Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2025, Том 17, № 2 / 2025, Vol. 17, Iss. 2 https://esj.today/issue-2-2025.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/23SAVN225.pdf

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Стахов, Д. О. Влияние толщины защитного слоя на прочность сцепления арматуры с бетоном / Стахов Д. О. // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 2. — URL: https://esj.today/PDF/23SAVN225.pdf.

For citation:
Stakhov D.O. Effect of cover thickness on bond strength rebars to concrete. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(2): 23SAVN225. Available at: https://esj.today/PDF/23SAVN225.pdf. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 624.012.45

Стахов Даниил Олегович
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия
Аспирант
E-mail: daniil.stahoff@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1135450

Влияние толщины защитного слоя на прочность сцепления арматуры с бетоном

Аннотация. Толщина защитного слоя бетона в зоне анкеровки реальных конструкций часто превышает значение своего конструктивного минимума. Для таких случаев ряд зарубежных норм проектирования допускает увеличение расчетной прочности сцепления и соответственно сокращение длины анкеровки. Российские нормы пока не предоставляют такой возможности, что отчасти может объясняться нераспространением в практике отечественных исследований сцепления методик испытания, которые позволяют корректно оценивать влияние рассматриваемого фактора. Тем не менее всё же обнаруживаются результаты единичных исследований, свидетельствующих о положительном влиянии повышенной толщины защитного слоя на прочность сцепления, однако они получены на образцах, не воспроизводящих напряженно-деформированное состояния реальных конструкций, либо не рассматривают его свободно от влияния других факторов. Целью работы стала проверка наличия и оценка существенности оговоренного влияния в эксперименте, лишенном вышеуказанных недостатков, что было реализовано при использовании адаптированной автором методики испытания образца конца балки. По результатам экспериментального исследования серии из трех пар образцов-близнецов было получено, что при увеличении толщины защитного слоя от 1 до 3 диаметров испытуемого стержня прочность сцепления возросла на 46 %, а нагрузка, при которой продольная трещина выходила на поверхность — на 73 %. Наблюдаемый эффект объясняется тем, что увеличение толщины защитного слоя способствует лучшему восприятию кольцевых растягивающих напряжений. Это затрудняет или вовсе исключает образование продольных трещин, препятствует оттеснению бетона от стержня, что в результате приближает прочность сцеплению к своему максимальному значению, реализующемуся при разрушении от среза и смятия бетона между поперечными ребрами арматуры.

Ключевые слова: сцепление; анкеровка; длина анкеровки; защитный слой бетона; образец конца балки; эксперимент; железобетон

Введение

Нормы проектирования железобетонных конструкций [1] устанавливают минимально допустимые значения толщины защитного слоя бетона, диктуемые главным образом стремлением защитить арматуру от коррозии и обеспечить её должную совместную работу с бетоном. В практическом проектировании фактически принятые значения толщины защитного слоя часто существенно превышают свой конструктивный минимум. Это может быть вызвано необходимостью достижения повышенной огнестойкости или коррозионной стойкости, размещением насыщенного армирования, а также просто массивностью элемента конструкции, в который производится анкеровка. Примером может служить случай заделки арматуры решетки в вут фермы, арматуры ригеля в более массивную колонну или же арматуры самой колонны в подколонник. А в ряде случаев, например, при заделке арматуры стен в фундаментную плиту, анкеровка производится вовсе в условно неограниченный массив, где радиус вовлекаемого в совместную работу бетона многократно меньше расстояния до грани конструкции.

Согласно положениям ряда зарубежных норм проектирования такие условия сцепления по сравнению с базовыми рассматриваются как более благоприятные, что выражается в повышении расчетной прочности сцепления пропорционально толщине защитного слоя и соответственно в сокращении длины анкеровки [1; 2].

Отечественная строительная наука не накопила достаточно теоретических и экспериментальных исследований, подтверждающих это влияние для включения в нормы проектирования соответствующих положений. Текущее состояние вопроса обосновывается во многом тем, что основным источником экспериментальных данных о сцеплении арматуры с бетоном в нашей стране остается метод вытягивания арматуры из призм, опертых торцом. В таких опытных образцах толщина защитного слоя принимается либо равной 4,5 диаметрам стержня, как этого требует методика RILEM RC6 [2], либо подбирается из условия, чтобы разрушение анкеровки происходило без образования сквозных продольных трещин и раскалывания образца. Иными словами, в испытаниях, моделируется только случай заделки арматуры в неограниченный массив бетона. Несмотря на это, всё-таки обнаруживается ряд работ, где рассмотрено влияние толщины защитного слоя.

