

УДК 624.012.46.072.232

НАПРЯЖЕНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ ПО ДЛИНЕ ЗАДЕЛКИ АРМАТУРЫ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПРОФИЛЕЙ С БЕТОНОМ

А.А. ХОТЬКО, И.И. ЧЕТВЕРТКОВ
(Полоцкий государственный университет)

В Республике Беларусь используется арматура с отличающимися геометрическими параметрами профилей: арматура с «серповидным» профилем, с «винтовым» профилем. Показано, что действующая методика расчета анкеровки арматуры по СНБ 5.03.01 не учитывает геометрические параметры профиля арматуры. один из основных факторов, влияющих на сцепление арматуры с бетоном.

Совместная работа арматуры и бетона как критерий надежности железобетонных конструкций возможна только при наличии надежного сцепления между ними. В железобетонном элементе сцепление выполняет функции анкеровки арматуры и вовлечения в работу бетона, а значит, будет влиять на анкеровку арматуры на свободных опорах балок, анкеровку арматуры в местах теоретического обрыва стержней, длину стыков арматуры внахлестку, прочность заделки анкеров и ширину раскрытия трещин [1, с. 13]. Следовательно, надежность анкеровки арматуры периодического профиля будет зависеть от тех же факторов, которые определяют ее сцепление с бетоном.

Качество сцепления зависит от множества факторов самого разнообразного характера. Периодический профиль арматуры - один из основных факторов, влияющих на сцепление. Несмотря на это действующая нормативная методика расчета анкеровки не учитывает геометрические параметры профиля арматуры.

Методика расчета анкеровки арматуры в железобетонных конструкциях, приведенная в СНиП 2.03.01-84* разработывалась в СССР применительно к арматуре «кольцевого» периодического профиля по ГОСТ 5781. Согласно СНиП 2.03.01-84* величина анкеровки вычисляется по эмпирической формуле и зависит от прочности бетона, но не предполагает зависимости от параметров профиля арматуры [2, с. 92]. Между тем в настоящее время на строительном рынке Республики Беларусь появляется арматура с отличающимися геометрическими параметрами профилей: арматура с «серповидным» профилем, с «винтовым» профилем.

Расчет анкеровки по методике СНБ 5.03.01 принципиально не отличается от методик расчета некоторых других стран и построен более логично и физически обоснованно, чем в методике СНиП 2.03.01-84*. Расчет анкеровки производится с использованием такого основного параметра, характеризующего сцепление, как напряжение сцепления [3, с. 109]. Базовая длина анкеровки ненапрягаемых стержней l_b согласно СНБ 5.03.01 рассчитывается по формуле:

$$l_b = \left(\frac{\phi}{4}\right) \left(\frac{f_{yd}}{f_{bd}}\right), \quad (1)$$

где f_{yd} – расчетное сопротивление арматуры растяжению; f_{bd} – среднее значение предельного напряжения сцепления по контакту арматуры с бетоном.

Однако сама величина f_{bd} вычисляется по эмпирической формуле, не зависящей от параметров профиля арматуры:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd}, \quad (2)$$

где f_{ctd} – расчетное сопротивление бетона растяжению; η_1 – коэффициент, учитывающий влияние условий сцепления и положение стержней при бетонировании; η_2 – коэффициент, учитывающий влияние диаметра стержня.

Опытные данные, полученные при испытании железобетонных элементов с арматурой различного периодического профиля, не соответствуют расчетным данным, полученным не только по методике СНиП 2.03.01-84*, но и по методике СНБ 5.03.01 [4, с. 185].

