

УДК: 624.012
DOI: 10.52409/20731523_2022_4_18
EDN: TOADUE



Перемещение арматуры периодического профиля в заделке при статическом нагружении

Илшат Т. Мирсаяпов¹, Р.И. Минзянов¹

¹ Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Существует необходимость разработки нового метода расчета перемещения арматуры периодического профиля в заделке при статическом нагружении, наиболее просто учитывающего реальную работу арматуры и бетона в зоне их непосредственного контакта, а также описывающего напряженно-деформированное состояние на всех стадия нагружения от начала проскальзывания до разрушения заделки. Цель исследования: на основе анализа существующих моделей и методов оценки напряженно-деформированного состояния предложить новую модель и новый метод расчета перемещения арматуры в бетоне. Задачи работы: определить усилия, возникающие под выступом арматурного стержня; используя статический и кинематический способы метода предельного равновесия, определить возможные перемещения клина под выступами; определить предельные деформации перемещения, при которых происходит разрушение заделки.

Результаты. Проведены теоретические исследования поведения арматуры периодического профиля в заделке при статическом нагружении. Представлена новая модель работы заделки, на основании которой получены уравнения перемещений арматуры, позволяющие оценить напряженно-деформированное состояние контакта «бетон-арматура» на всех стадия нагружения.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в том, что предложенная модель и метод расчета позволяют наиболее точно оценить напряженно-деформированное состояние зоны контакта «бетон-арматура» в задаче по вытягиванию арматуры периодического профиля из бетонного блока при статическом нагружении. Это является существенным вкладом в развитие теории сцепления арматуры периодического профиля с бетоном. Данная методика может быть использована для определения длины анкеровки и нахлестки арматуры, а также для расчета закладных деталей.

Ключевые слова: железобетон, арматура, периодический профиль, сцепление, статическое нагружение, перемещение.

Для цитирования: Мирсаяпов Илшат Т., Минзянов Р.И. Перемещение арматуры периодического профиля в заделке при статическом нагружении // Известия КГАСУ.2022. № 4 (62), с.18-29 DOI: 10.52409/20731523_2022_4_18, EDN: TOADUE

Movement of the reinforcement of a periodic profile in the embedment under static load

Ishat T. Mirsayapov¹, R. I. Minzyanov¹

Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract: There is a need to develop a new method for calculating the displacement of the reinforcement of a periodic profile in the embedment under static loading, which most simply takes into account the actual work of the reinforcement and concrete in the zone of their direct

contact, and also describes the stress-strain state at all stages of loading from the beginning of slippage to the destruction of the embedment. Objectives of the work: analysis of domestic and foreign studies and identification of the state of the issue in assessing the displacement of reinforcement in the embedment. A new model and a new method for calculating the displacement of reinforcement in concrete are proposed based on the analysis of existing models and methods for assessing the SSS.

Results. Theoretical studies of the behavior of the reinforcement of a periodic profile in the embedment under static loading have been carried out. A new model of embedding operation is presented, on the basis of which the equations of reinforcement displacements are obtained, with the help of which it is possible to estimate the stress-strain state of the concrete-reinforcement contact at all stages of loading.

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry lies in the fact that the proposed model and calculation method allow the most accurate assessment of the stress-strain state of the "concrete-rebar" contact zone in the problem of drawing reinforcement of a periodic profile from a concrete block under static loading. This is a significant contribution to the theory of adhesion of ribbed reinforcement to concrete.

Keywords: reinforced concrete, reinforcement, periodic profile, adhesion, static loading, displacement.

For citation: Mirsayapov Ilshat T., Minzyanov R. I. Movement of the reinforcement of a periodic profile in the embedment under static load // News KSUAE. 2022. № 4 (62), с.18-29 DOI: 10.52409/20731523_2022_4_18, EDN: TOADUE

1. Введение

Сущность железобетона как материала определяется главным образом закономерностями взаимодействия арматуры и бетона. Проскальзывание арматуры относительно бетона не происходит благодаря сцеплению.

Под сцеплением подразумевается совокупность физических и механических явлений на контактных поверхностях арматуры и бетона, обеспечивающих их связь и оказывающих сопротивление перемещениям арматуры в бетоне или иначе можно сказать, что сцепление – это сопротивление бетона продольным перемещениям арматуры.

До появления арматуры периодического профиля рабочей арматурой железобетонных элементов служила гладкая арматура. Сопротивление сдвигу гладкой арматуры обеспечивается в основном работой адгезионных связей, а также силами трения, возникающими от радиального давления при усадке бетона.

При переходе к массовому применению профилированной арматуры эти представления пытались сохранить, вводя в расчетные выражения дополнительно сопротивление за счет зацепления выступов арматуры. Но адгезионное сопротивление и трение по гладкой поверхности арматуры между выступами имеют второстепенное значение, а главным здесь является зацепление выступов арматуры, т.е. сцепление профилированной арматуры обусловлено в основном сопротивлением бетона смятию.

В последние годы активно изучается тема сцепления арматуры с бетоном [1, 2]. После того как был выявлен механизм взаимодействия арматуры с бетоном, появилось много предложений по его аналитическому описанию [3].