Алиев Ш.А. [3] испытывал опертые торцом призмы 80(b)×200(h)×160(l) мм из бетона прочностью 200 кг/см^2, армированные эксцентрично расположенным стержнем периодического профиля диаметром 14 мм из стали 30ХГ2С (А-IV). При увеличении толщины защитного слоя от 22 до 37 мм был получен рост прочности сцепления на 16 %, а рост усилия, при котором продольные трещины достигали поверхность образца, составил 150 %. Особенности напряженно-деформированного состояния призм, опертых торцом, тонкостенность использованных образцов, ограничивают универсальность этих результатов и их применимость к реальным конструкциям.

Гольдфайн Б.С. и др. [4] исследовали влияние толщины защитного слоя на жесткость сцепления, которая, как правило, прямо связана с его прочностью. При выдергивании арматурных стержней, замоноличенных в бетонном массиве при разном удалении от грани, был обнаружен «пристеночный эффект», который выражался, напротив, в повышении жесткости сцепления при достаточно малых толщинах защитного слоя порядка 10–30 мм, что по предположению авторов связано с изменением соотношения крупного мелкого заполнителя у грани образца.

---

[1] СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.

[2] RILEM/CEB/FIP RECOMMENDATION RC6. Bond test reinforcing steel 2. Pull-out test.

Наиболее представительными являются результаты, полученные Залесовым А.С. и др. [5]. Авторами исследовались опорные участки железобетонных балок 150(*b*)×300(*h*)×2600(*l*) мм, армированных стержневой напрягаемой арматурой диаметром 16 мм класса Ат-V. В результате при увеличении толщины защитного слоя от 16 до 48 мм было обнаружено повышение напряжений в арматуре при нарушении анкеровки на 28 %. Однако следует заметить, что в оговоренных испытаниях бетон зоны анкеровки не был изолирован от влияния поперечного армирования и поперечных сжимающих напряжений на опоре. Кроме того, особенности анкеровки предварительно напряженной арматуры, также накладывают некоторые ограничения на использование этих результатов.

Как видно, имеющиеся немногочисленные исследования разнятся как по схемам испытаний, так и по результатам. Все они выполнены с применением арматуры кольцевого периодического профиля, которая ныне преимущественно вытеснена арматурой серповидного профиля и имеет свою специфику совместной работы с бетоном.

Таким образом, целью настоящей работы стало экспериментально проверить наличие и оценить существенность влияния толщины защитного слоя на прочность сцепления арматуры с бетоном свободно от влияния других факторов на образцах, воспроизводящих напряженно-деформированное (НДС) состояние реальных конструкций и изготовленных из применяемых в современности материалов.

1. Материалы и методы

По результатам анализа мировой практики экспериментальных исследований сцепления [6] была выбрана методика испытания образца конца балки[3] (рис. 1). Главным преимуществом данных образцов является приближенность к реальным конструкциям по конструктивному решению и НДС бетона зоны анкеровки.

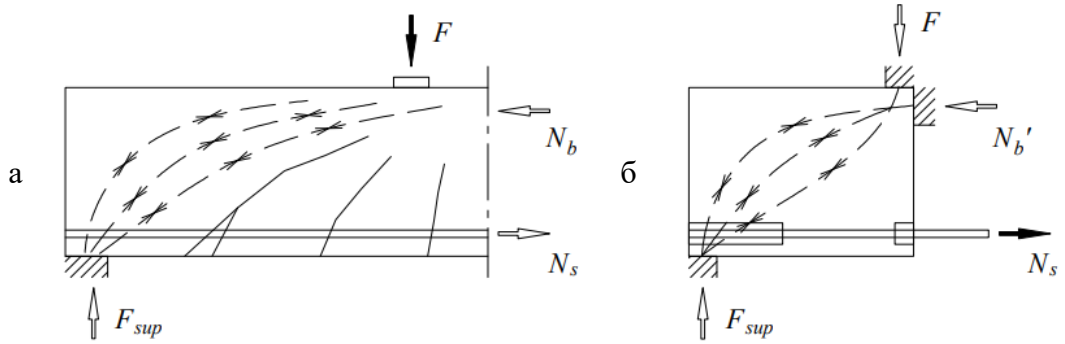


Рисунок 1. *Принцип получения образца конца балки: а — опорный участок свободно опертой балки; б — образец конца балки (разработано автором)*

Значительные технологические трудности, связанные с испытанием образцов конца балки, были преодолены следующим образом:

1. При строгом сохранении принципа заделки испытуемого стержня в изолированный от действия опорных сжимающих напряжений массив бетона была произведена оптимизация геометрических параметров образца (рис. 2) конкретно под арматуру рассматриваемого диаметра. В результате чего двукратно снижен вес образца.

