для проведения расчетов. Предположим, что целевая функция зависит от n переменных, а область определения является n -мерным кубом, каждую сторону которого при построении сетки делим на 40 частей. Тогда общее число узлов сетки будет равно 41^n . Пусть вычисление значения функции в одной точке требует 1000 арифметических операций (это недостаточно для функции пяти переменных). В таком случае, общее число операций составит 1011. Если в нашем распоряжении имеется ЭВМ с быстротой обработки действий миллион операций в секунду, то для решения задачи с помощью данного метода потребуется 10^6 секунд, что превышает 11 суток непрерывной работы. Добавление еще одной независимой переменной увеличит это время в 40 раз.

Проведенная оценка показывает, что для больших задач поиска метод сплошного перебора непригоден. В некоторых случаях сплошной перебор заменяют случайным поиском. Тогда точки сетки просматриваются не подряд, а в случайном порядке. В результате поиск наименьшего значения целевой функции существенно ускорится, но теряет свою надежность.

Градиентный спуск.

Выберем каким-либо способом начальную точку, вычислим в ней градиент рассматриваемой функции и сделаем небольшой шаг в обратном, антиградиентном направлении.

Шаг градиентного спуска принимает следующий вид:

$$p^{(n+1)} = p^{(n)} - \alpha \nabla_p \text{loss}(p), \quad (5)$$

где $p^{(n)}$ – значение вектора параметров на текущем шаге; α – шаг обучения;

$\nabla_p \text{loss}(p) = \left[\frac{df}{dx_1} \dots \frac{df}{dx_n} \right]^T$ – градиент функции потерь по вектору параметров.

Фактически, для решения поставленной задачи требуется выполнение условия $\nabla_p \text{loss}(p) = 0$.

В результате, придем в точку, в которой значение функции будет меньше первоначального. В новой точке повторим процедуру: снова вычислим градиент функции и сделаем шаг в обратном направлении. Продолжая данный процесс, будем двигаться в сторону убывания функции. Специальный выбор направления движения на каждом шаге позволяет надеяться на то, что в данном случае приближение к наименьшему значению функции будет более быстрым.

Алгоритм Ньютона.

Шаг алгоритма Ньютона принимает вид

$$p^{(n+1)} = p^{(n)} - [\text{Hloss}(p)]^{-1} \nabla_p \text{loss}(p), \quad (6)$$

$$\text{где } \text{Hloss}(p) = \begin{bmatrix} \frac{d^2 \text{loss}(p)}{dx_1^2} & \frac{d^2 \text{loss}(p)}{dx_1 dx_2} & \dots & \frac{d^2 \text{loss}(p)}{dx_1 dx_n} \\ \frac{d^2 \text{loss}(p)}{dx_2 dx_1} & \frac{d^2 \text{loss}(p)}{dx_2^2} & \dots & \frac{d^2 \text{loss}(p)}{dx_2 dx_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d^2 \text{loss}(p)}{dx_n dx_1} & \frac{d^2 \text{loss}(p)}{dx_n dx_2} & \dots & \frac{d^2 \text{loss}(p)}{dx_n^2} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Оптимизируем алгоритмом Гаусса–Ньютона.

Чтобы не путаться во множестве символов, будем считать, что J_r – матрица Якоби функции невязок в текущей точке p :

$$J_r = \begin{bmatrix} \frac{dr_1}{dp_1} & \dots & \frac{dr_1}{dp_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dr_m}{dp_1} & \dots & \frac{dr_m}{dp_n} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Тогда алгоритм Гаусса–Ньютона можно записать в виде

$$p^{(n+1)} = p^{(n)} - [J_r^T J_r]^{-1} J_r^T r(p). \quad (9)$$

Запись по форме полностью совпадает с записью метода Ньютона. Только вместо матрицы Гессе используется $J_r^T J_r$, а вместо градиента – $J_r^T r(p)$.

Из вышеизложенных экспериментов получили m точек X . Векторная функция невязок зависит только от вектора параметров: $r(p) = (r_1(p) \dots r_m(p))$, где $r_k(p) = y_k - f(X, p)$. Возникает вопрос: «Почему функция невязок зависит только от p , ведь в ней присутствует X ?». Дело в том, что X установлен из численных экспериментов и зафиксирован, и только вектор параметров p является переменным.

