

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЦЕПЛЕНИЯ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ ПРИ ДЕФОРМАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ С УЧЕТОМ НИСПАДАЮЩЕЙ ВЕТВИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

В. И. Колчунов, И. А. Яковенко, Е. А. Дмитренко

Национальный авиационный университет

просп. Космонавта Комарова, 1, корп. 5, ауд. 5.510, г. Киев, 03580, Украина. E-mail: i2103@ukr.net

Представлены основные результаты экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном при деформационных воздействиях с учетом ниспадающей ветви деформирования. Получены экспериментальные данные следующих параметров: усилия трещинообразования (в околоарматурной зоне), разрушающего усилия, смещений арматурного стержня относительно бетона при действии кратковременного деформационного нагружения. 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) с учетом ниспадающей ветви деформирования бетона. При проведении испытаний на выдергивание выявлено три вида разрушения образцов, а на вдавливание – две формы разрушения. Получены средние (условные) экспериментальные предельные напряжения сцепления. Полученные экспериментальные данные будут полезными при разработке новых, более усовершенствованных зависимостей сцепления и усовершенствовании на их основе методик расчета железобетонных конструкций.

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

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЧЕПЛЕННЯ АРМАТУРИ З БЕТОНОМ ПРИ ДЕФОРМАЦІЙНОМУ ВПЛИВІ З УРАХУВАННЯМ НИСХІДНОЇ ГІЛКИ ДЕФОРМУВАННЯ

В. І. Колчунов, І. А. Яковенко, Є. А. Дмитренко

Національний авіаційний університет

просп. Космонавта Комарова, 1, корп. 5, ауд. 5.510, м. Київ, 03580, Україна. E-mail: i2103@ukr.net

Представлено основні результати експериментальних досліджень зчеплення арматури з бетоном при деформацийних впливах з урахуванням нисхідної гілки деформування. Отримано експериментальні дані наступних параметрів: зусилля тріщиноутворення (в околиці арматурної зони), руйнуючого зусилля, зсувів арматурного стержня відносно бетону при дії короткочасного деформацийного навантаження. Побудовано графіки залежності висмикуючого (вдавлюючого) зусилля від взаємних зсувів арматури щодо бетону (у бетон), що відображають дійсний характер деформування і тріщиноутворення експериментальних зразків при варіюванні висоти бетону (довжини анкерування арматури у бетоні) з урахуванням нисхідної гілки деформування бетону. При проведенні випробувань на висмикування виявлено три види руйнування зразків, на вдавнення – дві форми руйнування. Отримано середні (умовні) експериментальні граничні напруження зчеплення. Отримані експериментальні дані будуть корисними при розробці нових, більш удосконалених залежностей зчеплення і удосконалення на їх основі методик розрахунку залізобетонних конструкцій.

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

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В последние годы совершенствование железобетонных конструкций связано с проблемой сцепления арматуры с бетоном, которая имеет фундаментальное значение для теории и практики железобетона.

Силы сцепления создают сложное напряженно-деформированное состояние в армированных элементах и конструкциях.

Точность определения основных параметров сцепления в железобетонном элементе (усилие в стержне, длина его заделки, напряжения и деформации сцепления) в большой степени зависит от учета реальных режимов нагружения и условий эксплуатации конструкций, а также правильного выбора расчетных схем, которые наиболее полно учитывали бы одновременное действие продольных и поперечных напряжений взаимодействия арматуры с бетоном.

Работы, посвященные изучению проблемы сцепления с учетом деформационного воздействия прак-

тически не проводились. Тем не менее, проблема сцепления является одной из наиболее важных в сопротивлении железобетонных конструкций силовым и деформационным воздействиям.

Среди факторов, определяющих сопротивление сдвигу арматуры в бетоне следует выделить:

– сопротивление бетона смятию и срезу, вызванное механическим защемлением неровностей и выступов на поверхности арматуры – механическое сцепление (80–90 %);

– склеивание арматуры с бетоном вследствие клеящей способности цементного геля – физическое и химическое сцепление (10–20 %).

Силы трения (согласно последним исследованиям) отсутствуют или пренебрежимо малы, а усадка бетона вообще отрицательно сказывается на сопротивлении арматуры сдвигу.

Склеивание цементного камня с арматурой в период схватывания и твердения бетона определяется химическими и физическими процессами, которые

приводят к возникновению на поверхности контакта капиллярных и молекулярных сил притяжения. Однако силы адгезии нарушаются при сравнительно небольших напряжениях.

У стержней с гладкой поверхностью сцепление в пять раз ниже, чем у горячекатаных гладких стержней. Особенно эффективно придание поверхности стержней периодического профиля. Сопротивление выдергиванию такой арматуры выше в 2–3 раза по сравнению с гладкой благодаря заклиниванию профиля в бетоне.

Существенное влияние на сцепление оказывает напряженно деформированное состояние образца: анкеровка концов арматуры в бетоне при различных силовых воздействиях, анкеровка арматуры в опорных участках, а также в узлах ферм, распределение сцепления арматуры с бетоном между трещинами в растянутых, изгибаемых и внецентренно сжатых конструкциях.