[3] ASTM A944-10. Standard test method for comparing bond strength of steel reinforcing bars to concrete using beam-end specimens.

2. Была разработана и изготовлена специальная испытательная оснастка, позволяющая производить нагружение образца с помощью универсальной испытательной машины (рис. 3).

В отечественных исследованиях принцип испытания образца конца балки уже успешно применен А.А. Прокоповичем [7], однако им изучались другие эффекты.

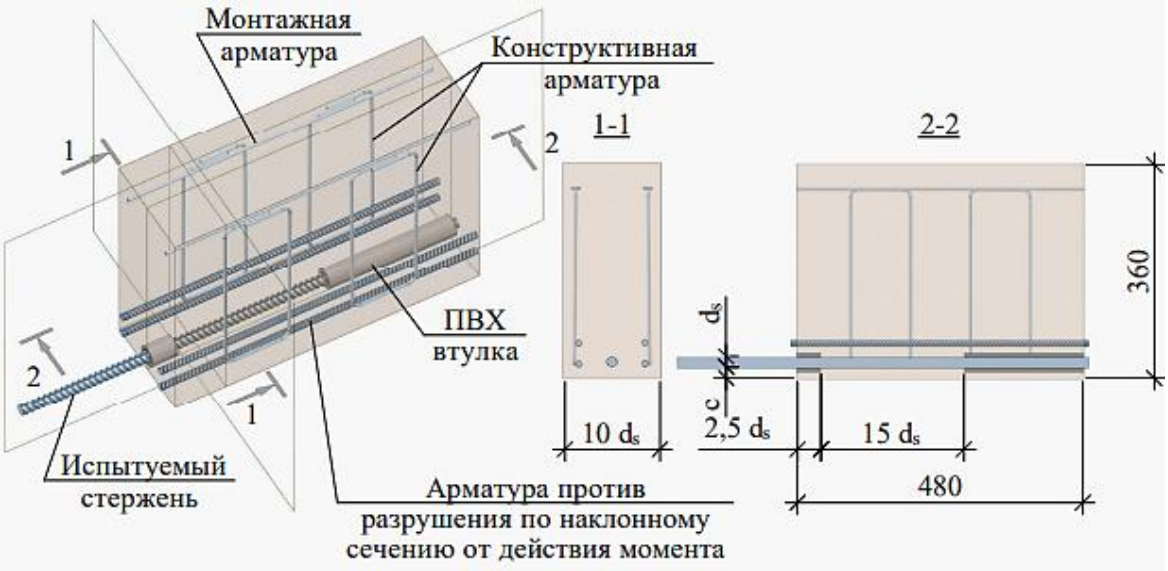
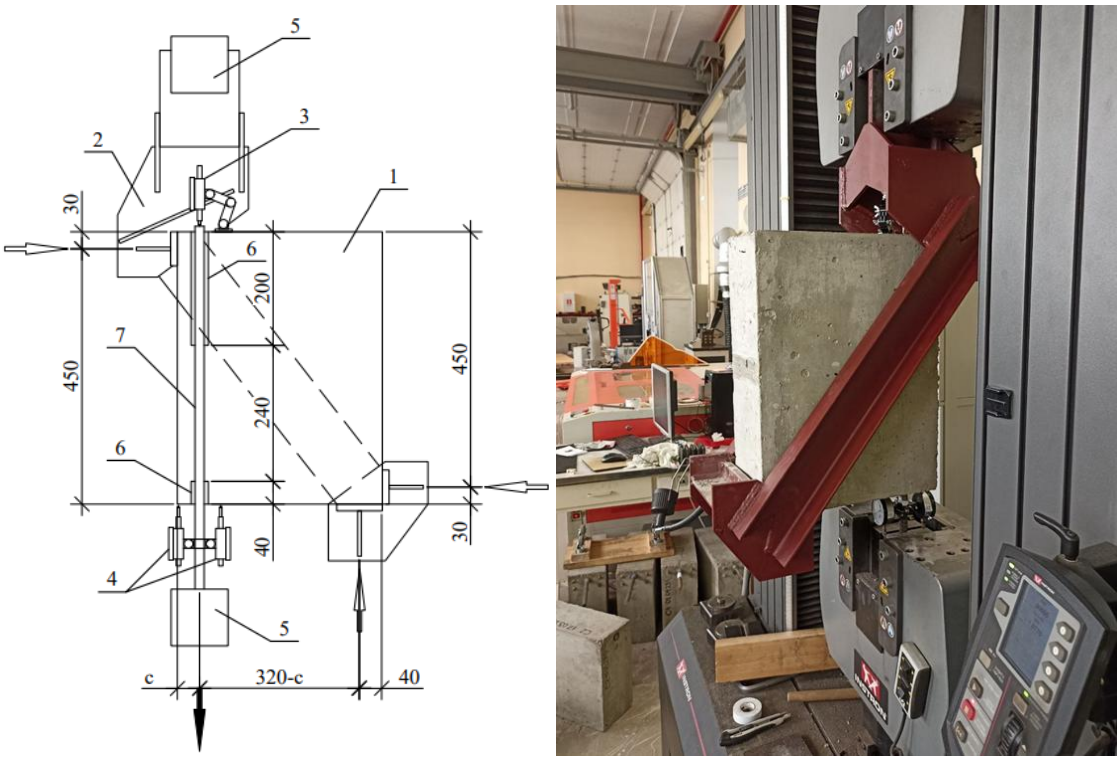