Необходимо установить значения вектора параметров p , чтобы сумма квадратов невязок была минимальная. Вместо привычной MSE будем использовать среднеквадратичную невязку SSE, чтобы не проводить везде деление на m . Данные функции достигают своего минимума на одном и том же векторе параметров. Функция потерь имеет вид

$$\text{loss}(p) = r_1^2(p) + \dots + r_m^2(p) = \sum_{k=1}^m r_k^2(p). \quad (10)$$

Чтобы воспользоваться методом Ньютона, нужен градиент данной функции и матрица Гессе. Градиент – это вектор частных производных; производная суммы – сумма производных, а производная квадрата функции r_1^2 равна $2r \frac{dr}{dp}$.

Таким образом, получаем

$$\nabla_p \text{loss}(p) = \left(\sum_{k=1}^m \frac{dr_k}{dp_1}, \dots, \sum_{k=1}^m 2r \frac{dr_k}{dp_n} \right). \quad (11)$$

Матрица Гессе состоит из всех комбинаций вторых производных. Ячейка матрицы Гессе принимает вид

$$[\text{Hloss}(p)]_{ij} = \frac{d^2 \text{loss}}{dp_i dp_j} = \sum_{k=1}^m \left(2r \frac{dr_k}{dp_i dp_j} + 2r \frac{d^2 r_k}{dp_i dp_j} \right). \quad (12)$$

Заметим, что в формуле для матрицы Гессе есть часть $2r \frac{dr_k}{dp_i dp_j}$, которая уменьшается по мере приближения к минимуму. Чем ближе к минимуму, тем меньше невязка, и тем меньше r_k , а следовательно и все произведение. Именно данный компонент требует вычислительных мощностей из-за содержания второй производной. Однако если им пренебречь, то получим алгоритм Гаусса–Ньютона.

Отметим, что матрица Якоби гораздо проще, чем градиент и матрица Гессе $2J_r^T J_r \approx \text{Hloss}(p)$, что наглядно видно при проведении матричного умножения (строка умножается на столбец). Для матрицы Гессе без компонента получается результат, равный $2r \frac{d^2 r_k}{dp_i dp_j}$, которым предлагаем пренебречь.

В то же время градиент необходимо умножить на матрицу-вектор

$$2J_r^T r \approx \nabla_p \text{loss}(p). \quad (13)$$

Таким образом, получается, что алгоритм Гаусса–Ньютона – это метод Ньютона с аппроксимацией матрицы Гессе через матрицу Якоби, который работает только с MSE.

Из вышеизложенного можно предположить, что градиентный спуск и метод Гаусса–Ньютона можно скомбинировать и привести к общему виду

$$p^{(n+1)} = p^{(n)} - [J_r^T J_r + \gamma I]^{-1} J_r^T r(p). \quad (14)$$

Скалярная переменная γ умножается на диагональную единичную матрицу I размерности n (количество параметров). Если значение γ приравнивается к нулю, то шаг принимается как шаг Гаусса–Ньютона. Но если значение принимает большую величину, то получается градиентный спуск, то есть метод колеблется между градиентным спуском и алгоритмом Гаусса–Ньютона.

Фактически, после каждого удачного шага оптимизации γ уменьшается, а после каждой неудачи увеличивается. Еще одна особенность предложенного метода – проводятся только шаги, которые действительно уменьшают значение MSE. Следует отметить, что при неудачном шаге происходит пересчет матрицы Якоби, что неэффективно, то есть, при больших значениях можно ею пренебречь, а проводить только градиентный спуск.

Результаты поиска параметров модели численным методом.

Разработанная физическая модель описывает сцепления арматуры с бетоном с уточненной функцией НН и склеивающего цементного геля при различных циклах замораживания-оттаивания (в диапазоне F0 – F100). Численные и натурные эксперименты имеют высокую сходимость (рис. 4). Статистический анализ, основанный на значениях средней абсолютной ошибки MAPE, MSE и других, также показал, что предлагаемая физическая модель имеет низкий показатель ошибки. Поэтому данные, полученные из модели, достоверны. На их основе можно провести анализ поведения начального напряжения и склеивающего цементного геля под воздействием циклов замораживания-оттаивания.

Для описания работы цементного геля в контактной области арматуры с бетоном применялась модель CZM, имеющая билинейную форму. Модель CZM можно описать четырьмя параметрами, для поисков которых применялся численный метод.