В настоящее время при статическом нагружении наибольшее применение нашла техническая теория сцепления (ТТС), разработанная во ВНИИЖелезобетона России [4], основанная на применении аналитической модели. Несмотря на то, что передача арматурой усилий на бетон происходит в основном вследствие смятия под выступами, в указанной модели арматура моделируется цилиндрическим, условно гладким стержнем, а передаваемые ею усилия заменяются напряжениями, отнесенными к условной поверхности контакта.

Касательная компонента этих напряжений названа «условными напряжениями сцепления» τ_g , нормальная – «поперечным давлением» p_g . Распределение этих контактных напряжений предполагается осесимметричным, поэтому их значения зависят лишь от одной координаты, выражающей положение поперечного сечения вдоль

рассматриваемого арматурного стержня. При этом напряжения сцепления однозначно определяются величиной продольных смещений на основании закона сцепления. Наиболее приемлемыми являются нормальный и упругопластический закон сцепления [4].

В зависимости от вида граничных условий, техническая теория сцепления позволяет при статическом нагружении решать следующие основные задачи:

- 1) на одном из концов элемента заданы напряжения в арматуре;
- 2) на обоих концах заданы напряжения в арматуре;
- 3) на обоих концах заданы взаимные смещения;
- 4) на одном конце заданы напряжения в арматуре, на другом – взаимные смещения.

Для расчетов на основе нормального закона сцепления при статическом нагружении в [4] составлены таблицы специальных функций. В зависимости от граничных условий и случая нагружения по этим таблицам определяются взаимные смещения, напряжения в арматуре, а по закону сцепления – напряжения сцепления. Определяя их для нескольких точек по длине элемента, строятся соответствующие эпюры, и при статическом нагружении элементов.

Итак, в ТТС арматура моделируется цилиндрическим, условно гладким стержнем, а передаваемые ею усилия заменяются напряжениями, отнесенными к условной поверхности контакта. ТТС не отражает действительную работу бетона и арматуры в заделке и поэтому не в состоянии учитывать то, что передача арматурой усилий на бетон происходит в основном вследствие смятия под выступами.

Внимания заслуживает модель Comité Euro-International du Béton (CEB) [5]. Модель CEB позволяет определить сцепление арматуры с бетоном на разных стадиях нагружения, выделяя следующие этапы: ребра арматурных стержней проникают в матрицу строительного раствора; сдвиг бетона между ребрами; появления трещин раскола вдоль стержней.

Также можно выделить законы, близко описывающие экспериментальные данные:

- степенной закон Г. Рема;
- степенной закон Мирза и Хоуде;
- закон Марти;
- эмпирический закон Д.У. Уотштейна;
- модель для вычисления контактных напряжений Идда.

Многие исследователи пытались теоретически обосновать результаты экспериментальных данных, основываясь на постулатах сопротивления материалов, теории упругости, контактных задач.

Например, в работе [6] разработали модель, учитывающую напряжения раскола сцепления и радиальную деформацию между арматурным стержнем и бетоном. Такой подход позволяет описать напряжения сцепления на границе раздела стали и бетона в трех измерениях.

Разрушение от раскола, которое является основным типом разрушения для стержней в бетоне, исследовано в работе [7]. В его работе учтены такие факторы, как граничные свойства, особенности деформации, толщина защитного слоя бетона. Интерес также представляют работы [8-9].

Большое внимание проблеме сцепления арматуры с бетоном уделяется при таких исследованиях, как экспериментальное определение предельно допустимой нагрузки на строительные конструкции зданий и сооружений. Авторы в работе [10] исследуют поведение плиты перекрытия при испытании пригрузкой баками с водой. В эксперименте на бетон и арматуру клеятся тензодатчики, по которым снимаются показания напряжений в бетоне и арматуре. По этим данным есть возможность оценить напряжение в контактном слое бетона.

В работе [11] выполнено комплексное расчетно-экспериментальное исследование процесса начала разрушения связей сцепления при вдавливании стержня жесткой стальной арматуры в виде двутавра в бетон.

Стремительными темпами развивается компьютерный анализ работы строительных конструкций. С помощью искусственных нейронных сетей в работе [12] получена аналитическая модель, описывающая конечную прочность сцепления через средние

значения касательных напряжений. В качестве объекта исследования выступает бетон различных классов прочности, армированный металлической и композитной арматурой. Установлено, что величина сцепления связана с прочностными характеристиками бетона и видом применяемой арматуры.

Приближенное решение задач сцепления арматуры с бетоном в призматических элементах показано в работе [13]. В статье приведены возможности современного варианта технической теории сцепления стальной арматуры с бетоном для инженерных расчётов ряда величин, интересующих исследователей и проектировщиков.

Особенности работы контакта бетон-арматура исследуются в работах по изучению стыков монолитных, сборных и сборно-монолитных конструкций. Большой интерес представляют работы [14-18].

Сцепление профилированной арматуры главным образом обусловлено зацеплением, а значит, сопротивлением бетона смятию по малым площадкам. Таким образом, в настоящее время отсутствует универсальная теория сцепления, которая учитывала бы реальные режимы деформирования бетона и арматуры в заделке, а также реальные механизмы её разрушения.