Решить задачу определения напряженно-деформированного состояния железобетонного элемента на участке активного сцепления (участка, на котором осуществляется передача усилий с арматуры на бетон), и в частности распределения контактных напряжений сцепления, призвана техническая теория сцепления, разработанная ММ. Холмянским. Для определения силовых и геометрических величин, оп-

ределяющих напряженно-деформированное состояние участка активного сцепления, М.М. Холмянский предлагает принимать ряд упрощающих допущений:

- принимается модель «арматура - контактный слой - оболочка». Сущность допущения состоит в выделении контактного слоя, к которому отнесен бетон, находящийся в зоне высоких напряжений. Считается, что деструктивные процессы, в частности контактные трещины, развиваются в пределах слоя небольшой толщины, близкой к шагу профилировки;

- для деформаций оболочки принимается предположение об упругости и справедливости гипотезы плоских сечений;

- в качестве характеристик контакта принимаются «условные взаимные смещения», определяемые как перемещения арматуры относительно бетонной оболочки;

- допущение о неизменности соотношения между напряжением сцепления T_{bond} и смещением (g) по длине зон контакта, из которого и вытекает основной закон сцепления [5, с. 8].

Значительное количество исследований по развитию технической теории сцепления, разработанной М.М. Холмянским, открыли большие возможности определения напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов. Однако допущения о равномерном распределении напряжений и удлинений в поперечном сечении бетона, о малости и упругости последних, а также замена истинного смещения арматуры относительно бетона условными приводят к тому, что соответствующие теории не дают в общем случае правильного представления о деформациях на участке активного сцепления. Наличие сосредоточенного поперечного давления и прежде всего наличие развивающихся вдоль арматуры трещин с шириной раскрытия более 0,2 - 0,3 мм можно отнести к ограничениям в применении данного закона сцепления.

Принципиально другое предложение по построению теории сцепления развил в своих работах А.А. Оатул Гб, с. 61. Им был предложен так называемый дифференцированный закон сцепления:

$$\tau_{bond} = f(x; y), \quad (3)$$

где y – удлинение арматуры в сечении x .

Каждому значению x закона соответствует одна из кривых семейства, показывающих зависимость напряжений сцепления τ_{bond} от удлинений арматуры y . Вид каждой из кривых дифференциального закона сцепления определяется уравнением:

$$\tau_{bond} = y \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (4)$$

где α – параметр, определяемый экспериментальным путем.

Однако знания одного лишь дифференциального закона сцепления недостаточно для построения теории сцепления. Для того чтобы судить о деформациях бетона, не вводя допущения об упругости и справедливости гипотезы плоских сечений, А.А. Оатул предлагает использование дополнительных физических зависимостей, устанавливаемых опытным путем:

$$\begin{aligned} g &= g(x; y) \\ \Delta_{ca} &= \Delta_{ca}(x; y) \\ \Delta_{cc} &= \Delta_{cc}(x; y), \end{aligned} \quad (5)$$

где Δ_{ca} – деформации бетона контактного слоя; Δ_{cc} – деформации бетонной оболочки.

Система всех указанных физических зависимостей была названа им развернутым (или полным) законом сцепления.

Теория, развитая в работах О.А. Оатула, устраняет многие недостатки, присущие технической теории сцепления, однако применение развернутого закона сцепления требует проведения огромного количества экспериментов. Установлению некоторых зависимостей препятствуют технические сложности. Так, для определения зависимости $\Delta_{ca} = \Delta_{ca}(x; y)$ необходимо проведение измерений деформаций контактного слоя, что затруднительно ввиду неопределенности его величины.

Попытка построить теорию, свободную от этих недостатков, принадлежит Н.И. Карпенко [7, с. 342]. Им применена модель, позволяющая прямым образом учитывать наличие контактных трещин. В его работе впервые предпринята попытка практически полного моделирования контакта арматуры и бетона, что существенно важно. Условные взаимные смещения в модели рассматриваются Н.И. Карпенко как перемещения концов консольных элементов, на которые трещины разделяют бетон контактного слоя.

Его модель позволяет с единых позиций рассмотреть вопросы определения осевых смещений арматуры относительно бетона, раскалывания бетона арматурой, а также характер искривления (депланации) бетона вокруг арматурного стержня, которые обычно изучались разрозненно.

