

УДК 624.012.45:624.023.87

Дмитренко Е.А.,
Национальный авиационный университет, г. Киев

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЦЕПЛЕНИЯ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ ПРИ ДЕФОРМАЦИОННОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ

Представлены некоторые результаты экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном при деформационных воздействиях с учетом ниспадающей ветви деформирования. Построены графики зависимости выдерживающего (вдавливающего) усилия от взаимных смещений арматуры относительно бетона (в бетон), отображающие действительный характер деформирования и трещинообразования экспериментальных образцов при варьировании высоты бетона (длины заанкеривания арматуры в бетоне).

Полученные экспериментальные данные можно использовать при разработке новых, более усовершенствованных зависимостей сцепления и усовершенствовании на их основе методик расчета железобетонных конструкций.

Ключевые слова: *железобетонные конструкции, сцепление арматуры с бетоном, деформационные воздействия, ниспадающая ветвь деформирования, экспериментальные исследования.*

Постановка проблемы. Наличие неоднозначности подходов к решению проблемы сцепления арматуры с бетоном и отсутствие единой теоретически обоснованной методики расчета, большое количество зависимостей сцепления, предложенных различными авторами [1–3 и др.], использование которых в тех или иных расчетных моделях приводит к существенным различиям. Одним из путей достоверного определения таких параметров является проведение дальнейших экспериментальных исследований.

Анализ последних исследований и публикаций. Задача сцепления арматуры с бетоном при наличии дискретных трещин исследована недостаточно подробно, но при этом достаточно распространена и имеет прикладное применение при расчетах железобетонных зданий и сооружений с несущими стенами, что делает её актуальной для строительной практики.

Целью выполненных экспериментальных исследований является построение и анализ зависимостей действующего усилия P от смещений арматуры относительно бетона U_q на различных стадиях нагружения при выдергивании арматурного стержня из бетона; вдавливании арматурного стержня в бетон и сдвиге вдоль дискретной трещины с варьированием длины

анкеровки, классов бетона, арматуры и диаметров арматуры с учетом ниспадающей ветви деформирования., проверки предлагаемого расчетного аппарата [4–6], а также для разработки эффективного закона сцепления, максимально отражающего реальную работу бетона и арматуры в околоарматурной зоне.

Влияние на сцепление оказывает напряженно-деформированное состояние конструкции. Здесь следует выделить анкеровку арматуры приопорных участков, анкеровку концов арматуры в бетоне при различных силовых воздействиях, распределение сцепления арматуры с бетоном между трещинами в растянутых, изгибаемых и внецентренно сжатых конструкциях.

Изложение основного материала. Результаты и анализ опытных данных. Основными параметрами, за которыми велись наблюдения в эксперименте, являлись взаимные смещения арматуры относительно бетона при выдергивании и вдавливании арматуры в зависимости от действующего усилия. На основании этих данных были построены экспериментальные зависимости сцепления, которые существенно различаются между собой как по форме кривых, так и по значениям экспериментально определенных параметров, входящих в эти законы [1, 2]. Также особый интерес представлял вид и характер разрушения образцов в зависимости от длины заанкеривания арматурного стержня в бетоне (высоты бетона), а также значения усилия трещинообразования и разрушающего усилия для рассматриваемых образцов. При испытаниях *на выдергивание арматуры из бетона* выявлено *три вида разрушения* экспериментальных конструкций:

– разрушение вследствие превышения напряжений в арматуре предела прочности арматуры на растяжение f_{yd} , резкий разрыв арматуры – характерно для большинства испытанных образцов с длиной заанкеривания (высотой бетона) более 100мм: АН-V-100-6, АН-V-150-8, АН-V-200-9, АН-V-200-10, АН-V-250-11, АН-V-300-13-17, АН-V-300-20 – 11 образцов;

– разрушение вследствие превышения напряжений в арматуре предела текучести арматуры f_{yd} , резкий разрыв арматуры – характерно для большинства испытанных образцов с длиной заанкеривания (высотой бетона) более 100мм: АН-V-250-12, АН-V-300-18 – 2 образца; АН-V-150-7, АН-V-300-19 – 2 образца;

– разрушение вследствие выхода арматуры из бетона (нарушение связей сцепления арматуры с бетоном), характерно для образцов относительно малой длины заанкеривания арматуры в бетоне (высоты бетона) – образцы АН-V-50-1, АН-V-50-2, АН-V-75-3, АН-V-75-4 (рис. 1), АН-V-100-5 (рис. 2) – 5 образцов.