Целью настоящего исследования является разработка новых теоретических методов определения перемещения арматуры в заделке при статическом нагружении, позволяющих проследить за перемещением арматуры на каждом этапе нагружения.

Задачи, которые обеспечат достижение указанной выше цели, следующие:

- на основании существующей модели раскалывания А.С. Залесова определить усилия, возникающие под выступом арматурного стержня;
- используя статический и кинематический способы метода предельного равновесия, определить возможные перемещения клина под выступами;
- определить предельные деформации перемещения, при которых происходит разрушение заделки.

2. Материалы и методы

Сопротивление заделки арматуры продольным смещениям определяется, главным образом, работой бетона на смятие под выступами. Поскольку выступы располагаются с определенным шагом и под каждым выступом реализуется одинаковое напряженно-деформированное состояние, то для его составляющих в заделке достаточно рассмотреть работу и разрушение бетона под одним выступом (рис. 1).

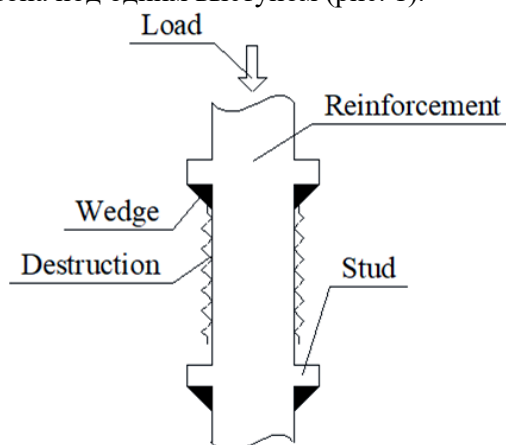


Рис. 1. Образование клина уплотнения под выступами арматуры (иллюстрация авторов)
Fig. 1. Formation of a sealing wedge under the reinforcement protrusions (illustration by the authors)

Общеизвестно, что в бетоне под штампом образуется клин уплотнения. Определение геометрических параметров этого клина описано в [4]. В этой работе угол клина определяется:

$$\cot \varphi_{wd} = 0,098 \cdot \left(\frac{c_r}{\lambda} \right)^{-0,8}, \quad (6)$$

где φ_{wd} – угол клина в радианах;

c_r – ширина штампа в мм;

$\lambda = 72,5$ мм – радиус влияния.

Считается, что этот клин давит на окружающий бетон. Поэтому клин оттесняет окружающий бетон от гладкой поверхности арматуры между выступами. В результате силы адгезии и трения сходят на нет.

Для описания напряженно-деформированного состояния в заделке арматуры под выступами авторами предлагается модель, основанная на модели раскалывания профессора А.С. Залесова (рис. 2а).

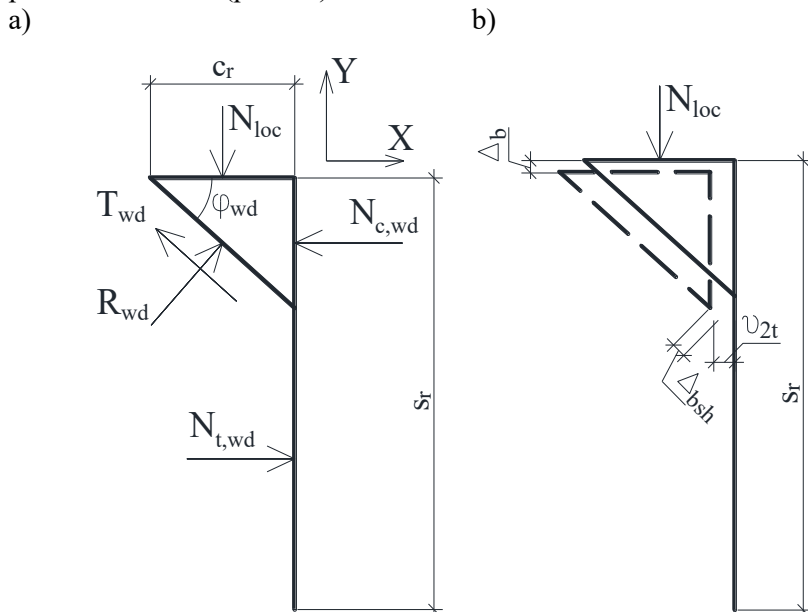


Рис. 2. Перемещение клина уплотнения: а) модель разрушения бетона, б) расчетная модель деформирования бетона при местном сжатии (иллюстрация авторов)
 Fig. 2. Seal wedge movement: a) concrete failure model, b) calculation model of concrete deformation under local compression (illustration by the authors)

Несущая способность участка бетона между выступами зависит от усилий, возникающих в растянутой зоне между вершиной клина и нижним выступом $N_{t,wd}$, и от касательных усилий вдоль грани клина уплотнения T_{wd} .