В модель сцепления входят: учет влияния местного смятия бетона под выступами арматуры (в зависимости от шага профилировки и высоты поперечных выступов) на смещение арматуры относительно бетона; формулировка условий, определяющих образование и развитие различного рода контактных трещин; моделирование процесса деформирования и разрушения бетона конических оболочек с учетом перехода на ниспадающую ветвь; учет влияния деформаций бетона в зоне контактных трещин на смещение арматуры относительно границы указанной зоны. Отдельно стоит задача по определению взаимодействия бетона контактной зоны с прилегающим к ней бетоном конструкции.

В связи с этим контактная зона условно разделена на две зоны: зону I, включающую в себя бетонные консоли, непосредственно находящиеся под выступами арматуры, и следующую за бетонными выступами зону II - развития конических и радиальных трещин. За зоной конических трещин следует сплошная бетонная оболочка или обойма III, описание которой дано автором для бетонных призм с центрально расположенными стержнями при нагружении их по схеме выдергивания арматуры из бетона. Расчет производится методом конечных элементов.

Применение модели Н.И. Карпенко в решении задач сцепления с использованием ЭВМ, по нашему мнению, могло бы привести к наилучшим результатам. Для этого необходимо учесть некоторые особенности взаимодействия с бетоном арматуры с различными видами периодического профиля. Модель Н.И. Карпенко предусматривает некоторую симметричность, по периметру арматурного стержня, наиболее применимую для арматуры «кольцевого» профиля (с поперечными ребрами постоянной высоты). Арматура с «серповидным» и «винтовым» профилем имеет поперечные выступы переменной высоты. Легко заметить, что у такой арматуры, в отличие от арматуры с «кольцевым» профилем, в разных сечениях по периметру стержня будет изменяться такой важный критерий, как отношение высоты поперечных выступов к их шагу h_b/t . Согласно Г. Рэму [8, с. 28], это может привести к различным механизмам разрушения бетона у выступов по периметру стержня.

Предложения других авторов по построению теории сцепления арматуры с бетоном либо изменяют некоторые положения вышерассмотренных теорий, либо приводят к значительным трудностям в его использовании, заметно не устраняя недостатков, к числу главных из которых следует отнести неполное отражение особенностей развития контактных трещин и раздельный учет напряжений сцепления и поперечного давления арматуры на бетон или вообще не учит поперечного давления.

Одним из ключевых моментов построения расчетной модели являются экспериментальные исследования, отражающие влияние варьируемых факторов на напряженно-деформированное состояние элемента. Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию влияния профиля арматуры на сцепление ее с бетоном, авторами в основном раскрывался вопрос влияния профиля на прочность сцепления. Очень скудны данные по влиянию профиля арматуры на деформативность сцепления. Все труды, посвященные данной тематике, раскрыты только применительно к так называемым граничным условиям. То есть, как правило, в процессе эксперимента контролировали смещения арматуры относительно бетона либо на нагруженном, либо на свободном конце стержня.

Для разработки необходимой расчетной модели требуются опытные данные по влиянию профиля арматуры на напряженно-деформированное состояние элемента по всей длине анкеровки. Это требует проведения дополнительных экспериментов, целью которых должно стать максимальное выявление характеристик напряженного и деформированного состояния железобетонного элемента, с арматурой разных профилей, по длине участка активного сцепления.

Целью данной работы ставилось определение влияния профиля арматуры на напряжения сцепления арматуры с различными геометрическими параметрами с бетоном по длине анкеровки.

Для решения данной задачи были проведены испытания на вытягивание арматурных стержней из бетонных кубов согласно рекомендациям ЕКБ/ФИП [9, с. 66]. По силовой схеме испытания представляют собой «вытягивание арматуры из бетона»

Работа выполнялась на основе сравнительных испытаний на выдергивание стержневой арматурной стали $\varnothing 25$ мм класса А500, с различными видами периодического профиля («кольцевой» по ГОСТ 5781-82 и «серповидный» по ГОСТ 10884-94).