С помощью численного метода получена зависимость изменения $\sigma_{нн}$ от прикладываемой нагрузки $\tau_{сц}$ (рис. 5). Следует отметить, что величины $\sigma_{нн}$ для СПА и металлической арматуры оказались схожими.

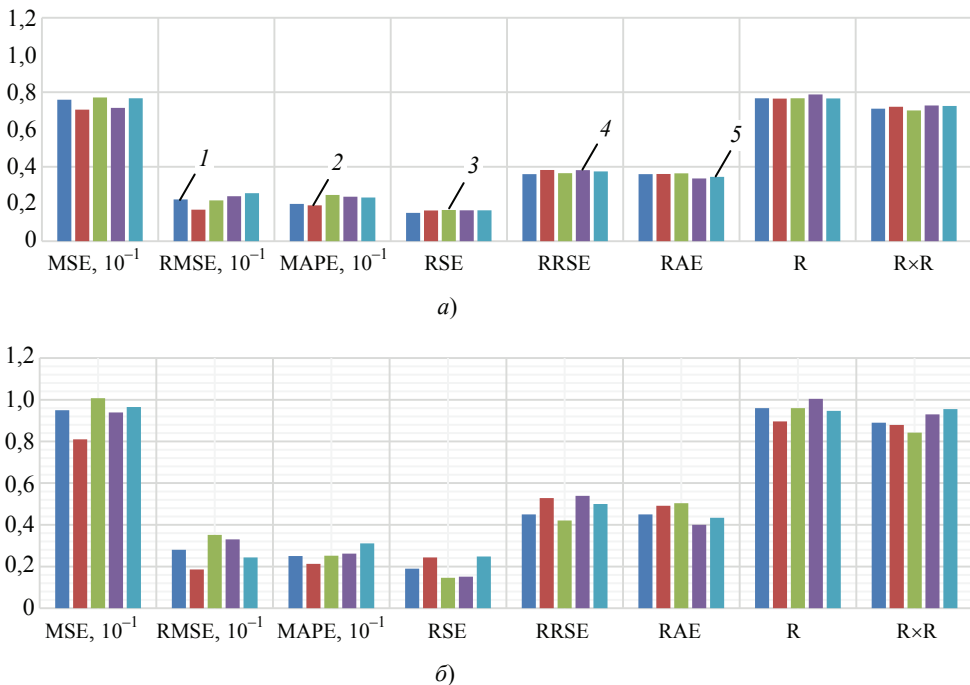


Рис. 4. Статистические параметры предлагаемой модели для образцов со СПА (а) и металлической арматурой (б):
1 – F0; 2 – F25; 3 – F50; 4 – F75; 5 – F100

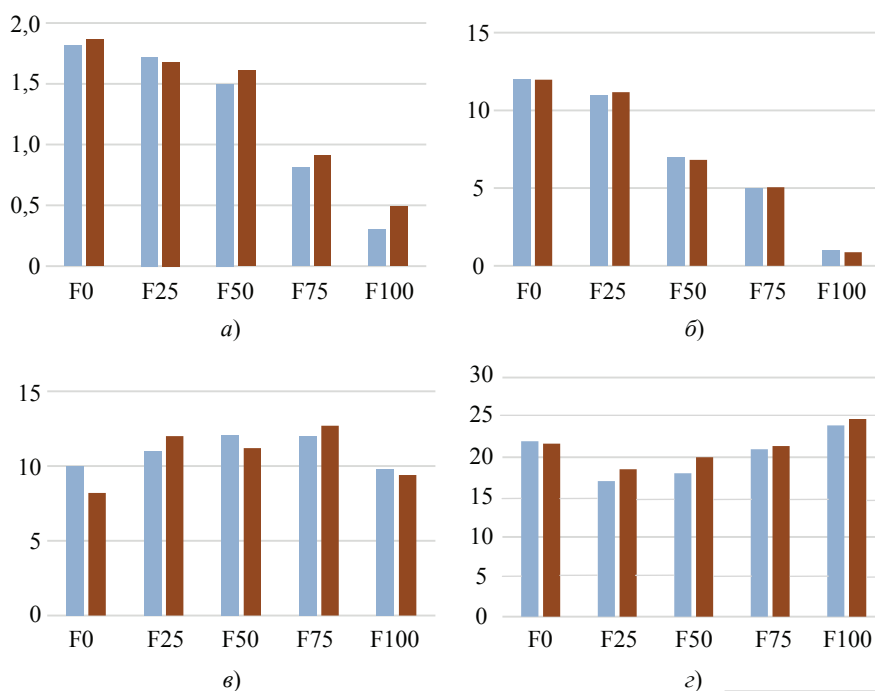


Рис. 5. Параметры CZM, описывающие поведение цементного геля в области заделки арматуры в бетон:

$a - \sigma_{\max}$ – максимальное допустимое напряжение цементного геля; $b - K_n$ – контактная жесткость; $c - u_n^c$ – смещение (длина скольжения) в контактной зоне при максимальном напряжении; $d - u_n^c$ – смещение в контактной зоне при разрушении склеивающей матрицы;
■ – СПА; ■ – металлическая арматура

В бетоне, кроме тех внутренних напряжений, которые образованы внешней нагрузкой и уравнивают ее, могут быть и другие самоуравновешивающиеся внутренние напряжения, которые, как правило, образуются в процессе изготовления элемента и называются начальными. В данном случае их величина составляет 0,5...0,7 от разрушающего напряжения (рис. 6). С увеличением прикладываемого усилия к арматурному стержню, НН начинают уменьшаться и при $\tau_{cu} \approx 8$ МПа достигают нулевых значений. При рассмотрении данного процесса уже после

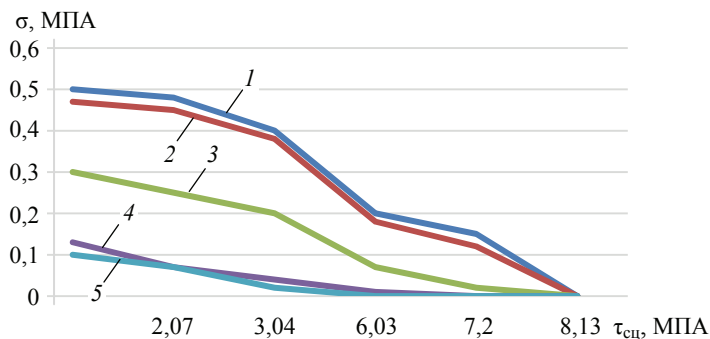


Рис. 6. Зависимости «начальные напряжения – напряжение τ_{cu} » при различных циклах замораживания–оттаивания:
 1 – F0; 2 – F25; 3 – F50; 4 – F75; 5 – F100

циклов замораживания-оттаивания (до F25) видно, что НН практически не изменяются. При последующих циклах напряжения начинают снижаться и при F75 достигают минимальных значений, которые практически не оказывают влияния на величину Δ , однако следует отметить, что при F100 величина напряжений все же присутствует, но ее влияние незначительно ($\sigma \approx 0,1$ МПа). При $\tau_{\text{сц}} \geq 3$ МПа напряжения отсутствуют.

Применение данного численного метода для анализа физических процессов, возникающих при сцеплении арматуры с бетоном (таких, как склеивающий цементный гель и начальные напряжения, которые невозможно установить эмпирическими методами), показало высокую эффективность. Сопоставление данных, полученных эмпирическим и численным экспериментами, показывает высокую сходимость полученных результатов.

Выводы

1. Начальные напряжения и склеивающий цементный гель оказывают влияние на величину смещения Δ в тех случаях, когда нагрузка, прикладываемая к арматуре, не превышает 0,4 от разрушающей нагрузки для металлической арматуры и 0,55 – для СПА.

2. С увеличением циклов замораживания-оттаивания влияние начальных напряжений и склеивающего цементного геля на величину сцепления уменьшается. При величине циклов более F100 их влияние практически отсутствует.

Список литературы

1. Залигер, Р. Железобетон, его расчет и проектирование / Р. Залигер ; пер. с нем. Л. В. Рейнберга, Н. Н. Чечулина ; под ред. П. Я. Каменцева. – М. – Л. : Гос. изд-во, 1928. – 671 с.

2. Столяров, Я. В. Введение в теорию железобетона / Я. В. Столяров. – М. – Л. : Стройиздат наркомстроя, 1941. – 447 с.

3. Гараи, Т. Исследование анкеровки арматуры в бетоне : дис. ... канд. техн. наук : / Гараи Тамаш. – М., 1953. – 161 с.