Для определения зависимостей используется метод предельного равновесия. Из решения уравнений равновесия усилий на оси X и Y , находим значение N_{loc} :

$$N_{loc} = \frac{N_{t,wd} \cdot \cos \varphi_{wd} + T_{wd}}{\sin \varphi_{wd}} \tag{7}$$

Как известно, в момент начала разрушения вследствие накопления остаточных напряжений распределение растягивающих напряжений является достаточно равномерным. Предельная несущая способность растянутой зоны между вершиной клина и нижним выступом определяется:

$$N_{t,wd} = \omega_1 \cdot R_{bt} \cdot b \cdot h_t \tag{8}$$

где $\omega_1 = 0,75$ – коэффициент полноты эпюры растягивающих напряжений.

h_t – длина растянутой зоны элемента, определяется:

$$h_t = s_r - c_r \cdot \tan \varphi_{wd} \tag{10}$$

Также известно, что в момент начала разрушения распределение касательных напряжений является равномерным, а предельные касательные усилия вдоль граней клиньев уплотнения равны:

$$T_{wd} = \tau_{wd} \cdot b \cdot l_{sh} \tag{11}$$

где τ_{wd} – касательные напряжений;

l_{sh} – длина сдвига, определяется:

$$l_{sh} = \frac{c_r}{\cos \varphi_{wd}} \tag{12}$$

В предельной стадии значение N_{loc} :

$$N_{loc} = \sigma_b^{loc} \cdot b \cdot l_{loc} \tag{13}$$

где b – длина окружности кольцевого штампа;

l_{loc} – ширина грузовой площадки:

$$l_{loc} = c_r. \tag{14}$$

Подставляя (6), (8)÷(14) в (7), имеем:

$$\sigma_b^{loc} = 0,75 \cdot R_{bt} \cdot \left(\frac{S_r}{c_r} \cdot \cot \varphi_{wd} - 1 \right) + \frac{\tau_{wd}}{\sin \varphi_{wd} \cdot \cos \varphi_{wd}}. \tag{15}$$

Как видно из (15), одних только уравнений равновесия недостаточно. Для определения касательных напряжений τ_{wd} необходимо воспользоваться кинематическим способом метода предельного равновесия. Для этого рассмотрим перемещение клина уплотнения под действие нагрузки (рис. 2b).

При перемещении клина в вертикальном направлении деформации равны:

$$\Delta_b = \int_{c_r \cdot \tan \varphi_{wd}}^{S_r} \varepsilon_{1c}(h) dh. \tag{16}$$

Поперечное перемещение клина в бетоне от действия сжимающего силового потока равно:

$$v_{2t} = \frac{1}{\tan \varphi_{wd}} \cdot \int_{c_r \cdot \tan \varphi_{wd}}^{S_r} \varepsilon_{1c}(h) dh. \tag{17}$$

Перемещение граней клина относительно бетона при сдвиге:

$$\Delta_{bsh} = \frac{1}{\sin \varphi_{wd}} \cdot \int_{c_r \cdot \tan \varphi_{wd}}^{S_r} \varepsilon_{1c}(h) dh. \tag{18}$$

Относительные деформации сжатия определяются как функция:

$$\varepsilon_b = f(\sigma_b). \tag{19}$$

По диаграмме деформирования бетона, учитывающей поведение бетона в малом масштабе, т.е. зная значение напряжения в бетоне под клином, можно определить относительные деформации, возникающие при перемещении клина.

Для этого нами предлагается трансформированная трехлинейная диаграмма деформирования бетона с нисходящей ветвью [19] (рис. 3).

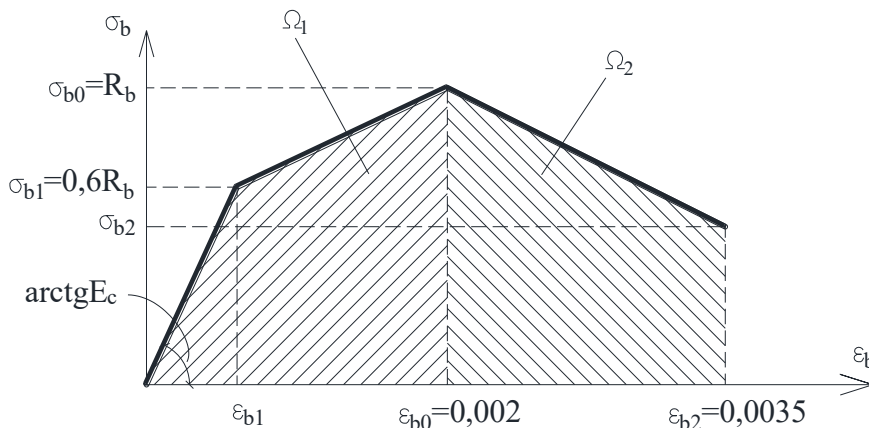


Рис. 3. Диаграмма деформирования бетона (иллюстрация авторов).

Fig. 3. Concrete deformation diagram (illustration by the authors).

Для определения деформаций ε_b необходимо установить закономерность изменения сжимающих напряжений по высоте элемента, поскольку принимать $\sigma_b = \text{const}$ некорректно. Использование предположения о том, что сжимающие напряжения равномерно распределены по глубине элемента, приводят к большим расхождениям с экспериментальными данными.