Рисунок 2. *Принятая конструкция образца (разработано автором)*



1 — образец; 2 — испытательная оснастка; 3 и 4 — индикаторы часового типа на свободном и загруженном конце; 5 — зажимные губки испытательной машины; 6 — зона нарушенного сцепления; 7 — зона сцепления

Рисунок 3. *Схема и фото испытаний (иллюстрация и фото автора)*

Материалы образца выбирались, руководствуясь целью получить наиболее универсальные результаты. В качестве испытуемого стержня была принята арматура диаметром (далее d_s)

16 мм серповидного периодического профиля класса А500С по ГОСТ 34028-2016.[4] Состав бетонной смеси проектировался для получения тяжелого бетона В25.

При бетонирования испытуемый стержень находился внизу опалубки, что обеспечивало «хорошие» условия сцепления. В пределах опалубки первые 40 мм ($2{,}5d_s$) стержня были изолированы от контакта с бетоном, затем следовал участок совместной работы длинной 240 мм ($15d_s$), остальная часть стержня, входящая в зону действия поперечных опорных сжимающих напряжений, также изолировалась от сцепления. Каждый из образцов формовался из отдельного замеса совместно с 3-мя стандартными контрольными кубами. В результате ко дню испытаний кубиковая прочность бетона образцов составила от 351 до 433 кг/см^2, что соответствует бетону классов В25–В30.

Всего было изготовлено 3 пары образцов-близнецов: 2 образца с толщиной защитного слоя $c = 16$ мм ($1d_s$), 2 — с толщиной $c = 32$ мм ($2d_s$) и 2 — с толщиной $c = 48$ мм ($3d_s$).

Нагружение системы из образца и оснастки производилось с помощью универсальной испытательной машины Instron-5989 монотонно возрастающей нагрузкой со скоростью 7,5 кН/мин ступенями по 7,5 кН с межступенчатым интервалом 30 сек. По ходу испытаний с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 планировалось фиксировать смещения арматуры относительно бетона на свободном и загруженном конце, однако ввиду новизны испытания не удалось учесть все нюансы закрепления индикаторов и получить корректные значения смещений для всех образцов.

Таким образом, основными экспериментальными данными стали:

1. Прочность анкеровки, за которую принималось максимальное усилие F_u, развиваемое на нагруженном конце арматуры по ходу испытания.
2. Усилие трещинообразования F_t, при котором продольная трещина обнаруживалась на ближайшей к испытуемому стержню грани образца.
3. Прочность сцепления τ_{bond} за которую принималось усредненное на длине заделки условное касательное напряжение по цилиндрической поверхности контакта арматуры с бетоном, развиваемое при действии предельной нагрузки F_u.

2. Результаты

Все образцы были доведены до разрушения анкеровки, которое выражалось в резком падении усилия на силоизмерительном приборе и практически беспрепятственном продергивании арматуры. Было отмечено, что при нагрузке $F_t = 0{,}64–0{,}9F_u$ в начале заделки на ближайшей к испытуемому стержню грани образца обнаруживалась продольная трещина. С дальнейшим нагружением развитие трещины проявлялось преимущественно в её удлинении, в то время как ширина раскрытия оставалась часто столь малой, что трещину можно было наблюдать только при смачивании поверхности бетона ацетоном.