Значения разрушающих усилий для многих образцов, разрушенных вследствие нарушения связей сцепления арматуры с бетоном (для АН-V-50-2, АН-V-75-3,4, АН-V-100-5) превысили значения усилия, вызывающего

напряжения, превышающие расчетный предел текучести арматуры R_s , которое для арматуры $\varnothing 10$ мм класса А400С составляет 2,865т. Для диаграммы деформирования арматуры необходимо учитывать нелинейность ее работы путем введения дополнительной ветви в аналитическое выражение для арматуры системы, приведенной в работе [4]. Отсюда, для диаграммы деформирования бетона и зависимости сцепления также необходимо введение дополнительных нисходящих участков [4–6].

а)



б)



Рис. 1. Разрушение вследствие нарушения связей сцепления арматуры с бетоном:
а – образец АН-V-75-3; б – образец АН-V-75-4

Исходя из полученных данных о значении разрушающего усилия P_{fail} для образцов, разрушенных вследствие разрыва арматуры, можно сделать вывод о

том, что эти значения несколько превышают значение усилия, соответствующего временному сопротивлению арматуры разрыву σ_b и составляющему для арматуры $\varnothing 10$ мм класса А400С 4,63т, что полностью соответствует физической стороне задачи.

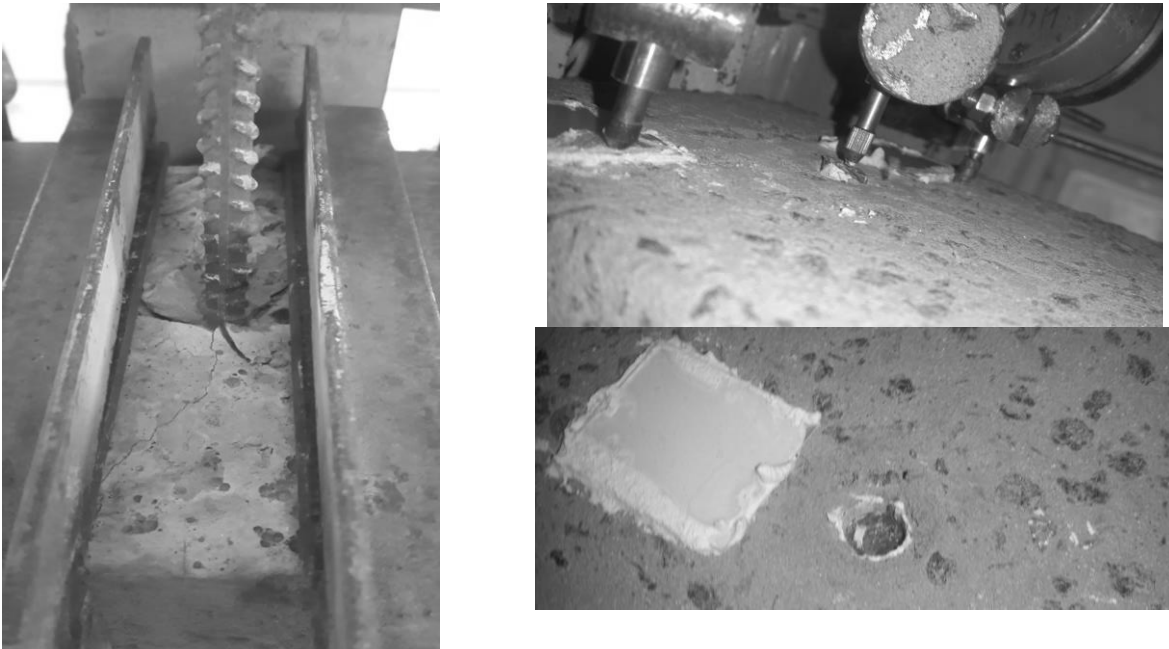


Рис. 2. Разрушение вследствие нарушения связей сцепления арматуры с бетоном в образце АН-V-100-5