Особенностью предварительного напряжения конструкций без специальных анкерных приспособлений состоит в передаче напряжений с арматуры на бетон при отпуске напряженной арматуры. При этом обжатие обеспечивается сцеплением арматуры с бетоном в зоне анкеровки.

Работы, посвященные изучению проблемы сцепления с учетом ниспадающей ветви деформирования железобетона практически не проводились [1, 2]. Тем не менее, проблема сцепления является основополагающей в сопротивлении железобетонных конструкций силовым и деформационным воздействиям.

Целью данной работы является экспериментальное определение характеристик сцепления арматуры с бетоном при кратковременном деформационном режиме нагружения, учитывающем ниспадающую ветвь деформирования железобетона.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

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 дополняют теоретически разработанные зависимости и уже существующие и применяемые в современной практике законы сцепления, различающиеся между собой как по форме кривых, так и по значениям экспериментально определенных параметров, входящих в эти законы [1]. 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. Весьма информативными являлись полученные данные о картине развития и распространения трещин в околоарматурной зоне и по торцу образцов в зависимости от действующего выдергивающего усилия.

На основе полученных экспериментальных результатов становится возможным определение предельных напряжений сцепления арматуры с бетоном, при которых происходит срыв связи арматуры с бетоном и её выход из него.

В результате испытаний на выдергивание арматуры из бетона было выявлено *три вида* разрушения образцов:

– 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, АН-V-100-5 – 5 образцов (рис. 1).



а)



б)

Рисунок 1 – Разрушение вследствие нарушения связей сцепления арматуры с бетоном при выдергивании в образце АН-V-50-1:

а – вид сбоку; б – вид сверху

– разрушение вследствие превышения напряжений в арматуре предела прочности арматуры на растяжение f_{ydb} , 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-200-9,10, АН-V-250-11, АН-V-300-13-17, 20 – 11 образцов (рис. 2);

– разрушение вследствие превышения напряжений в арматуре предела текучести арматуры f_{ydb} , 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.

Следует заметить, что образцы серии – АН-V-100 (имеющих высоту бетона 100 мм), являлись переходными относительно видов разрушения: они разрушались как вследствие разрушения связей сцепления, так и вследствие разрыва арматуры.

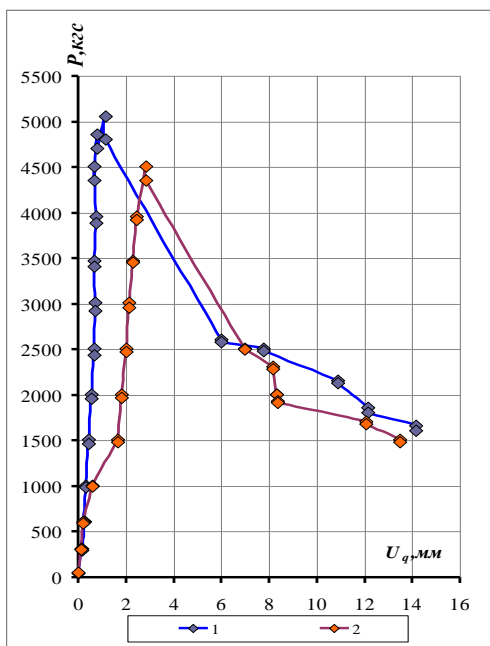


Рисунок 2 – Разрушение вследствие разрыва арматуры при выдергивании в образце АН-V-300-13

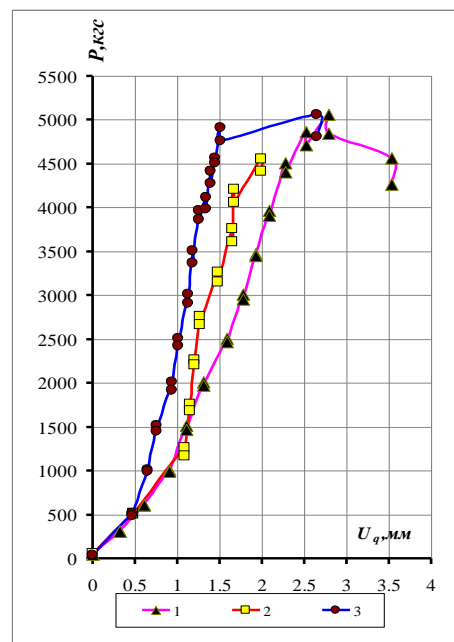
Характерным при разрушении по телу арматуры является одновременное разрушение бетона около-арматурной зоны у торца образца.

На основании выполненных экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном при

выдергивании арматурного стержня построены графики зависимости выдергивающего усилия P от взаимных смещений арматуры относительно бетона U_q (рис. 3).