4. Холмянский, М. М. Контакт арматуры с бетоном / М. М. Холмянский. – М. : Стройиздат, 1981. – 184 с.

5. Мурашев, В. И. Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона / В. И. Мурашев. – М. : Машстройиздат, 1950. – 268 с.

6. Тевелев, Ю. А. Железобетонные конструкции в водохозяйственном строительстве: проектирование и изготовление / Ю. А. Тевелев, А. Н. Дмитриев. – М. : Росинформагротех, 2006. – 312 с.

7. Экспериментальные исследования прочности сцепления стеклопластиковой арматуры с цементно-песчаным бетоном / А. Н. Николюкин, В. П. Ярцев, И. И. Коломникова, Д. З. Альджабуи // Транспортные сооружения : интернет-журнал. – 2019. – Т. 6, № 1. – 11 с. – URL : https://elibrary.ru/download/elibrary_38097381_81840646.pdf (дата обращения: 30.06.2020).

8. Анализ напряжено-деформированного состояния бетона и арматуры в области их сцепления в программном комплексе ANSYS / А. Н. Николюкин, В. П. Ярцев, С. А. Мамонтов [и др.] // Вестн. Белгородского гос. технолог. ун-та им. В. Г. Шухова. – 2019. – № 11. – С. 43 – 52. doi: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-43-52

9. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. Release 15.0. – Canonsburg, Pennsylvania, USA, 2013. – 1448 p.

10. Drucker, D. C. Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design / D. C. Drucker, W. Prager // Quarterly of Applied Mathematics. – 1952. – Vol. 10, No. 2. – P. 157 – 165.

11. Menetrey, P. Numerical Analysis of Punching Failure in Reinforced Concrete Structures : Dis. ... Doctor of Technical Sciences / P. Menetrey. – Lausanne, 1994. – 197 p.

12. Willam, K. J. Constitutive Models for the Triaxial Behavior of Concrete / K. J. Willam, E. P. Warnke // Colloquium on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses : Proceedings of the International Association for Bridge and Structural Engineering, 17 – 19 May, 1974, Bergamo, Italy. – ETH Zurich, 1975. – Vol. 19. – P. 1 – 30.

13. Кашеварова, Г. Г. Расчетно-экспериментальное исследование процесса разрушения связей сцепления при вдавливании стержня жесткой арматуры в бетон / Г. Г. Кашеварова, А. С. Мартиросян, В. И. Травуш // Вестн. Пермского национ. исследоват. политехн. ун-та. Механика. – 2016. – № 3. – С. 62 – 75. doi: 10.15593/pern.mech/2016.3.04

14. Гиздатуллин, А. Р. Совместная работа полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном в конструкциях : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Гиздатуллин Антон Ринатович. – Казань, 2018. – 190 с.

The Analytical Study of the Value of Adhesion of Cement Gel between Reinforcement and Concrete

A. N. Nikolyukin, V. P. Yartsev, S. A. Mamontov,
I. I. Kolomnikova, A. S. Pechnikov, N. O. Nikifin

*Department of Designing of Buildings and Structures, valax1@yandex.ru;
TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: fittings; concrete; mathematical model; clutch; numerical method.

Abstract: Disruption of the adhesion of reinforcement to concrete causes significant deformation of the structure, which can subsequently lead to the loss of its bearing capacity. There is a need to study the bonding process between concrete and reinforcement under various influences. The results of a numerical experiment on pulling out reinforcement of periodic profile from concrete are presented. A mathematical model to study the processes taking place in the field of embedding reinforcement in concrete has been built. The results of numerical modeling are described.

References

1. Zaliger R., Kamentsev P.Ya. [Ed.] *Zhelezobeton, yego raschet i proyektirovaniye* [Reinforced concrete, its calculation and design], Moscow - Leningrad: Gosudarstvennoye izdatel'stvo, 1928, 671 p. (In Russ.)

2. Stolyarov Ya.V. *Vvedeniye v teoriyu zhelezobetona* [Introduction to the theory of reinforced concrete], Moscow - Leningrad: Stroyizdat narkomstroya, 1941, 447 p. (In Russ.)