На основании выполненных экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном при вдавливании арматурного стержня построены графики зависимости вдавливающего усилия P от взаимных смещений арматуры относительно бетона U_q (рис. 3).

Для образцов, испытанных на *вдавливание характерны две формы разрушения:*

– разрушение вследствие раскалывания бетона околоарматурной зоны при вдавливании арматуры в бетон (нарушение связей сцепления арматуры с бетоном), характерно для образцов относительно малой длины заанкеривания арматуры в бетоне (высоты бетона) – образцы В-VI-50-1; В-VI-50-2, В-VI-75-3; В-VI-75-4.

– вследствие постепенного разрушения связей сцепления арматуры с бетоном и в результате этого, постепенного выхода арматурного стержня из бетона;

На полученных графиках (рис. 3) следует выделить наличие нескольких **участков:**

– восходящего, который характеризует практически прямо пропорциональный прирост взаимных смещений U_q при увеличении действующего усилия P ;

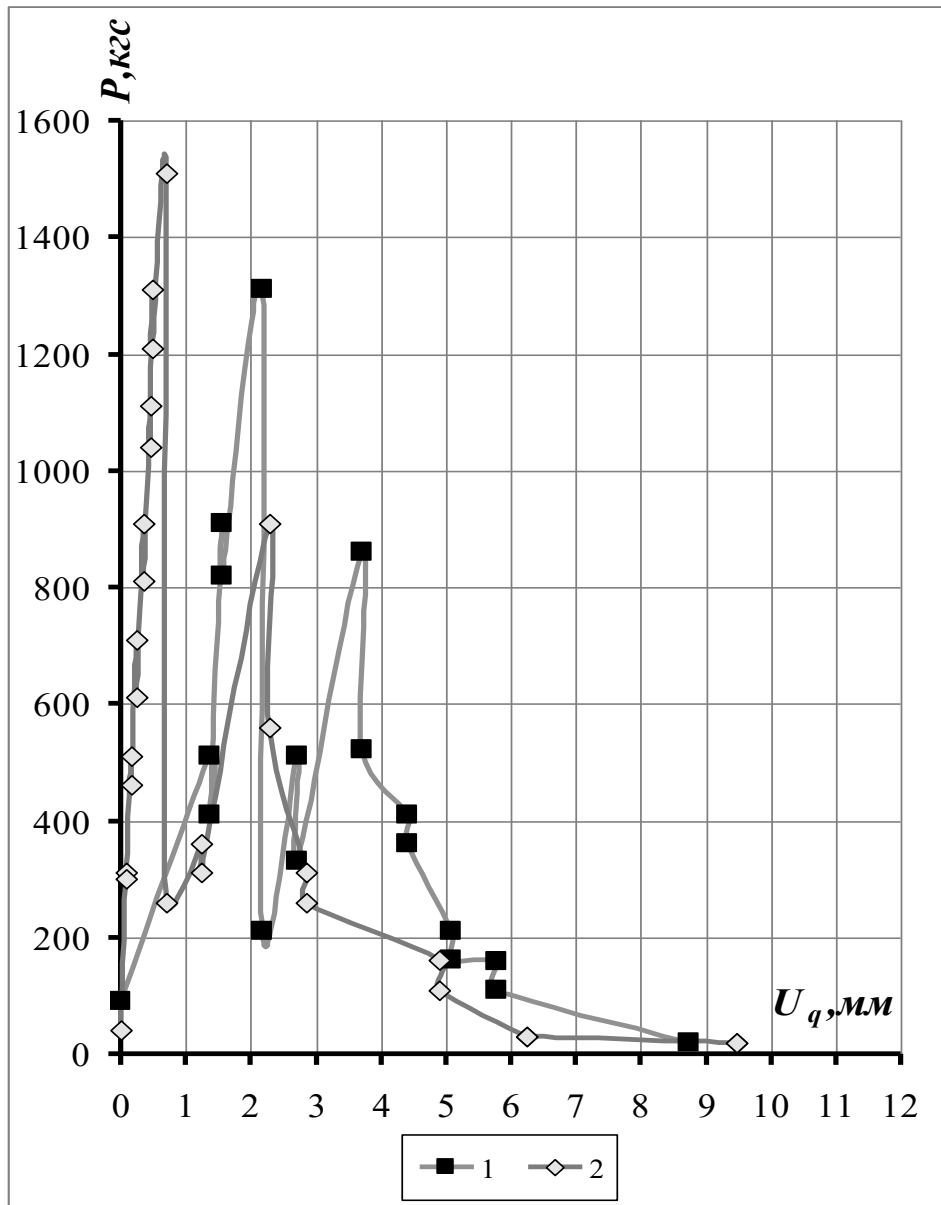


Рис. 3. Графіки залежності вдавлюючого зусилля P від взаємних смещень арматури відносно бетону U_q : 1 – зразок В-VI-75-3; 2 – зразок В-VI-75-4

– першого нисходящого участка, характеризуемого різким зменшенням зжимаючого зусилля P , виникаючого в результаті появи першої нормальної тріщини;