а) 1 – образец АН-V-100-5; 2 – образец АН-V-75-3



б) 1 – образец АН-V-100-6; 2 – образец АН-V-150-7; 3 – образец АН-V-250-11

Рисунок 3 – Графики зависимости выдергивающего усилия P от взаимных смещений арматуры относительно бетона U_q : а – при разрушении вследствие нарушения сцепления; б – при разрушении вследствие разрыва арматуры

Полученные графики зависимости выдергивающего усилия P от взаимных смещений арматуры относительно бетона U_q для элементов, разрушенных вследствие нарушения связей сцепления (рис. 3) показывают, что максимальное значение выдергивающего усилия повышается с увеличением (заанкеривания) высоты бетона, для образцов серии (по сравнению со средним значением разрушающего усилия P для образцов серии АН-V-50, табл. 1):

- АН-V-75-3,4 на 164,4% и 164,3% соответственно;
- АН-V-100-5 – на 173,4 %.

Также данные графики характеризуются наличием двух ветвей: восходящей и нисходящей, и, что, примечательно, наличием прямого участка между ними, которые присутствуют в зависимостях сцепления, представленных в работах [1–4].

Восходящая ветвь характеризуется практически пропорциональным относительно небольшим (по сравнению со второй ветвью) ростом взаимных смещений арматуры относительно бетона с увеличением выдергивающего усилия P , который для всех образцов находится в пределах от 1 до 2,8мм, тогда как прирост взаимных смещений по всей длине нисходящей ветви составил – от 9,5мм до 13мм. При этом с увеличением нагрузки на торце бетона постепенно образуются, развиваются и раскрываются трещины сначала в районе околоарматурной зоны с дальнейшим их продолжением и раскрытием вплоть до выхода на боковые грани образцов. Ширина раскрытия трещин для образцов представлена в табл. 1.

Таблиця 1 – Значення P_{cre} , a_{cre} , P_{fail} , P_u , C , полученных в результате испытаний

Наименование образца	Усилие трещино-образования P_{cre} , кН	Ширина раскрытия трещин, a_{cre} , мм	Разрушающее усилие P_{fail} , кН	Предельное усилие, (со отв. $U_{q,u}$), P_w , кН	Жесткость, C , кН/м
АН-V-50-1	12,89	2,5-3,5	26,11	25,86	15725
АН-V-50-2	12,33	0,3-1,0	28,36	27,36	16456
АН-V-75-3	15,03	0,5-1,6	45,61	14,86	22943
АН-V-75-4	21,22	0,05-0,5	45,58	20,36	29845
АН-V-100-5	14,03	0,1-0,35	48,11	16,11	59764
АН-V-100-6	15,09	0,05-0,25	48,41	42,61	24788
АН-V-150-7	17,62	0,05-0,15	47,61	44,11	34178
АН-V-150-8	19,33	0,1-0,15	49,25	47,65	49896
АН-V-200-9	15,32	0,2-0,25	48,94	46,36	35952
АН-V-200-10	16,89	0,4-0,6	47,42	44,50	41269
АН-V-250-11	19,65	0,05-0,2	48,53	45,05	45913
АН-V-250-12	17,32	0,05-0,3	48,15	48,11	45394
АН-V-300-13	15,30	0,05-0,4	47,11	45,60	43569
АН-V-300-14	14,70	0,1-0,25	49,61	47,62	52698
АН-V-300-15	16,85	0,05-0,45	48,61	47,52	55365
АН-V-300-16	17,96	0,05-0,35	47,54	46,25	44352
АН-V-300-17	18,92	0,05-0,50	48,65	45,62	48960
АН-V-300-18	21,35	0,05-0,75	47,95	46,52	47058
АН-V-300-19	13,69	0,05-1,0	46,50	45,63	42369
АН-V-300-20	17,25	0,05-0,75	49,21	47,89	51659
В-VI-50-1	10,3	5,5-6,0	10,3	0,032	11130
В-VI-50-2	8,96	4,5-5,5	8,96	0,043	9555
В-VI-75-3	13,04	1,3-2,5	13,04	0,11	8526
В-VI-75-4	14,96	6,0-6,5	14,96	0,029	30101
В-VI-100-5	24,02	3,3-4,0	24,02	0,12	20547
В-VI-100-6	26,03	4,3-5,2	26,03	0,17	19267

При достижении определенного предельного значения нагрузки P_u наблюдался резкий прирост взаимных смещений арматуры U_q относительно бетона (который колеблется в пределах от 3,52 до 5,54 мм для всех образцов) вследствие нарушения связей сцепления арматуры с бетоном. При дальнейшем нагружении взаимные смещения только увеличивались, хотя наблюдалось уменьшение выдергивающей нагрузки и уменьшение сцепления при задании деформационного воздействия.

Графики зависимости выдергивающего усилия P от взаимных смещений арматуры относительно бетона U_q , построенные для образцов, которые разрушились вследствие разрыва арматуры имеют только восходящую ветвь и небольшой, практически прямой участок непосредственно перед резким разрушением образца. Наличие второго, прямого участка на графиках объясняется большим относительным удлинением арматуры, "текучестью", возникающими перед её обрывом. Следует отметить, что разрушение образцов вследствие разрыва арматуры происходило как во время задания активного нагружения, так и спустя некоторое время (от 2–20 мин) после задания нагружения. При разрушении от обрыва арматуры такого участка не наблюдалось.