Для определения давления под острием клина воспользуемся решением элементарной задачи Ж. Буссинеска.

$$\sigma_x = q \cdot \frac{[2 \cdot (\theta_1 - \theta_2) + \sin(2 \cdot \theta_2) - \sin(2 \cdot \theta_1)]}{2 \cdot \pi}. \tag{20}$$

Учитывая, что точка М лежит на оси X, то получим:

$$\sigma_x = - \frac{R_b^{loc}}{\pi} \cdot [2 \cdot \theta + \sin(2 \cdot \theta)]. \tag{21}$$

Подставляя (21) в (20), а затем полученное выражение в (15), имеем:

$$\Delta_{bsh} = \frac{\sigma_b^{loc} \cdot c_r}{2 \cdot \sin \varphi_{wd} \cdot E_b} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \left(2 \cdot \ln \frac{\sin \theta_k}{\cos \theta_k} - \theta_k \cdot \cot \theta_k + \theta_n \cdot \cot \theta_n \right), \quad (22)$$

где

$$\theta_n = \frac{\pi}{2} - \varphi_{wd}; \quad (23)$$

$$\theta_k = \tan^{-1} \frac{c_r}{s_r}. \quad (24)$$

Зная абсолютное значение деформаций сдвига, определим относительные деформации:

$$\gamma_{wd} = \frac{\Delta_{bsh}}{l_{sh}} = 0,5 \cdot \frac{\sigma_b^{loc}}{E_b} \cdot \cot \varphi_{wd} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \left(2 \cdot \ln \frac{\sin \theta_k}{\cos \theta_k} - \theta_k \cdot \cot \theta_k + \theta_n \cdot \cot \theta_n \right). \quad (25)$$

Определяем касательные напряжения:

$$\tau_{wd} = \gamma_{wd} \cdot G_b, \quad (26)$$

где G_b – модуль сдвига:

$$G_b = \frac{E_b}{2 \cdot (1 + \nu)}, \quad (27)$$

$\nu \approx 0,2$ – коэффициент Пуассона.

Окончательно имеем:

$$\tau_{wd} = \frac{5}{24} \cdot \sigma_b^{loc} \cdot \cot \varphi_{wd} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \left(2 \cdot \ln \frac{\sin \theta_k}{\cos \theta_k} - \theta_k \cdot \cot \theta_k + \theta_n \cdot \cot \theta_n \right). \quad (28)$$

При росте нагрузки от нуля до некоторого предельного значения нагрузки P_{max} , при которой происходит выдергивание арматурного стержня, наблюдаются упругие и пластические участки.

При достижении напряжений под штампом, равных R_b^{loc} , происходит разрушение заделки. Текущий уровень напряжений можно определить, зная длину пластического участка, которую можно определить так:

$$\beta \cdot L_{pl} = p_0 - \tanh[\beta \cdot (L - L_{pl})], \quad (29)$$

где β – коэффициент:

$$\beta = 2 \cdot \sqrt{\frac{(1 + \alpha_s \cdot \mu_s) \cdot \tau_0}{E \cdot d_s \cdot g^*}}; \quad (30)$$

$$p_0 = \frac{\sigma_{s0}}{\sigma^*}; \quad (31)$$

$$\sigma^* = \frac{E \cdot \beta \cdot g^*}{1 + \alpha_s \cdot \mu_s}. \quad (32)$$

Решать уравнение (29) в явном виде не представляется возможным, поэтому разложим в ряд функцию гиперболического тангенса:

$$\begin{aligned} \tanh(x) &= x - \frac{x^3}{3} + \frac{2 \cdot x^5}{15} - \frac{17 \cdot x^7}{315} + \dots = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^{2n} \cdot (2^{2n} - 1) \cdot B_{2n} \cdot x^{2n-1}}{(2n)!}, \quad |x| < \frac{\pi}{2}, \end{aligned} \quad (33)$$

где B_{2n} – числа Бернулли.

Для инженерной точности используем первые два члена разложения, отбросив члены более высокого порядка. Таким образом:

$$L_{pl} = L - \frac{\sqrt[3]{3 \cdot (\beta \cdot L - p_0)}}{\beta}. \quad (34)$$

Зная длину пластического участка, можно определить количество арматурных выступов, находящихся в пластической и упругой зонах:

$$n_{общ} = \frac{L}{s_r} + 1; \quad n_{pl} = \frac{L_{pl}}{s_r} + 1; \quad n_t = n_{общ} - n_{pl} = \frac{L - L_{pl}}{s_r}. \quad (35)$$