– наступного за нисходящим восходящого участка, характеризуемого збільшенням сприймаемого зоною сцеплення зразка зжимаючого зусилля P ;

– другого нисходящого участка, характеризуемого поступенним зниженням зв'язей сцеплення арматури з бетоном.

Предельное зжимаюче зусилля P , викликаюче появу першої тріщини в зразках збільшувалося з збільшенням висоти бетону (довжини заанкеривання арматури) і склало для зразків: В-VI-50-1,2 – 1,01т і 0,91т відповідно; В-VI-75-3,4 – 1,31т і 1,51т відповідно; В-VI-100-1,2 –

2,41т и 2,61т соответственно. Вариант разрушения образцов представлен на рис. 4.

Для образцов серий В-VI-50, В-VI-75 при разрушении характерно распространение и раскрытие нормальной трещины по всей высоте бетона, что в ряде случаев привело к раскалыванию испытуемого образца на две части (рис. 4). В образцах серии В-VI-100 нормальная трещина развивается не на всю высоту бетона, а лишь на определенную его часть с максимальным раскрытием в нижней точке образца и не выходит на верхний торец образца. Также следует отметить, что при разрушении ряда образцов серий В-VI-75,100 нормальные трещины имели наклонный характер. При разрушении образца серии В-VI-75-3 это привело к сколу нижней части бетона.