Предельное выдергивающее усилие P_{fail} , возникающее перед нарушением связей сцепления арматуры с бетоном составило для образцов АН-V-50-1 – 26,11 кН; АН-V-50-2 – 28,36 кН; АН-V-75-3 –

45,61 кН; АН-V-75-4 – 45,58 кН; АН-V-100-5 – 48,11 кН, соответственно.

Предельное выдергивающее усилие P_{fail} , возникающее от разрыва арматуры составило для образцов АН-V-100-5 – 48,11 кН; АН-V-100-6 – 48,41 кН; АН-V-150-7 – 47,61 кН; АН-V-150-8 – 49,25 кН; АН-V-200-9 – 48,94 кН; АН-V-200-10 – 47,42 кН; АН-V-250-11 – 48,53 кН; АН-V-250-12 – 48,15 кН; АН-V-300-13 – 47,11 кН; АН-V-300-14 – 49,61 кН; АН-V-300-15 – 48,61 кН; АН-V-300-16 – 47,54 кН; АН-V-300-17 – 48,65 кН; АН-V-300-18 – 47,95 кН; АН-V-300-19 – 46,50 кН; АН-V-300-20 – 49,21 кН, соответственно.

Таким образом, предельное выдергивающее усилие перед нарушением связей сцепления арматуры с бетоном зависит от длины анкеровки и с ее увеличением – увеличивается: при анкеровке 50 мм составило $P_{fail}=27,235$ кН; при анкеровке 75 мм – 45,595 кН; при анкеровке 100 мм – $P_{fail}=48,11$ кН.

Предельное выдергивающее усилие P_{fail} , возникающее от разрыва арматуры для образцов практически не изменяется и составляет в среднем 48,23 кН.

Значения разрушающих усилий для образцов АН-V-75-3, АН-V-75-4, АН-V-100-5, полученные вследствие нарушения связей сцепления арматуры с бетоном, превысили значения усилия, вызывающего напряжения, превышающие расчетный предел текучести арматуры f_{yd} , которое для арматуры III 10мм класса А400С составляет 28,65 кН. Отсюда следует,

что арматура получила необратимые, пластические деформации до нарушения связей сцепления арматуры с бетоном, вызывающего резкое увеличение взаимных смещений арматуры относительно бетона. Это говорит о том, что в качестве ограничивающего фактора в разработанной математической модели (когда речь идет не о ширине раскрытия трещин, а о предельных возможностях сопротивления арматурных стержней) следует принимать не предел текучести арматуры f_{yd} , а временное сопротивление разрыву арматуры σ_s и предельные значения относительных продольных деформаций арматуры $\varepsilon_{s,us}$, соответствующие разрыву арматуры. Для диаграммы деформирования арматуры необходимо учитывать нелинейность ее работы путем введения дополнительной ветви в аналитическое выражение для арматуры в системе уравнений, приведенной в работе [3]. В то же время для диаграммы деформирования бетона и диаграммы сцепления необходимо введение уже дополнительных нисходящих участков деформирования [3, 5, 6].

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_s и составляющему для арматуры Ш 10мм класса А400С 46,3кН, что полностью соответствует физической стороне задачи. Превышение значения предельного разрушающего усилия P_{fail} объясняется тем, что временное сопротивление стали разрыву – это наименьшее гарантированное значение сопротивления, указанное в

нормах [7], полученное на основании испытаний определенного количества образцов на разрыв.

При этом следует добавить, что величина P_{fail} для таких образцов не зависит от высоты бетона образца (длины заанкеривания арматуры). К ним относятся образцы серии АН-V-100-6 и все остальные образцы серии АН с высотой бетона от 150 до 300мм.

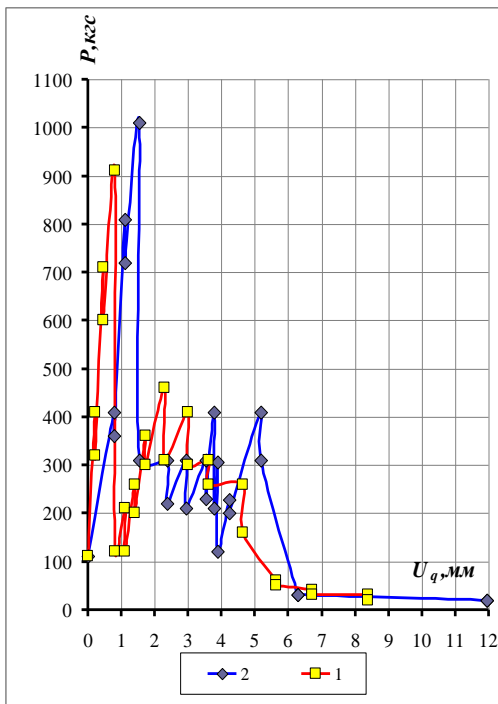
На основании выполненных экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном при вдавливании арматурного стержня построены графики зависимости вдавливающего усилия P от взаимных смещений арматуры относительно бетона U_q (рис. 4).