Момент достижения трещиной конца заделки, не был зафиксирован, однако было отмечено, что некоторое время анкеровка работала при распространении трещины по всей длине заделки. Мгновенный рост её ширины раскрытия наблюдался непосредственно перед разрушением. На рисунке 4 представлены характерные, запечатленные после разрушения, картины трещинообразования на нагруженном торце образца и ближайшей к испытуемому стержню его боковой грани.

[4] ГОСТ 34028-2016. Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия.

Смещение арматуры относительно бетона на загруженном торце, которое корректно удалось измерить только для двух образцов с $c = 2d_s$ и $c = 3d_s$, к моменту разрушения составило 0,43 и 0,45 мм соответственно. Эти значения приведены с учётом вычета из показаний индикаторов деформаций удлинения арматуры, развивающихся от начала заделки до точки крепления индикатора.

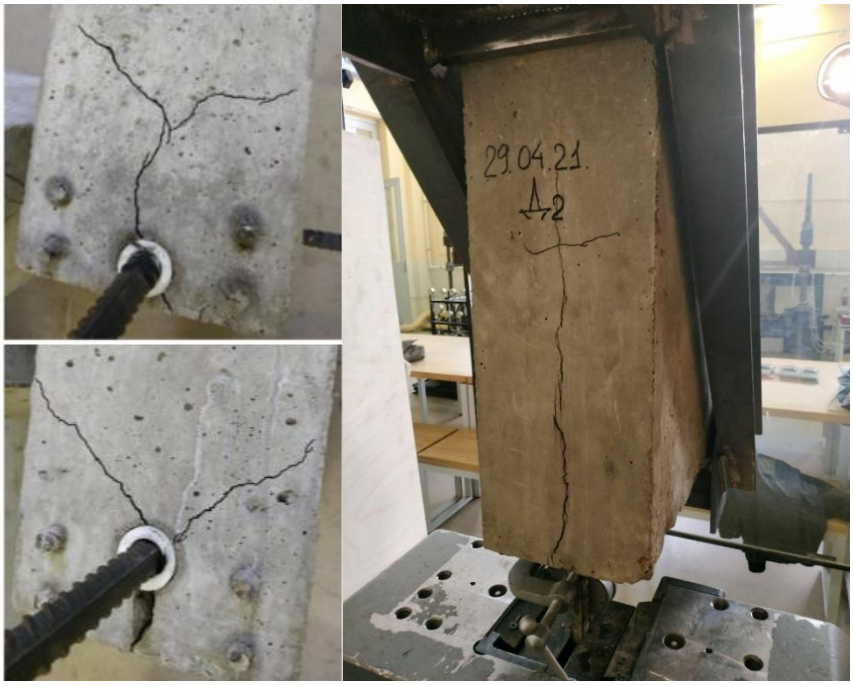


Рисунок 4. *Характер трещинообразования образцов (фото автора)*

Графические зависимости, полученные по результатам измерения прочности анкеровки и в результате приведения этих данных к прочности сцепления, представлены на рисунке 5.

Таким образом, испытания показали, что при увеличении толщины защитного слоя от 1 до 3 диаметров испытуемого стержня прочность сцепления возросла на 46 %, а нагрузка, при которой продольная трещина выходила на поверхность — на 73 %.