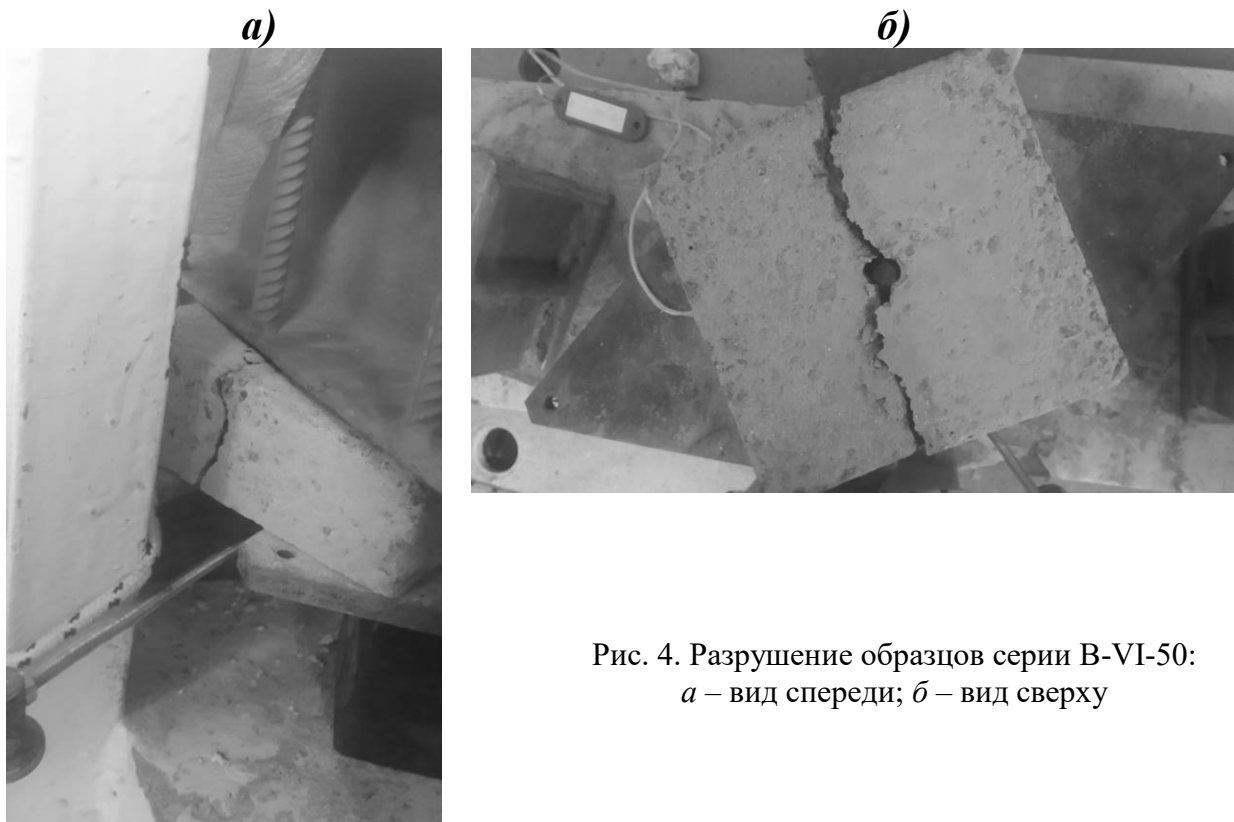


Рис. 4. Разрушение образцов серии В-VI-50:
а – вид спереди; б – вид сверху

Так как испытания ряда экспериментальных образцов на выдергивание были доведены до сдвига арматуры относительно бетона, можем рассчитать среднее (условное) экспериментальное предельное напряжение сцепления τ_{gm} по формуле (1) и сравнить с результатами испытания (табл. 1).

$$\tau_{gm} = \frac{N}{ul} = \frac{\sigma_s \cdot A_s}{\pi d_s l}, \quad (1)$$

где N и σ_s – предельное усилие и напряжение в стержне, соответственно, A_s , d_s та l – площадь поперечного сечения, средний диаметр и длина забетонированного стержня.

При выполнении условия $N_{gm} < N_{ep}$ (предельное экспериментальное усилие сцепления образца, выведенное из формулы (1) меньше усилия, соответствующего временному сопротивлению арматуры) наблюдается разрушение образцов вследствие нарушения связей сцепления арматуры с бетоном.

Полученное значение τ_{gm} целесообразно использовать для сопоставления результатов проведенных численных экспериментальных исследований и верификации предлагаемой аналитической модели сцепления арматуры с бетоном [4–6], а также имеющихся исследований других авторов [8–10].