Для образцов, испытанных на вдавливание характерны две формы разрушения:

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

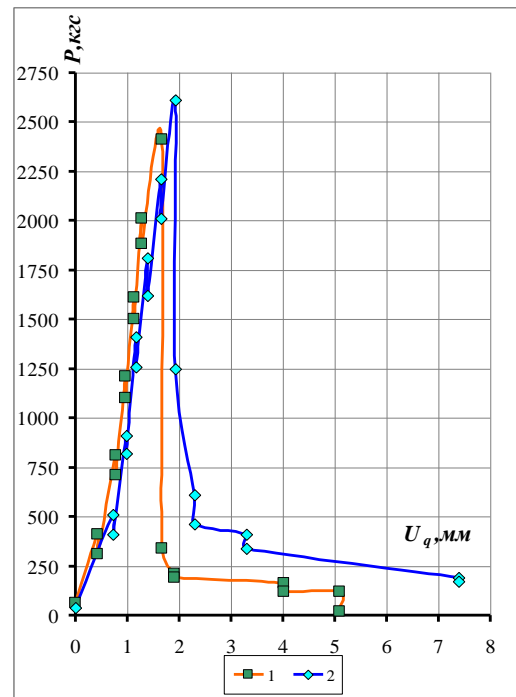
На полученных графиках (рис. 4) следует отметить наличие нескольких участков:

- восходящего, который характеризует практически прямо пропорциональный прирост взаимных смещений U_q при увеличении действующего усилия P , что соответствует начальной стадии загрузки, до появления первой трещины;



а)

1 – образец В-VI-50-1; 2 – образец В-VI-50-2



б)

1 – образец В-VI-100-5; 2 – образец В-VI-100-6

Рисунок 4 – Графики зависимости вдавливающего усилия P от взаимных смещений арматуры относительно бетона U_q

– первого нисходящего участка, характеризуемого резким уменьшением сжимающего усилия P , возникающего в результате появления первой нормальной трещины (рис. 4);

– следующего за нисходящим восходящего участка, характеризуемого увеличением воспринимаемого зоной сцепления образца сжимающего усилия P при относительно небольшом приросте взаимных смещений арматуры относительно бетона U_q ;

– второго нисходящего участка, характеризуемого постепенным снижением связей сцепления арматуры с бетоном, что проявляется в значительном увеличении взаимных смещений арматуры относительно бетона при постепенном снижении воспринимаемого зоной сцепления сжимающего усилия. Характерным при этом является то, что при задании нагрузки наблюдается односторонний рост взаимных смещений U_q без увеличения воспринимаемого зоной сцепления усилия P и уменьшение усилия P с течением времени выдерживания ступени.

Для образцов серии В-VI-100 характерным является отсутствие 3-го участка, описанного выше, т.е. после появления первой нормальной трещины наблюдается постепенное уменьшение воспринимаемого зоной сцепления образца усилия P при интенсивном росте взаимных смещений U_q .

Предельное сжимающее усилие P , вызывающее появление первой трещины в образцах увеличивалось с увеличением высоты бетона (длины заанкеривания арматуры) и составило для образцов: В-VI-50-1 – 10,1кН; В-VI-50-1 – 9,1 кН; В-VI-75-3 – 13,1 кН; В-VI-75-4 – 15,1 кН; В-VI-100-1 – 24,1кН и В-VI-100-2 – 26,1 кН, соответственно.

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. 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.

Анализируя результаты проведенных экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном при выдергивании и вдавливании следует отметить, что значения предельных разрушающих

усилий P_{fail} , при которых наблюдалось нарушение связей сцепления арматуры с бетоном, при выдергивании арматурного стержня оказались значительно больше, чем при вдавливании, что не соответствует результатам проведенных ранее экспериментальных исследований [1, 4, 8–10], которые свидетельствуют об обратном – сила сцепления арматуры с бетоном при сжатии превышает силу сцепления при растяжении (выдергивании) арматурного стержня из бетона.

Так, для образцов с высотой бетона 50 мм значения P_{fail} составили при выдергивании 26,11 и 28,36 кН, при вдавливании – 9,1кН и 10,1кН; для образцов с высотой бетона 75 мм при выдергивании значения P_{fail} составили 45,61 и 45,58 кН, при вдавливании – 13,1 и 15,1 кН; для образцов с высотой бетона 100мм разрушающая сила при выдергивании равна 48,15 и 48,41кН, при вдавливании – 24,1 и 26,1 кН. Как видим, значения P_{fail} при выдергивании превышают значения разрушающего усилия при вдавливании в диапазоне от 1,85 до 3,34 раз.

Это объясняется тем, что образцы, испытываемые на выдергивание ввиду конструктивных особенностей экспериментальной установки и способа задания выдергивающего усилия для предотвращения растрескивания бетона армировались дополнительной сеткой из из гладкой арматуры Ш6 мм класса А240С с размером ячейки 50мм, расположенной на расстоянии 30 мм от верхнего торца. Образцы для испытания на вдавливание не имели дополнительной арматуры.