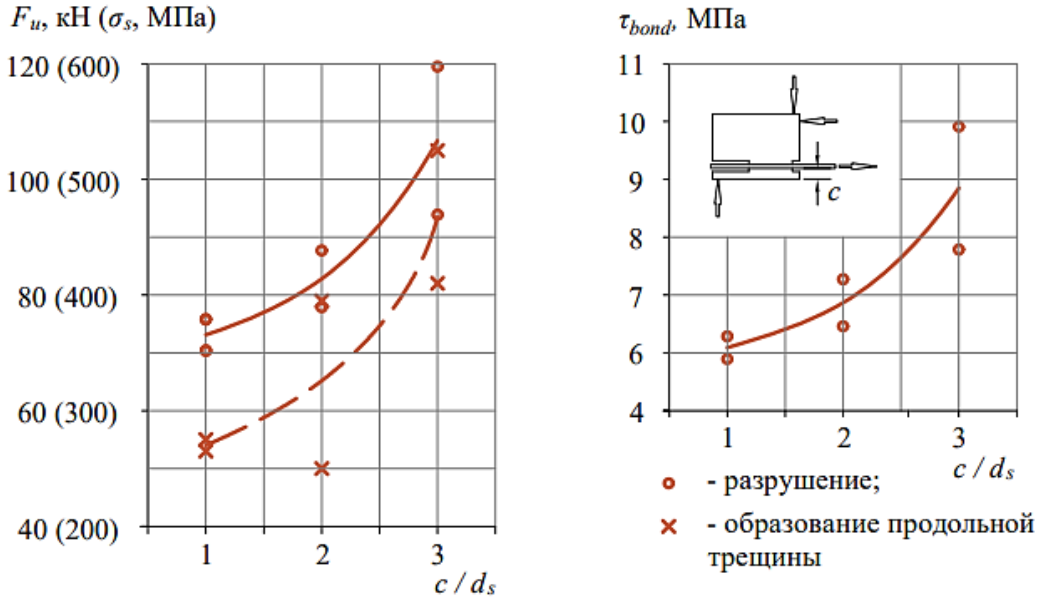
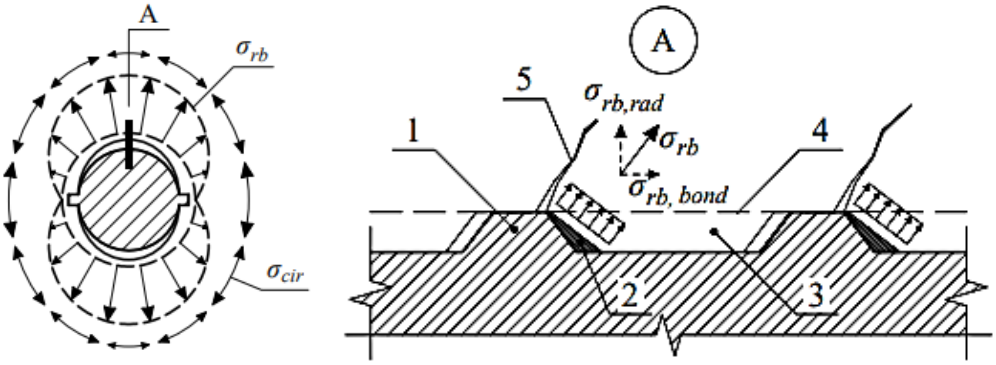


Рисунок 5. *Влияние толщины защитного слоя на характеристики сцепления (разработано автором)*

3. Обсуждение

Опираясь на уже известные данные о механике сцепления арматуры с бетоном [8–10], в том числе на положения, зафиксированные в посвященной сцеплению бюллетени 10 международной федерации по железобетону [5] и в отчёте 1855-1 центра транспортных исследований техасского университета[6], наблюдаемое в ходе испытаний можно объяснить следующим образом.

Передача продольного усилия с арматуры периодического профиля на бетон происходит по большей мере за счёт механического зацепления поперечных ребер арматуры за бетонные консоли, заключенные между этими ребрами. При опирании ребра на бетон сжимающие напряжения σ_{rb} развиваются примерно нормально его поверхности или поверхности клина из смятого бетона, в ряде случае образующегося перед ребром (рис. 6). Если эти напряжения разложить на соосную $\sigma_{rb,n}$ и радиальную $\sigma_{rb,rad}$ стержню составляющие, то можно сказать, что первые образуют собой то самое касательное напряжение сцепления τ_{bond}, которое на самом деле является условным, и отвечают за передачу продольного усилия с арматуры на бетон. Их действие приводит к смятию или срезу бетонных консолей. Действие вторых обосновывает распорность стержня и вызывает в окружающем бетоне возникновение реактивных кольцевых растягивающих напряжений σ_{cir} . Когда последние превышают прочность бетона на растяжение, прежде всего в непосредственной близости к стержню, начинают образовываться продольные трещины, ещё нерасщепленный бетон работает как бетонная обойма.