Определим усилие, а затем и давление, приходящиеся на один выступ в зоне перехода упругой зоны в пластическую из следующих соотношений:

$$n_{pl} \cdot N_r + 0,5 \cdot n_t \cdot N_r = \sigma_{s0} \cdot A_s; \quad (36)$$

$$N_r = \frac{\sigma_{s0} \cdot A_s}{n_{pl} + 0,5 \cdot n_t}; \quad (37)$$

$$\sigma_r = \frac{N_r}{A_r}. \quad (38)$$

Предельные деформации:

$$\Delta_b = \frac{c_r}{2 \cdot E_b} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \left(2 \cdot \ln \frac{\sin \theta_k}{\cos \theta_k} - \theta_k \cdot \cot \theta_k + \theta_n \cdot \cot \theta_n \right) \times \\ \times \frac{3 \cdot R_{bt} \cdot \left(\frac{s_r}{c_r} \cdot \cot \varphi_{wd} - 1 \right)}{4 - \frac{5}{6} \cdot \frac{1}{\pi \cdot (\sin \varphi_{wd})^2} \cdot \left(2 \cdot \ln \frac{\sin \theta_k}{\cos \theta_k} - \theta_k \cdot \cot \theta_k + \theta_n \cdot \cot \theta_n \right)}. \quad (39)$$

Для определения перемещения всей арматуры нужно воспользоваться формулой:

$$g_0 = \sum_{i=0}^{n_{pl}} g_{pl,i} + \sum_{j=n_{pl}}^L g_{l,j}. \quad (40)$$

В качестве примера рассмотрим бетонный цилиндр высотой H , в который на величину L заделан арматурный стержень диаметром d_s . Класс арматуры А400, класс бетона В25. Исходные данные для расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета параметров сцепления

№ задачи	Размеры сечения	Высота H	Длина заделки L	Класс арматуры	Диаметр d_s	Класс бетона
1	Ø250мм	300мм	200мм	А400	12	В25
2	Ø300мм	350мм	250мм	А400	14	В25
3	Ø350мм	400мм	300мм	А400	16	В25

Размеры периодического профиля, принятые по ГОСТ 5781, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Размеры профилей в мм

d_n	d	h	d_l	h_l	l	b	b_l	r
12	11,0	1,25	13,5	1,25	7	1,0	2,0	1,9
14	13,0	1,25	15,5	1,25	7	1,0	2,0	1,9
16	15,0	1,5	18	1,5	8	1,5	2,0	2,2

Механические характеристики арматуры и бетона приняты по СП 63.13330.

Рассмотрим характер изменения напряжений и деформаций по длине заделки в следующей задаче: арматура А400 Ø14 заделана в бетонный блок из бетона В25 высотой $H = 400$ мм на длину $L = 300$ мм. К концу арматуры прикладывается усилие $\sigma_{s0} = 200$ МПа.

3. Результаты и обсуждение

В результате расчета установлено, что нарушение сцепления на начальных этапах загрузки имеет линейный характер. Из-за проявления пластических свойств бетона и образования клина уплотнения рост напряжений замедляется. При данных исходных параметрах сцепление арматуры с бетоном нарушается быстрее, чем наступает текучесть арматуры.

В результате расчета получена эпюра распределения напряжений и деформаций по длине заделки (рис.4). Для сравнения указана эпюра распределения напряжений и деформаций, полученная в эксперименте М.М. Холмянского [4].

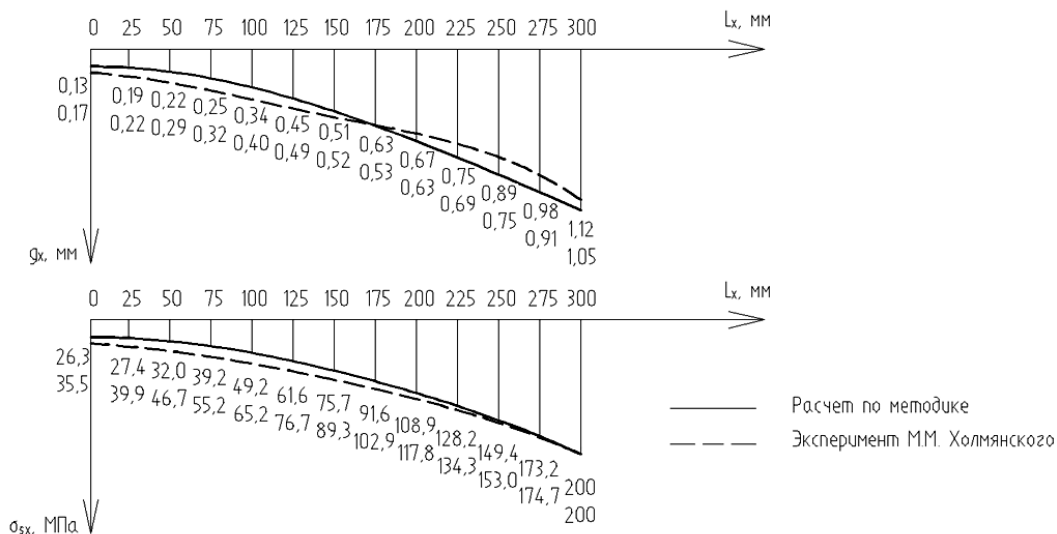


Рис.4. Эпюры распределения напряжений и деформаций по длине заделки (иллюстрация авторов)
 Fig. 4. Diagrams of the distribution of stresses and deformations along the length of the embedment (illustration by the authors)

Сравнение полученных эпюр производится по формуле:

$$\delta = \frac{\Delta_{b,теор}}{\Delta_{b,холм}}, \tag{41}$$

и показывает, во сколько раз значение, полученное по разработанной методике, расходится со значениями по теории Холмянского (см. табл. 3).