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 нижеприведенной формуле и сравнить с результатами испытания (табл. 2).

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

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.

Таблица 2 – Определение предельных напряжений (усилий) сцепления и сравнение их с усилием, соответствующим временному сопротивлению разрыву

Наименование образца	Предельное напряжение сцепления (экспериментальное), τ_{gm} , МПа	Предельное усилие сцепления (экспериментальное), N_{gm} , кН	Временное сопротивление арматуры класса А400С, σ_{ep} , МПа	Усилие, соответствующее временному сопротивлению арматуры, N_{ep} , кН	Результат испытания
АН-V-50-1	16,62	26,11	590	46,31	$N_{gm} < N_{ep}$
АН-V-50-2	18,06	28,36	590	46,31	$N_{gm} < N_{ep}$
АН-V-75-3	19,36	45,61	590	46,31	$N_{gm} < N_{ep}$
АН-V-75-4	19,34	45,58	590	46,31	$N_{gm} < N_{ep}$
АН-V-100-5	15,31	48,11	590	46,31	$N_{gm} \approx N_{ep}$

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.

При выполнении условия $N_{gm} \approx N_{ep}$ (предельное экспериментальное усилие сцепления образца находится в пределах $\pm 1,05N_{ep}$), наблюдается либо разрушение выхода арматуры вследствие нарушения связей сцепления, либо разрыв арматурного стержня, что наблюдалось при испытании образцов АН-V-100-5, АН-V-100-6.

Вычисляя среднее арифметическое между полученными из эксперимента значениями τ_{gm} для образцов, представленных в табл. 2, определяем, что значение τ_{gm} для описанной ранее схемы армирования и конкретных принятых размеров, длины анкеровки, классов бетона и арматуры образцов серии АН-V составляет 17,32 МПа. Среднее значение τ_{gm} , применительно к каждой длине анкеровки составило 17,34 МПа (для анкеровки длиной 50 мм), 19,35 МПа (для анкеровки длиной 75 мм) и 15,31 МПа (для анкеровки длиной 100 мм).

Значение τ_{gm} удобно выразить через среднее нормативное сопротивление бетона растяжению f_{ctm} , которое для тяжелого бетона класса С16/20 равно 1,9 МПа. Таким образом, в ходе экспериментальных исследований установлено, что среднее (условное) экспериментальное предельное напряжение сцепления τ_{gm} для образцов, выполненных из тяжелого бетона класса С16/20 определяется по формуле (2):

$$\tau_{gm} = 9,115 \cdot f_{ctm} \quad (2)$$

Данное значение удобно использовать для прогнозирования характера разрушения образцов, изготавливаемых и испытываемых согласно методике проведения экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном.

Зависимость (2) в первом приближении (до получения соответствующих экспериментальных данных) можно использовать и для других классов бетона и арматуры. Также полученное значение τ_{gm} целесообразно использовать для сопоставления результатов проведенных численных экспериментальных исследований и верификации предлагаемой аналитической модели сцепления арматуры с бетоном [3, 5, 6].

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.

Таким образом, полученные экспериментальные данные в значительной мере дополняют накопленный экспериментальный материал, уточняют его, а некоторые результаты получены впервые: проведены испытания сцепления арматуры с бетоном при выдергивании/вдавливании арматурного стержня из бетона / в бетон с учетом ниспадающей ветви деформирования бетона и предоставляют возможность проверки предлагаемого расчетного аппарата, что позволяет более точно оценивать трещиностойкость элементов железобетонных конструкций и повысить экономический эффект при проектировании новых и обследовании существующих объектов.

ВЫВОДЫ. 1. Разработана методика проведения экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном с учетом деформационного воздействия при центральном и внецентренном растяжении арматурного стержня в представительном объеме бетона; 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.

Основной особенностью методики являются экспериментальные установки, позволяющие при задании нагружения вручную (по деформациям) получить ниспадающую ветвь деформирования испытуемой конструкции. Положение образцов, закрепляемых на установке, позволяет исследовать картину образования, раскрытия и распространения трещин по торцам конструкций под действием нагрузки.

2. Получены экспериментальные данные следующих основных параметров: усилия трещинообразования (в околоарматурной зоне) рассматриваемых элементов P_{cre} , разрушающего усилия P_{fail} , смещений арматурного стержня относительно бетона U_q при действии кратковременного деформационного нагружения P для построения опытных кривых; графики зависимости $P - U_q$, отображающие характер деформирования и трещинообразования экспериментальных образцов при выдергивании (вдавливании) арматурного стержня под нагрузкой при варьировании высоты бетона (длины заанкеривания арматуры в бетоне) с учетом ниспадающей ветви деформирования бетона (при деформационном нагружении).