1 — поперечное ребро; 2 — клин из смятого бетона; 3 — бетонная «консоль»; 4 — цилиндрическая поверхность потенциального среза; 5 — конусная трещина

Рисунок 6. *Механизм возникновения кольцевых растягивающих напряжений (разработано автором)*

В случае, когда стержень равноудален от граней бетонного элемента, продольные трещины доходят до поверхности элемента одновременно в 2–3 местах, что приводит к разделению бетона на сектора и немедленному разрушению анкеровки, как, например, это наблюдалось в исследованиях Хотько А.А. и Жукьян П.П. [11]. Если расстояние до граней достигает порядка $4-5d_s$ и более, особенно при короткой заделке, мощность бетонной обоймы становится достаточной для противостояния кольцевым растягивающим напряжениям, и прочность сцепления реализуется в своем максимально возможном значении — разрушение происходит вследствие среза и смятия бетонных консолей между поперечными ребрами арматуры. Такая механика совместной работы характерна для получивших наибольшее

[5] Bond of reinforcement in concrete. FIB bulletin 10. State-of-art report by Task group Bond models. 2000.

[6] Thompson M.K., Jirsa J.O., Breen J.E., Klingner R.E. Research Report 1855-1. Anchorage Behavior of Headed Reinforcement: Literature Review. Austin: Center for Transportation Research the University of Texas. 2002.

распространение экспериментальных образцов — призм, опёртых торцом, но вместе с тем она не свойственна большинству реальных конструкций.

При эксцентричном расположении арматуры и толщине защитного слоя менее $4-5d_s$, первая трещина обнаруживается на ближайшей грани элемента. Во-первых, элементарно за счёт того, что ей нужно пройти меньшее расстояние, во-вторых — за счёт меньшей жесткости бетонной обоймы в этом направлении. При этом, как показали испытания, выход трещины на поверхность, еще не приводит к разрушению анкеровки. Происходит только размыкание обоймы и изменение схемы работы бетона вокруг стержня (рис. 7), некоторая прочность сцепления сохраняется за счёт защемления стержня, разрушение происходит вследствие развития последующих трещин и расклинивания бетона, сопровождающегося уменьшением площади опирания поперечных ребер вплоть до смятия бетона или выскальзывания стержня, если срез бетонных консолей не происходит раньше.

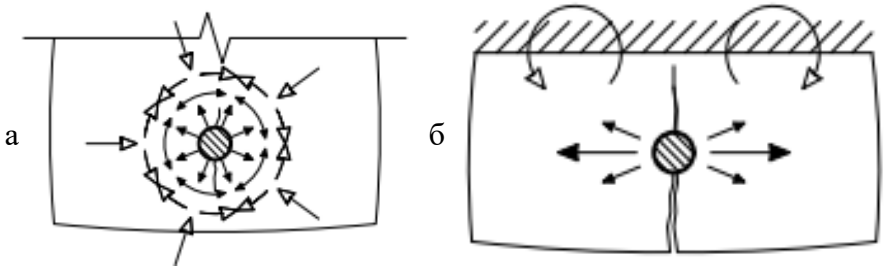


Рисунок 7. *Схема работы заделки до (а) и после (б) раскалывания защитного слоя (разработано автором)*

При рассмотрении реально применяющихся длин анкеровки имеет место значительная неравномерность распределения напряжений сцепления по длине заделки. Продольная трещина вместе с пиковыми значениями напряжений сцепления возникает у начала заделки, а затем смещается к её концу. В таком случае, повышение толщины защитного слоя не просто отодвигает момент размыкания обоймы, т. е. развития трещины в направлении ближайшей грани, но и затрудняет развитие этой трещины вглубь заделки.

Полученные экспериментальные данные применимы в первую очередь для конструкций, где зона анкеровки решена подобно образцу, например в плитах. При угловом расположении стержней в сечении или при малом шаге стержней, что будет способствовать наложению кольцевых растягивающих напряжений, может наблюдаться несколько иной характер разрушения. Такие частные случаи требуют отдельных исследований.

Также при анализе результатов не может быть не отмечено следующее:

1. Расчетное значение прочности анкеровки для соответствующих образцам материалов и длине заделки, вычисленное по СП 63.13330.2018, составляет 34,7 кН (для бетона В30), что более чем в 2 раза меньше фактически наблюдаемой прочности анкеровки даже для образцов с минимальной из рассмотренных толщиной защитного слоя $1d_s$ (16 мм).
2. С увеличением толщины защитного слоя наблюдается тенденция к росту разброса экспериментальных данных между образцами-близнецами.
3. В образцах с толщиной защитного слоя $3d_s$ при достижении разрушающей нагрузки F_u в арматуре возникали напряжения, соответствующие уже неупругой работе. При исключении этого, эффект на сцепление от повышенной толщины защитного слоя вероятно был бы еще значительнее.
4. Экспериментальные данные согласуются с результатами Залесова и др. [5] по самому характеру наблюдаемого влияния, но не по его уровню.