Таблица 3

Сравнение эпюр распределения напряжений и деформаций

$L_x, мм$	Перемещения $\Delta_b, мм$			Напряжения $\sigma_{sx}, МПа$		
	Теория	Холмянский	Сравнение	Теория	Холмянский	Сравнение
0	0,13	0,17	0,76	26,3	35,5	0,74
25	0,19	0,22	0,86	27,4	39,9	0,69
50	0,22	0,29	0,76	32,0	46,7	0,68
75	0,25	0,32	0,78	39,2	55,2	0,71
100	0,34	0,40	0,85	49,2	65,2	0,75
125	0,45	0,49	0,92	61,6	76,7	0,80
150	0,51	0,52	0,98	75,7	89,3	0,85
175	0,63	0,53	1,19	91,6	102,9	0,89
200	0,67	0,63	1,06	108,9	117,8	0,92
225	0,75	0,69	1,09	128,2	134,3	0,95
250	0,89	0,75	1,19	149,4	153,0	0,98
275	0,98	0,91	1,08	173,2	174,7	0,99
300	1,12	1,05	1,07	200,0	200,0	1,0

В результате расчета задачи по вышеуказанному алгоритму получены следующие значения для параметров: σ_{s0} – напряжение на свободном конце арматурного стержня; L_{pl} – длина пластического участка; σ_{1c} – напряжение сжатия в бетоне под клином;

Δ_b – перемещение арматурного стержня.

При этом, как правило, при 10-15 мм происходит полное разрушение сцепления арматуры с бетоном.

Результаты согласуются с результатами теоретических и опытных экспериментов других ученых. Метод позволил проследить за изменениями перемещений на всем этапе нагружений.

4. Заключение

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. На основе модели раскалывания А.С. Залесова для балок-стенок разработана новая теоретическая модель для определения перемещений арматуры относительно бетона в задаче о вытягивании арматуры из бетонного блока.
2. Используя методы статический и кинематический способы метода предельного равновесия, определено перемещение клина под арматурным выступом.
3. Определено значение предельных деформаций арматурного стержня, при которых происходит разрушение заделки.
4. Разработанные расчетная модель и методы расчета позволяют осуществлять оценку параметров сцепления не только в предельной стадии, но и на каждом этапе нагружения.
5. Теоретические результаты хорошо согласуются с опытными данными других исследователей.

Список литературы / References

1. Анализ прочности постнапряженных железобетонных конструкций без сцепления арматуры с бетоном / А. Н. Топилин, И. И. Гнеушев, Е. А. Лучкин, У. Кео // Инновации и инвестиции. – 2021. – № 3. – С. 244-248. – EDNARVCRA [Topilin A.N., Gneushev I.I., Luchkin E.A., Keo W. Analysis of the strength of prestressed reinforced concrete structures without adhesion of reinforcement to concrete // Innovations and investments. - 2021. - No. 3. - P. 244-248. – EDN ARVKRA].
2. Ванус, Д. С. Исследование влияния сцепления арматуры с бетоном на прочность изгибаемых элементов в стадии эксплуатации / Д. С. Ванус, А. Д. Борисов // Наука и бизнес: пути развития. – 2021. – № 11(125). – С. 124-128. – EDNMJGKPF [Vanus, D.S., Borisov A.D. Study of the influence of adhesion of reinforcement with concrete on the strength of bending elements in the operation stage / D.S. Vanus, A.D. Borisov // Science and business: ways of development. - 2021. - No. 11 (125). - P. 124-128. – EDN MJGKPF].
3. Стахов, Д. О. Обзор и сравнение методов исследования характеристик сцепления арматуры с бетоном / Д. О. Стахов // Молодой ученый. – 2021. – № 23(365). – С. 62-68. – EDNVWFIKC [Stakhov, D. O. Review and comparison of methods for studying the characteristics of adhesion of reinforcement with concrete / D. O. Stakhov // Young scientist. - 2021. - No. 23 (365). - P. 62-68. – EDN VWFIKC].
4. Холмянский, М.М. Контакт арматуры с бетоном / М.М. Холмянский. – М. : Стройиздат, 1981. – 184с [Kholmyansky, M.M. Contact of reinforcement with concrete / M.M. Kholmyansky. - M. : Stroyizdat, 1981. – 184 P].
5. СЕВ-FIP Model Code 1990. – Comite Euro-International du Beton, 1990. – 455p.
6. Xiaotong Yu, Samanta Robuschi, Ignasi Fernandez, Karin Lundgren, Numerical assessment of bond-slip relationships for naturally corroded plain reinforcement bars in concrete beams, Engineering Structures, Volume 239, 2021, 112309, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112309>.
7. Charles Rockson, Kishoare Tamanna, M. Shahria Alam, Ahmad Rteil, Effect of rebar embedment length on the bond behavior of commercially produced recycled concrete using beam-end specimens, Construction and Building Materials, Volume 286, 2021, 122957, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122957>.
8. Mirsayapov Il.T. Detection of Stress Concentration Regiones in Cyclic Loading by the Heat Monitoring Method/ Il.T. Mirsayapov//ISSN 0025-6544, Mechanics of Solids. C Allerton Press, Inc., 2010 – New York: Springer Link, 2010, Vol 45, №1. – pp. 133-139.
9. Xiaoyong Lv, Zhiwu Yu, Zhi Shan, Bond stress-slip model for rebar-concrete interface under monotonic and cyclic loading, Structures, Volume 34, 2021, Pages 498-506, ISSN 2352-0124, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.093>.
10. Mirsayapov, I. Research of the stress-strain state of a reinforced concrete beamless floor / I. Mirsayapov, E. Khorkov, R. Minzianov // E3S Web of Conferences Volume 274 (2021) : 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021), Kazan, 21–28 апреля 2021 года. – France: EDP Sciences, 2021. – P. 3031. – DOI 10.1051/e3sconf/202127403031. – EDN BOCMUJ.