3. На основании экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний на выдергивание были выявлены 3 вида разрушения образцов:

- разрушение вследствие выхода арматуры из бетона (нарушение связей сцепления арматуры с бетоном), характерное для образцов относительно малой длины заанкеривания арматуры в бетоне;
- разрушение вследствие превышения напряжений в арматуре предела текучести арматуры на растяжение f_{yb} разрыв арматуры – характерно для большинства испытанных образцов с длиной заанкеривания (высотой бетона) более 100мм;

– разрушение вследствие превышения напряжений в арматуре временного сопротивления арматуры на растяжение σ_{ep} , резкий разрыв арматуры – характерно для большинства испытанных образцов с длиной заанкеривания (высотой бетона) более 100 мм.

Для образцов, испытанных на вдавливание характерны две формы разрушения:

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

– 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.

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

Графики зависимости $P - U_q$ при вдавливании характеризуются наличием нескольких участков:

– восходящего с практически прямо пропорциональным приростом взаимных смещений U_q при увеличении действующего усилия P , что соответствует начальной стадии загрузки;

– первого нисходящего участка, характеризующего резким уменьшением сжимающего усилия P , возникающего в результате появления первой нормальной трещины;

– следующего за нисходящим, восходящего участка, характеризующего увеличением воспринимаемого зоной сцепления образца сжимающего усилия P при относительно небольшом приросте взаимных смещений арматуры относительно бетона U_q ;

– второго нисходящего участка, характеризующего постепенным снижением связей сцепления арматуры с бетоном, что проявляется в значительном увеличении взаимных смещений арматуры относительно бетона при постепенном снижении воспринимаемого зоной сцепления сжимающего усилия.

5. Значения предельных разрушающих усилий P_{fail} , при которых наблюдалось нарушение связей сцепления арматуры с бетоном, при выдергивании арматурного стержня оказались значительно больше (превышение в диапазоне от 1,85 до 3,34 раз), чем при вдавливании, что не соответствует результатам проведенных ранее экспериментальных исследований. Это объясняется тем, что образцы, испытываемые на выдергивание для предотвращения растрескивания бетона армировались дополнительной сеткой из гладкой арматуры Ш6 мм класса А240С с размером ячейки 50мм, расположенной на расстоянии 30 мм от верхнего торца. Образцы для испытания на вдавливание не имели дополнительной арматуры.

6. Для образцов, испытанных на выдергивание и разрушенных вследствие выхода арматуры получено среднее (условное) экспериментальное предель-

ное напряжение сцепления τ_{gm} , при которых происходит срыв связи арматуры с бетоном 17,32 МПа. При этом среднее значение τ_{gm} , применительно к каждой длине анкерования составило 17,34 МПа (для анкерования длиной 50 мм), 19,35 МПа (для анкерования длиной 75 мм) и 15,31 МПа (для анкерования длиной 100 мм). Данные значения удобно использовать для прогнозирования характера разрушения образцов, изготавливаемых и испытываемых согласно предлагаемой методике проведения эксперимента. Также полученное значение τ_{gm} может быть полезным при сопоставлении результатов проведенных численных экспериментальных исследований и верификации предлагаемой аналитической модели сцепления арматуры с бетоном.

7. Проведены испытания сцепления арматуры с бетоном при выдергивании (вдавливании) арматурного стержня из бетона (в бетон) при задании деформационного воздействия с учетом ниспадающей ветви деформирования бетона. Эти данные предоставляют возможность проверки предлагаемого расчетного аппарата, 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 проведении реконструкции существующих железобетонных конструкций зданий и сооружений.

8. Анализ экспериментальных данных, полученных для разных заделок, с помощью разработанной модели может стать основой для проверки существующих или создания новых моделей механизмов контактного взаимодействия анкера с бетоном.

9. 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). Что касается этого параметра, определенного 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. Для образцов серии В-VI-75 по сравнению со средним значением P_{crc} для образцов серии В-VI-50 прирост усилия трещинообразования составил 145,4 %, для образцов серии В-VI-100 – в 259,9 %.

Восходящая ветвь зависимости выдергивающего усилия P от взаимных смещений U_q характеризуется практически пропорциональным относительно небольшим (по сравнению со второй ветвью) ростом взаимных смещений арматуры относительно бетона с увеличением выдергивающего усилия P , который для всех образцов находится в пределах от 1 до 2,8 мм, тогда как прирост взаимных смещений по всей длине нисходящей ветви составил – от 9,5 мм до 13 мм.

Анализ экспериментальных данных сцепления арматуры с бетоном при деформационных воздей-

ствях при выдергивании и вдавливания арматурного стержня из бетона (в бетон) и сдвиге вдоль дискретной трещины с варьированием длины анкеровки, классов бетона (арматуры), диаметров арматуры и учетом нисходящей ветви деформирования может стать основой для проверки существующих или создания новых моделей контактного взаимодействия анкера с бетоном.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. 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. 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.

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

5. Конечно-элементное моделирование нелинейной плоской задачи сцепления бетона и арматуры в ПК Лири-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. Delgado C., Fargueta F., Fernandes-Prada M. A new finite element to analyze bond behaviour in the presence of transverse pressure // 5-th Int. Conf. AMCM – 2005.