Таким образом, в данной работе на образцах работающих приближенно к реальным конструкциям изолированно от влияния прочих факторов экспериментально подтвержден и теоретически обоснован существенный рост прочности сцепления арматуры с бетоном при повышении толщины защитного слоя. Дальнейшее исследование вопроса может быть направлено на уточнение полученной зависимости в промежуточных точках, проверку обнаруженного эффекта при использовании арматуры иного диаметра и бетона иных характеристик. На основе этих данных станет возможна разработка расчетного механизма, который позволит сокращать длины анкеровки для арматуры, имеющей в зоне анкеровки повышенную толщину защитного слоя, что будет способствовать экономии арматурной стали и упрощению армирования узлов железобетонных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Судаков Г.Н. Некоторые расчётные и конструктивные требования по анкеровке стержневой арматуры // Сцепление арматуры с бетоном. М.: Б. и., 1971. С. 74–80.
2. Стахов Д.О. Сравнительный анализ положений отечественных и зарубежных норм в области анкеровки арматуры // Серия "Строительство": сб. статей магистрантов и аспирантов. Вып. 4. В 2 т. СПб.: СПбГАСУ, 2021. Т. I. С. 160–172. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47214933 (дата обращения 23.03.2025).
3. Алиев Ш.А. Сопротивление бетона раскалыванию арматурой // Сб. трудов ВНИИжелезобетон. 1961. № 5. С. 167–181.
4. Гольдфайн Б.С. и др. Влияние толщины защитного слоя на жесткость сцепления арматуры периодического профиля с бетоном // Совершенствование заводской технологии сборного железобетона. М.: ВНИИжелезобетон, 1983. С. 145–150.
5. Залесов А.С., Шарипов Р.Ш., Гулалиев С.Х. Анкеровка продольной арматуры балок на свободных опорах // Бетон и железобетон. 1991. № 3. С. 19–21. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26339084 (дата обращения 23.03.2025).
6. Стахов Д.О. Обзор и сравнение методов исследования характеристик сцепления арматуры с бетоном // Молодой ученый. 2021. № 3(365). С. 62–68. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46149774 (дата обращения 23.03.2025).
7. Прокопович А.А. Сопротивление изгибу железобетонных конструкций с различными условиями сцепления продольной арматуры с бетоном. Самара: НВФ «Сенсоры. Модули. Системы», 2000. 296 с.
8. Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном. М.: Стройиздат, 1981. 184 с.
9. Мулин Н.М. Стержневая арматура железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1974. 232 с.
10. Zhenhai Guo. Principles of Reinforced Concrete. Beijing: Tsinghua University Press, 2014. 606 p.
11. Хотько А.А., Жукьян П.П. Давление на бетон арматурного стержня с различными видами периодического профиля // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. 2008. № 6. С. 44–50. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28313509 (дата обращения 23.03.2025).

Stakhov Daniil Olegovich
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: daniil.stahoff@yandex.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1135450

Effect of cover thickness on bond strength rebars to concrete

Abstract. The thickness of the concrete cover in the anchorage zone of real structures often exceeds the minimum structural requirement. In such cases, several international design codes permit an increase in the design bond strength and, consequently, a reduction in the required development length. Russian standards, however, do not currently offer this possibility, which may be partially attributed to the limited adoption of test methods in domestic bond research that allow for a reliable assessment of this factor's influence. Nevertheless, isolated studies do indicate a positive effect of increased concrete cover thickness on bond strength. However, these results are typically obtained from specimens that do not reproduce the stress-strain state of real structures or fail to isolate this factor from the influence of others. The objective of this study is to check the presence and assess the significance of the specified influence in an experiment free from these limitations. This was achieved through the application of a modified beam-end specimen testing methodology, adapted by the author. Based on the experimental investigation of three pairs of twin specimens, it was found that increasing the concrete cover thickness from 1 to 3 bar diameters resulted in a 46 % increase in bond strength and a 73 % increase in the load at which a longitudinal crack reached the surface. The observed effect is attributed to the fact that an increased concrete cover enhances the resistance to radial tensile stresses. This hinders or completely prevents the formation of longitudinal cracks and the detachment of concrete from the reinforcement bar, thereby bringing the bond strength closer to its maximum possible value, which is governed by concrete shear and bearing failure between the transverse ribs of the reinforcement.

Keywords: bond; anchorage; development length; concrete cover; beam-end specimen; test; reinforced concrete