Таблица 1

Определение предельных напряжений (усилий) сцепления и сравнение их с усилием, соответствующим временному сопротивлению разрыву

Шифр образца	Предельное напряжение сцепления (экспер.), τ_{gm} , МПа	Предельное усилие сцепления (экспериментальное), N_{gm} , т	Ширина раскрытия трещин, a_{crc} , мм	Временное сопротивление арматуры класса А400С σ_{ep} , МПа	Результат испытания
АН-V-50-1	16,62	2,611	2,5-3,5	590	$N_{gm} < N_{ep}$
АН-V-50-2	18,06	2,836	0,3-1,0	590	$N_{gm} < N_{ep}$
АН-V-75-3	19,36	4,561	0,5-1,6	590	$N_{gm} < N_{ep}$
АН-V-75-4	19,34	4,558	0,05-0,5	590	$N_{gm} < N_{ep}$
АН-V-100-5	15,31	4,811	0,1-0,35	590	$N_{gm} \approx N_{ep}$

Проведенные экспериментальные исследования дают возможность проверки рабочих гипотез и достоверности расчетной методики определения ширины раскрытия трещин, усилия закрытия трещин, жесткости арматурного стержня, пересекающего трещину, длины заделки анкеров при помощи решения аналитической системы нелинейных дифференциальных уравнений, реализуемых в современных математических пакетах символьной математики.

Выводы. *Основные выводы* по результатам проведенных экспериментальных исследований сводятся к следующему:

1. Получены новые экспериментальные данные: усилия трещинообразования P_{crc} , разрушающего усилия P_{fail} , смещений арматурного стержня относительно бетона U_q при действии кратковременного деформационного нагружения P ; графики зависимости $P - U_q$, отображающие характер деформирования и трещинообразования экспериментальных образцов

при выдергивании (или вдавливания) арматурного стержня под нагрузкой с варьированием высоты бетона (длины заанкеривания арматуры в бетоне) с учетом ниспадающей ветви деформирования бетона (при деформационном методе нагружения).

2. Выявлено три вида разрушения, полученных в ходе испытаний на выдергивание образцов: разрушение вследствие выхода арматуры из бетона; разрушение вследствие превышения напряжений в арматуре предела текучести арматуры на растяжение f_{yd} , разрыв арматуры; разрушение вследствие превышения напряжений в арматуре временного сопротивления арматуры на растяжение σ_{sp} , резкий разрыв арматуры.

Для образцов, испытанных на вдавливание характерны две формы разрушения: вследствие постепенного разрушения связей сцепления арматуры с бетоном; разрушение вследствие раскалывания бетона околоарматурной зоны при вдавливании арматуры в бетон.

3. Графики зависимости $P - U_q$ при выдергивании характеризуются наличием двух ветвей: восходящей и нисходящей, и наличием прямого участка между ними.

Графики зависимости $P - U_q$ при вдавливании характеризуются наличием нескольких участков: восходящего; первого нисходящего участка; восходящего участка; второго нисходящего участка.

4. При испытании на выдергивание и вследствие выхода арматуры из бетона получено среднее (условное) экспериментальное предельное напряжение сцепления τ_{gm} , при которых происходит срыв связи арматуры с бетоном, равное 17,32МПа.

5. Проведены испытания сцепления арматуры с бетоном, что позволяет более точно оценивать ширину раскрытия трещин железобетонных конструкций, вычислять усилия закрытия трещин, жесткость арматурного стержня, пересекающего трещину, длину заделки анкеров, и, как следствие, повысить экономический эффект при проектировании новых и обследовании существующих железобетонных конструкций.

6. Значения усилия трещинообразования P_{crc} для образцов, испытанных на выдергивание находятся в пределах от 12,89 до 21,25 кН и не зависят от длины заделки арматуры в бетоне (высоты бетона). Для образцов, испытанных на вдавливание, то величина P_{crc} варьируется в пределах от 8,96 до 26,03 кН и при увеличении заделки арматуры в бетоне (высоты бетона) увеличивается.

Полученные экспериментальные данные сцепления арматуры с бетоном при деформационных воздействиях может стать основой для проверки существующих или создания новых моделей контактного взаимодействия анкеровки с бетоном.