3. Garai T. *PhD Dissertation (Technical)*, Moscow, 1953, 161 p. (In Russ.)

4. Kholmyanskiy M.M. *Kontakt armatury s betonom* [Contact of reinforcement with concrete], Moscow: Stroyizdat, 1981, 184 p. (In Russ.)
 5. Murashev V.I. *Treshchinoustoychivost', zhestkost' i prochnost' zhelezobetona* [Crack resistance, stiffness and strength of reinforced concrete], Moscow: Mashstroyizdat, 1950, 268 p. (In Russ.)
 6. Tevelev Yu.A., Dmitriyev A.N. *Zhelezobetonnyye konstruksii v vodokhozyaystvennom stroitel'stve: proyektirovaniye i izgotovleniye* [Reinforced concrete structures in water management: design and manufacture], Moscow: Rosinformagrotekh, 2006, 312 p. (In Russ.)
 7. https://elibrary.ru/download/elibrary_38097381_81840646.pdf (accessed 30 June 2020).
 8. Nikol'yukin A.N., Yartsev V.P., Mamontov S.A., Kolomnikova I.I., Al Ward A.M. [Analysis of the stress-strain state of concrete and reinforcement in the area of their engagement in the ANSYS software package], *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova* [Bulletin of the Belgorod State Technological Logical University named after V. G. Shukhov], 2019, no. 11, pp. 43-52, doi: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-43-52 (In Russ., abstract in Eng.)
 9. *ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. Release 15.0*, Canonsburg, Pennsylvania, USA, 2013, 1448 p.
 10. Drucker D.C., Prager W. Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design, *Quarterly of Applied Mathematics*, 1952, vol. 10, no. 2, pp. 157-165.
 11. Menetrey P. *PhD Dissertation (Technical)*, Lausanne, 1994, 197 p.
 12. Willam K.J., Warnke E.P. *Colloquium on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses*, Proceedings of the International Association for Bridge and Structural Engineering, 17 - 19 May, 1974, Bergamo, Italy, ETH Zurich, 1975, vol. 19, pp. 1-30.
 13. Kashevarova G.G., Martirosyan A.S., Travush V.I. [Computational and experimental study of the process of destruction of bonds of adhesion when a rigid reinforcement bar is pressed into concrete], *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [Bulletin of the Perm national Research Polytechnic University. Mechanics], 2016, no. 3, pp. 62-75, doi: 10.15593/perm.mech/2016.3.04 (In Russ., abstract in Eng.)
 14. Gizdatullin A.R. *PhD Dissertation (Technical)*, Kazan, 2018, 190 p. (In Russ.)
-

Analytische Untersuchung des Wertes der Haftung von Zementgel zwischen Bewehrung und Beton

Zusammenfassung: Die Störung der Haftung der Bewehrung mit dem Beton verursacht signifikante Verformungen der Struktur, die anschließend zu einem Verlust der Tragfähigkeit führen können. Es besteht die Notwendigkeit, den Prozess der Haftung zwischen Beton und Bewehrung unter verschiedenen Einflüssen zu untersuchen. Es sind die Ergebnisse des numerischen Experiments zur Erprobung des Herausziehens der Bewehrung des periodischen Profils aus Beton präsentiert. Es ist ein mathematisches Modell erstellt, mit dem die Prozesse im Bereich der Einbettung von Bewehrung in Beton untersucht werden können. Die Ergebnisse der numerischen Modellierung sind betrachtet.

Étude analytique de l'adhérence du gel de ciment entre l'armature et le béton

Résumé: La rupture de l'adhérence de l'armature avec le béton provoque des déformations importantes de la structure, ce qui peut ensuite entraîner une perte de sa capacité portante. Il est nécessaire d'étudier le processus d'adhérence entre le béton et les armatures sous diverses influences. Sont présentés les résultats de l'expérience numérique du test sur la rupture d'armature du profil périodique du béton. Est construit un modèle mathématique permettant d'étudier les processus qui se déroulent dans le domaine de l'étanchéité des armatures dans le béton. Sont examinés les résultats de la simulation numérique.

Авторы: *Николюкин Алексей Николаевич* – аспирант кафедры «Конструкции зданий и сооружений»; *Ярцев Виктор Петрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений»; *Мамонтов Семен Александрович* – старший преподаватель кафедры «Конструкции зданий и сооружений»; *Коломникова Ирина Игоревна* – студент; *Печников Александр Сергеевич* – магистрант; *Никитин Никита Олегович* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Леднев Виктор Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.