Опытный образец для испытания на сцепление представлял собой центрально армированную бетонную призму с размерами поперечного сечения 300×300 мм и высотой 300 мм. При этом в одной части заделки (200 мм) арматура находилась в контакте с бетоном, а в другой части (100 мм), сцепление искусственно исключалось (стержень заключался в изолирующий материал).

Единственно возможным на данный момент способом определения напряжений сцепления τ_{bond} по длине анкеровки является определение деформаций арматуры по длине ее заделки. Определение деформаций арматуры путем наклеивания тензодатчиков на ее поверхность в нашем случае имеет свои трудности:

- датчики с выводными проводами нарушают естественность профиля арматуры;

- при значительном смещении арматуры относительно бетона, за счет трения, датчики могут быть сорваны с поверхности;
- выводящие провода могут стать дополнительными концентраторами напряжений, что может привести к более раннему и интенсивному развитию трещин.

Наклейка тензодатчиков производилась в пазы, выточенные на половинках арматуры, предварительно разрезанной вдоль (рис. 1). В этих же пазах размещались и выводящие провода, после чего половинки склеивались и прихватывались сваркой.

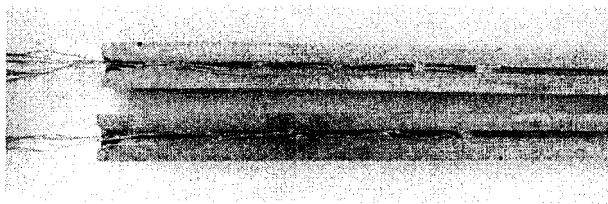


Рис. 1. Размещение тензодатчиков и выводящих проводов в пазах арматуры

Формование образцов производилось в вертикальном положении (для арматуры). Для построения диаграммы растяжения исследуемой арматуры были испытаны образцы арматурных стержней. По результатам испытаний построены диаграммы растяжения. Для определения прочностных и деформативных характеристик бетона изготовлены и испытаны кубы с размерами ребер 100 x 100 x 100 мм в соответствии с ГОСТ 1080-78 «Бетоны. Методы определения прочности на сжатие и растяжение». Кубы при бетонировании и твердении находились в тех же условиях, что и основные образцы. Призменная прочность бетона по результатам испытаний составила 17,5 МПа.

Испытания на вытягивание арматурных стержней 025 мм из бетонных кубов проводились на разрывной машине Р50. Для обеспечения надежного крепления арматуры в захватах со стороны загружаемого конца предусматривался выпуск арматуры из бетона. Бетонный образец фиксировался при помощи системы траверс, 4 тяжей и зажимных устройств к подвижному захвату разрывной машины так, чтобы свободный конец арматуры проходил между нижними фиксирующими траверсами, и закреплялся в неподвижном захвате разрывной машины (рис. 2). Производилось центрирование образца. Опираание образца на траверсу - насухо, через стальную опорную пластину с центральным отверстием диаметром 175 мм. Это обеспечивает практически полное свободное проявление деформаций нижних горизонтальных сечений бетона для всех испытываемых образцов, т.е. ставит их в равные условия по этому фактору. Как показывают исследования, при меньших размерах центрального отверстия (менее 7-ми диаметров испытываемой арматуры) ограниченное проявление деформаций (в различной степени для разных образцов) может влиять на полученные результаты.