Список літератури

1. Бенин А.В. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 1. Модели с учетом несплошности соединения/ А.В. Бенин, А.С. Семенов, С.Г. Семенов, Б.Е. Мельников // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – №5. – С.86– 99.
2. Бенин А.В. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 2. Модели без учета несплошности соединения/ А.В. Бенин, А.С. Семенов, С.Г. Семенов, Б.Е. Мельников // Инженерно-строительный журнал. – 2014. - №1. – С.23-40.
3. Холмянский М. М. Контакт арматуры с бетоном : монография / М. М. Холмянский. – М. : Стройиздат, 1981. – 184с.
4. Колчунов В. И. Аналитическая модель сцепления и нелинейная податливость арматурных связей при раскрытии дискретных трещин в железобетонных конструкциях / В. И. Колчунов, И. А. Яковенко, Е. А. Дмитренко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне, 2016. – Вип. 32. – С. 183 – 196.
5. Колчунов В. И. Конечно-элементное моделирование нелинейной плоской задачи сцепления бетона и арматуры в ПК Лира-САПР / В. И. Колчунов, И. А. Яковенко, Е. А. Дмитренко // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2016. – №3. – С. 6–15.
6. Колчунов В. И. Аналитическая и конечно-элементные стержневые модели нелинейной задачи сцепления арматуры с бетоном, их сравнение и анализ // Містобудування та територіальне планування : наук.-техн. збірник. – К. : КНУБА, 2016. – Вип. 60. – С. 184– 197.
7. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування : ДСТУ Б.В.2.6–156:2010. – [Чинний з 2011-06-01]. – К. : Мінгеріонбуд України, 2011. – 118 с. – (Національний стандарт України).
8. Левин В.М. Теоретическая оценка жёсткости арматурной связи в трещине в модели дискретных трещин / В. М. Левин, Н.Ю. Рогожин // Материалы XVIII Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых “Строительство – формирование среды жизнедеятельности” МГСУ. – М., 2015. – С. 299–302.
9. Левин В.М. Математическое моделирование совместного деформирования арматурного стержня и бетона в окрестности изолированной трещины (применительно к модели дискретных трещин) / В. М. Левин, Н. Ю. Рогожин // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2015. – Вип. 3. – С. 5–7.

10. Левин В.М. Влияние диаметра арматуры на жёсткость арматурной связи в трещине / В. М. Левин, Н.Ю. Рогожин // Материалы XIX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых “Строительство – формирование среды жизнедеятельности” МГСУ. – М., 2015. – С. 390–393.

Анотація

У статті представлені деякі результати експериментальних досліджень зчеплення арматури з бетоном при деформаційних впливах з урахуванням нисхідної гілки деформування. Побудовано графіки залежності зусилля висмикування (вдавлення) від взаємних зсувів арматури відносно бетону (в бетон), які відображають дійсний характер деформування і тріщиноутворення експериментальних зразків при варіюванні висоти бетону (довжини анкерування арматури у бетоні).

Отримані експериментальні дані можна використовувати при розробці нових, більш удосконалених залежностей зчеплення та удосконалення методик розрахунку залізобетонних конструкцій на їхній основі.

Ключові слова: залізобетонні конструкції, зчеплення арматури з бетоном, деформаційні впливи, нисхідна гілка деформування, експериментальні дослідження.

Abstract

The paper presents some results of experimental research bond armature with concrete by deformation effects with descending branch of the deformation.

The plots are constructed the pulling (pressed into) the efforts of the mutual relative displacements of armature with concrete (in concrete), reflecting the real character of the deformation and fracture of the experimental samples by varying the height of the concrete (anchoring length of armature in concrete).

The experimental data are useful in the development of new, more advanced bond relations and improving adhesion on their basis of calculation methods of reinforced concrete constructions.

Keywords: reinforced concrete constructions, bond armature with concrete, deformation effects, the descending branch of the deformation, experimental researches.