11. 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 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 3. – С. 62-75. – DOI 10.15593/perm.mech/2016.3.04. – EDN WRQTFF [Kashevarova, G. G. Calculation and experimental study of the process of destruction of adhesion bonds when a rigid reinforcement bar is pressed into concrete / G. G. Kashevarova, A. S. Martirosyan, V. I. Travush // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics. - 2016. - No. 3. - P. 62-75. – DOI 10.15593/perm.mech/2016.3.04. – EDN WRQTFF].
12. Моделирование прочности сцепления арматуры с бетоном на основе искусственной нейронной сети / А. Н. Николокин, В. П. Ярцев, Б. А. Бондарев, А. О. Корнеева // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2019. – № 2(54). – С. 11-20. – DOI 10.25987/VSTU.2019.54.2.001. – EDNISNDAO [Modeling of adhesion strength of reinforcement with concrete based on an artificial neural network / A. N. Nikoluykin, V. P. Yartsev, B. A. Bondarev, A. O. Korneeva // Scientific Journal of Construction and Architecture. - 2019. - No. 2 (54). - P. 11-20. – DOI 10.25987/VSTU.2019.54.2.001. – EDN ISNDAO].
13. Назаренко, П. П. Приближенные решения задач сцепления арматуры с бетоном в призматических элементах / П. П. Назаренко // Вестник транспорта Поволжья. – 2018. – № 3(69). – С. 38-45. – EDN YASFWH [Nazarenko, P. P. Approximate solutions of problems of adhesion of reinforcement with concrete in prismatic elements / P. P. Nazarenko // Bulletin of transport of the Volga region. - 2018. - No. 3 (69). – P. 38-45. – EDN YASFWH].
14. Juliya Mironova. Structural solution of the horizontal joint of floor slabs in girderless frame // 2 International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE –2021). 2021. Vol. 274 P.1–10. DOI: 10.1051/e3sconf/202127403017.
15. George Pantazopoulos, Ioannis Pressas, Athanasios Vazdirvanidis, Fatigue failure analysis of a Ø14 B500C steel rebar: Metallurgical evaluation and numerical simulation, Engineering Failure Analysis, Volume 101, 2019, Pages 180-192, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.03.016>.
16. Mahesh, Prashant Rawat, K.K. Singh, P.K. Singh, Comparison of steel and fiber-reinforced polymer rebars for mining applications: A numerical approach, Materials Today: Proceedings, Volume 33, Part 8, 2020, Pages 5041-5045, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.840>.
17. Mirsayapov, I. T. Endurance of Reinforced Concrete Beams with Small Shear Spans / I. T. Mirsayapov // Proceedings of EECE 2019 : Energy, Environmental and Construction Engineering, St. Petersburg, Russia, 19–20 ноября 2019 года. – Cham: Springer, 2020. – P. 763-775. – DOI 10.1007/978-3-030-42351-3_67. – EDN BTZTPP.
18. Мирсаяпов, И. Т. Основы повышения эффективности применения высокопрочных бетонов в конструкциях промышленных зданий при действии поперечных сил / И. Т. Мирсаяпов, А. Г. Тамразян // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2017. – № 1(989). – С. 54-59. – EDNXIKCZL [Mirsayapov, I. T. Fundamentals of increasing the efficiency of high-strength concretes in the structures of industrial buildings under the action of transverse forces / I. T. Mirsayapov, A. G. Tamrazyan // BST: Bulletin of construction equipment. - 2017. - No. 1 (989). - P. 54-59. – EDN XIKCZL].
19. Mirsayapov, I. Modified trilinear stress-strain diagram of concrete designed for calculation of beams with fiberglass rebar / I. Mirsayapov, G. Apkhadze // IOP conference series : Materials Science and Engineering, Kazan, 29 апреля – 15 2020 года. – Kazan, Russia: IOP Science, 2020. – P. 012079. – DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012079. – EDN XWJHRE.

Информация об авторах

Мирсаяпов Илшат Талгатович, доктор технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: mirsayapovit@mail.ru

Минзянов Рустам Ильдарович, ассистент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: minzianovrustam@gmail.com

Information about the authors

Ishat T. Mirsayapov, Doctor of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: mirsayapovit@mail.ru

Rustam I. Minzyanov, assistant, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: minzianovrustam@gmail.com