9. Silva B.V., Barbosa M.P., Silva Filho L.C.P., Lorrain M.S. Experimental investigation on the use of steel-concrete bond tests for estimating axial compressive strength of concrete: Part 1 // Ibracon structures and materials journal. – 2013. – № 5. – Vol. 6 – P. 715–736.

10. Torre-Casanova A., Jason L., Davenne L., Pinelli X. Confinement effects on the steel-concrete bond strength and pull-out failure // Engineering Fracture Mechanics. – 2013. – Vol. 97. – P. 92–104.

THE MAIN RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH BOND ARMATURE WITH CONCRETE BY DEFORMATION EFFECT WITH DESCENDING BRANCH OF THE DEFORMATION

V. Kolchunov, I. Yakovenko, Ye. Dmytrenko

National Aviation University

prosp. Kosmonavta Komarova, 1, build. 5, class 5.510, Kiev, 03580, Ukraine. E-mail: i2103@ukr.net

Purpose. The experimental determination of the characteristics bond armature with concrete at short-term deformation loading mode with taking into account the descending branch of concrete deformation. **Results.** Experimental data obtained the following parameters: the efforts of cracking (in the vicinity of the armature area), breaking force, displacements of regarding concrete reinforcing bar under the influence of short-term strain loading. **Originality.** 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), taking into account the descending branch of the concrete deformation. It was revealed three types of detected pull-fracture samples during experiment: due to the destruction of the valve out of the concrete (violation of the bond armature connections with concrete), typical of relatively small samples of anchoring length of armature in the concrete; destruction due to excessive stress in the armature yield tensile strength of reinforcement, armature gap – is typical for the majority of samples tested with anchoring length (height concrete) over 100mm; destruction due to excessive stress in the armature of temporary reinforcement tensile strength, tear armatures – is typical for the majority of samples tested with anchoring length (height concrete) over 100mm. For samples the tested indentation fracture is characterized by two forms: due to the gradual destruction of adhesion bonds with concrete reinforcement and as a result, a gradual release of the concrete reinforcing bar; destruction due to cracking of concrete near armature zone indentation in the concrete reinforcement (violation relations clutch armature with concrete), characterized by a relatively small sample anchoring length of armature in concrete (concrete height). **Practical value.** The experimental data will be useful in the development of new, more advanced bond relations and improving adhesion on their basis of calculation methods of reinforced concrete constructions. References 10, figures 4, tables 2.

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

REFERENCES

1. Benin, A.V., Semenov, A.S., Semenov, S.G., and Melnikov, B.E. (2013) "Simulation of degradation of bond between reinforcing bar and concrete. Part 1. Models with account of the discontinuity", *Magazine of Civil Engineering*, no. 5, pp. 86–99.
2. Benin, A.V., Semenov, A.S., Semenov, S.G., and Melnikov, B.E. (2014) "The Simulation of Bond Fracture between Reinforcing Bars and concrete. Part 2. Models without taking the Bond Discontinuity into account", *Magazine of Civil Engineering*, no. 1, pp. 23–40.
3. Kolchunov, V.I., Yakovenko, I.A., and Dmytrenko, Ye.A. (2016) "Analytical model bond and nonlinear supple reinforcing relations with disclosure of discrete cracks in reinforced concrete constructions", *Resource-intensive materials, constructions, buildings and structures: collections of scientific works*, NUWMNRU, Iss. 32, pp. 183–196.
4. Cholmyanskiy, M.M. (1981), *Contact armaturi s betonom: monographiya* [Rebar contact with concrete: monograph], Stroyizdat, Moscow, USSR.
5. Kolchunov, V.I., Yakovenko, I.A., and Dmytrenko, Ye.A. (2016) "Finite element simulation of non-linear planar bond armature with concrete problem in the software package Lira-SAPR", *Promislove budivnictvo ta inzhenerni sporudy*, no. 3, pp. 6–15.
6. Kolchunov, V.I. (2016) "Analytical and finite element rod models of non-linear bond armature with concrete problem, it's comparison and analysis", *Mistobuduvannya ta territorialne planuvannya: nauk.-techn. zbirnik*, Iss. 60. – pp. 184–197.
7. "Concrete and reinforced concrete structures from heavy concrete. Design codes.: DSTU B.V.2.6-156:2010", (2011) *Kyiv, Minregionbud of Ukraine*.
8. Delgado, C., Fargueta, F., and Fernandes-Prada, M. (2015) "A new finite element to analyze bond behaviour in the presence of transverse pressure", *5-th Int. Conf. AMCM*.
9. Silva, B.V., Barbosa, M.P., Silva Filho, L.C.P., and Lorrain, M.S. (2013) "Experimental investigation on the use of steel-concrete bond tests for estimating axial compressive strength of concrete: Part 1", *Ibracon structures and materials journal*, no. 5, Vol. 6, pp. 715–736.
10. Torre-Casanova, A., Jason, L., Davenne, L. and Pinelli, X. (2013) "Confinement effects on the steel-concrete bond strength and pull-out failure", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 97, pp. 92–104.

Стаття надійшла 14.11.2016.