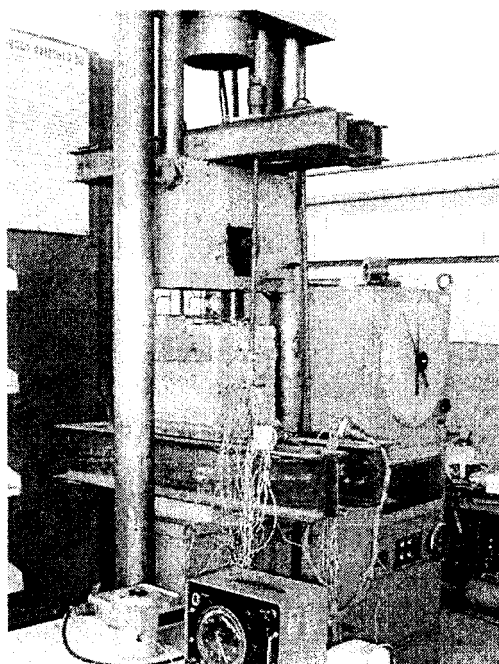


Рис. 2. Общий вид испытательной установки

В процессе испытаний контролировали максимальное усилие, при котором сцепление не нарушено, и относительные деформации арматуры по длине заделки. По найденным относительным деформациям и диаграмме растяжения арматуры определяли напряжения в арматуре по длине анкеровки стержней (рис. 3).

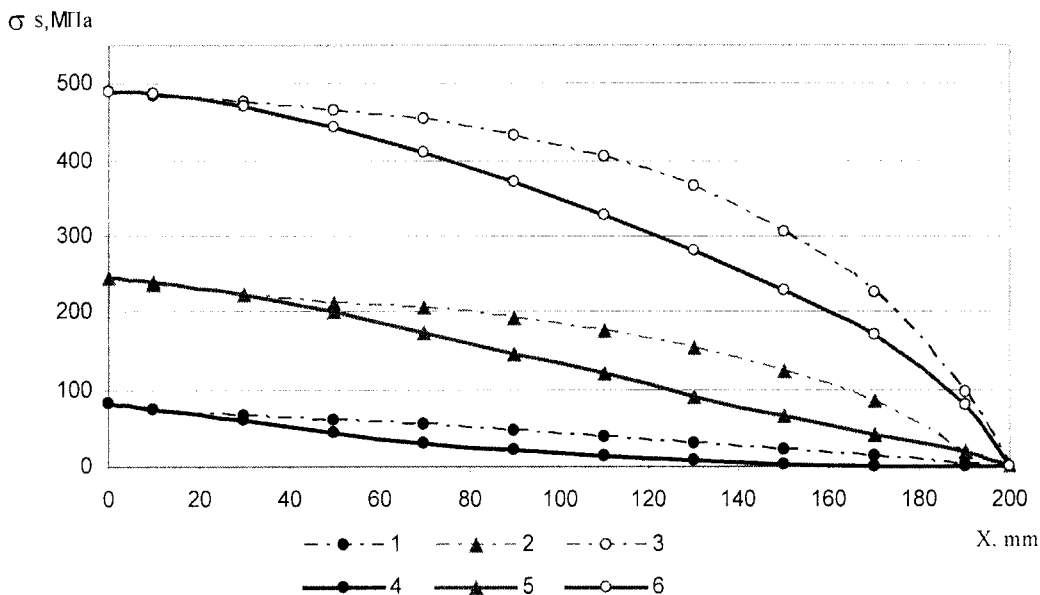


Рис. 3. Напряжения в арматуре по длине анкеровки:

1 – при нагрузке $N = 40$ кН, арматура с «серповидным» профилем; 2 – при нагрузке $N = 120$ кН, арматура с «серповидным» профилем; 3 – при нагрузке $N = 240$ кН, арматура с «серповидным» профилем; 4 – при нагрузке $N = 40$ кН, арматура с «кольцевым» профилем; 5 – при нагрузке $N = 120$ кН, арматура с «кольцевым» профилем; 6 – при нагрузке $N = 240$ кН, арматура с «кольцевым» профилем

При этом нагрузка $N = 240$ кН оказалась предельной, при которой сцепление еще не нарушено, как для случая с арматурой «серповидного», так и для случая с арматурой «кольцевого» профиля. Значения напряжений сцепления в различных точках по длине участка активного сцепления определяли по известной формуле (рис. 4):

$$\tau_{bond} = \frac{A_s}{U_s} \cdot \frac{d\sigma_s}{dx}, \tag{6}$$

где A_s – площадь арматуры; U_s – периметр арматуры; $d\sigma_s$ – изменение напряжения на участке dx ; dx – расстояние между двумя соседними точками.

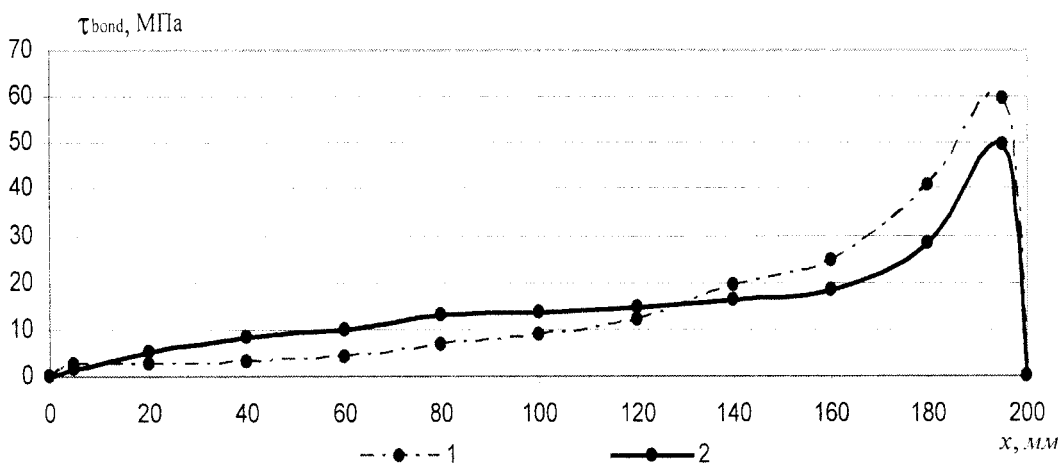


Рис. 4. Напряжения сцепления по длине анкеровки арматуры с «серповидным» (1) и «кольцевым» (2) профилем при нагрузке 240 кН

В результате проведенных испытаний выявлен различный характер распределения нормальных напряжений в арматуре и напряжений сцепления по длине анкеровки арматуры с «серповидным» и «кольцевым» профилями.

Напряжения в арматуре с «серповидным» профилем по ГОСТ 10884-94 распределялись более равномерно по длине заделки, чем в случае с арматурой с «кольцевым» профилем по ГОСТ 5781-82. При одинаковой предельной нагрузке, при которой сцепление еще не нарушалось, значение максимального напряжения сцепления с бетоном арматуры с «кольцевым» профилем равнялось ≈ 50 МПа, с «серповидным» профилем ≈ 60 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балатьев П. К. Анкеровка арматуры в бетоне // Сб. тр. - М., 1969. - 134 с.
2. Мулин Н. М. Стержневая арматура железобетонных конструкций. - М.: Стройиздат, 1974. - 232 с.
3. СНБ 5.03.01-02. - Мн., 2003. - 139 с.
4. Али Абдель Захир Эль-Сайед Халил. Анкеровка продольной ненапрягаемой арматуры серповидного профиля на свободных опорах балок: Автореф. дис... канд. техн. наук. - М., 1992. - 24 с.
5. Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном. - М.: Стройиздат, 1981. - 184 с.
6. Оатул А.А. Основы теории сцепления арматуры с бетоном // Исследования по бетону и железобетону: Сб. тр. № 46. - Челябинск, 1967. - С. 6 - 26.
7. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. - М.: Стройиздат, 1996. - 414 с.
8. Rehm G. Uber die Grundlagen des Verbundes zwischen stahl und beton // Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton. H138. 1961 - 169 s.
9. Рекомендации РИЛЕМ/ЕКБ/ФИП РС 6. Испытание на сцепление арматурной стали. Ч. 2. Испытания на вытягивание. - М., 1984. - 284 с.
10. СНИП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции. Госстрой СССР. - М., 1989. - 81 с.
11. Терин В.Д., Хотько А.А. Сцепление с бетоном ненапрягаемой арматуры различных видов профилей. // Совершенствование железобетонных конструкций, оценка их состояния и усиление: Сб. науч. тр. // Под ред. Т.М. Пецольда. - Мн., 2001. - С. 188 - 195.