

УДК 624.012.45:624.023.87

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

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 выдергивающего (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.

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

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

**П**роблема сцепления арматуры с бетоном 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.

Проблема сцепления с учетом деформационного воздействия практически не изучалась. Тем не менее, она 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 зацеплением 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 %).



**В.И. Колчунов**

профессор кафедры компьютерных технологий строительства Национального авиационного университета, д.т.н., профессор



**И.А. Яковенко**

докторант кафедры компьютерных технологий строительства Национального авиационного университета, к.т.н., доцент



**Е.А. Дмитренко**

аспирант кафедры компьютерных технологий строительства Национального авиационного университета

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 5 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.

Особенность 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.

**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 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]. 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 являются 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:

- вследствие выхода арматуры из бетона (нарушение связей сцепления арматуры с бетоном), что 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);
- вследствие превышения напряжений в арматуре предела прочности на растяжение  $f_{yd}$ , резкий разрыв арматуры, что характерно для большинства испытанных образцов с длиной заанкеривания (высотой бетона) более 100 мм: 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);
- вследствие превышения напряжений в арматуре предела текучести арматуры  $f_{yd}$ , резкий разрыв арматуры, что характерно для большинства испытанных образцов с длиной заанкеривания (высотой бетона) более 100 мм: АН-V-250-12, АН-V-300-18 – 2 образца; АН-V-150-7, АН-V-300-19 – 2 образца.

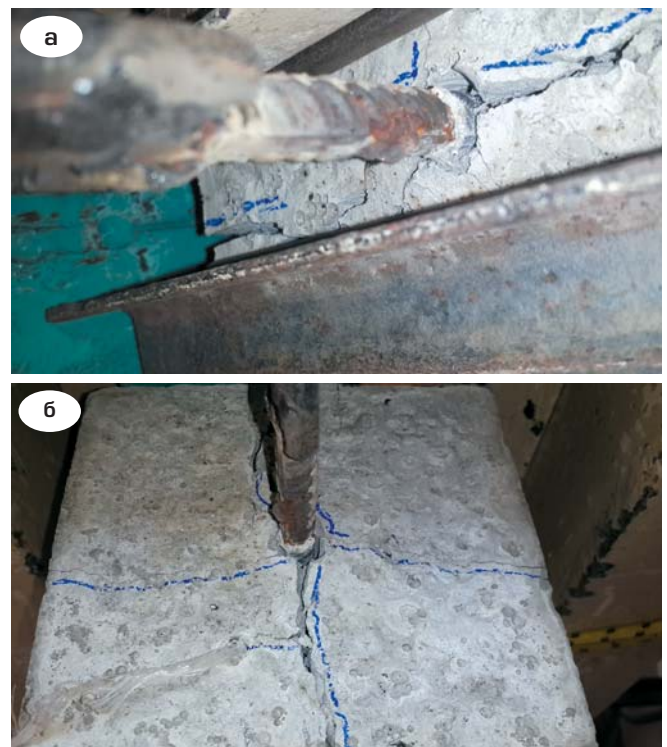


Рис. 1. Разрушение вследствие нарушения связей сцепления арматуры с бетоном при выдергивании в образце АН-V-50-1:

а – вид сбоку; б – вид сверху



Рис. 2.  
Разрушение вследствие  
разрыва арматуры  
при выдергивании  
в образце АН-V-300-13

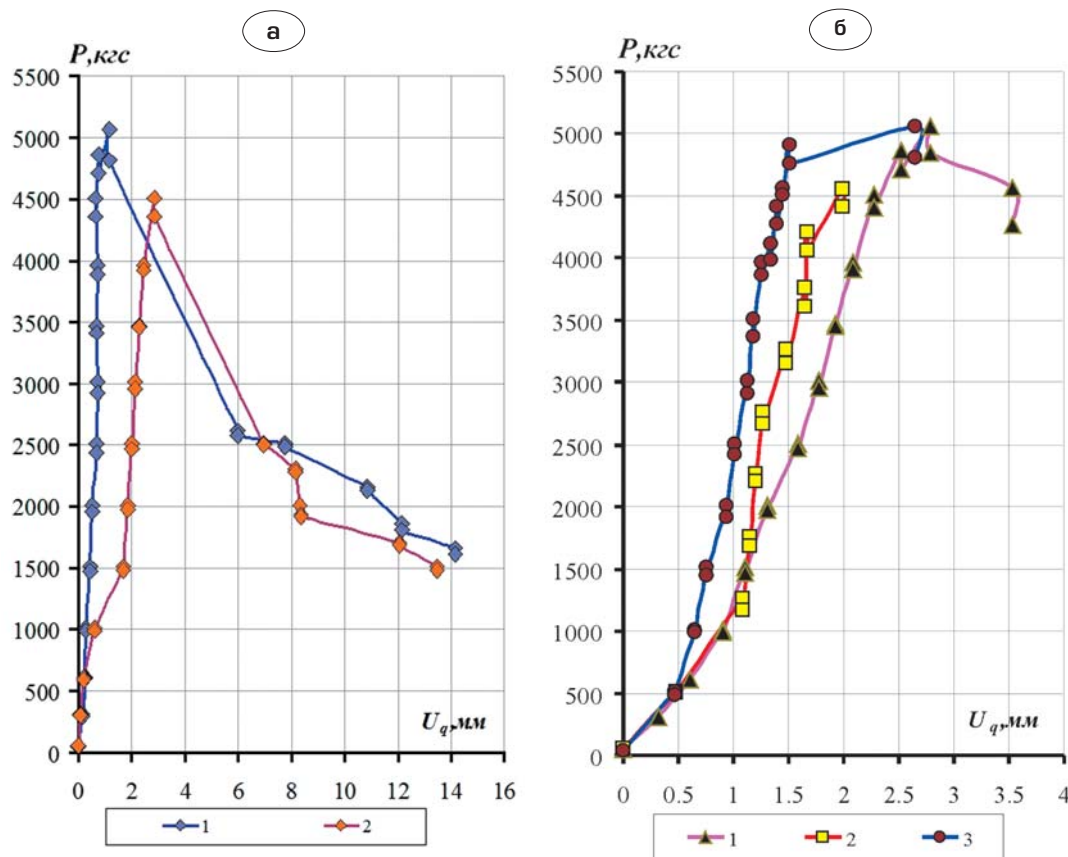


Рис. 3.  
Графики зависимости  
выдергивающего  
усилия  $P$  от взаимных  
смещений арматуры  
относительно бетона  $U_q$ :  
а – при разрушении  
вследствие нарушения  
сцепления;  
б – при разрушении  
вследствие разрыва  
арматуры

1 – АН-V-100-5; 2 – АН-V-75-3

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

Следует заметить, что образцы серии АН-V-100 (имеющих высоту бетона 100 мм) являлись переходными относительно видов раз-

рушения: они разрушались в результате как нарушения связей сцепления, так и разрыва арматуры.



Характерным при разрушении по телу арматуры является одновременное разрушение бетона околоарматурной 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).

Полученные графики для элементов, разрушенных из-за нарушения связей сцепления, 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, АН-V-75-4 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, 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 до 13 мм. 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 приведена в таблице 1.

Таблица 1

Значения  $P_{crc}$ ,  $a_{crc}$ ,  $P_{fail}$ ,  $P_u$ ,  $C$ , полученных в результате испытаний

Наименование образца	Усилие трещино-образования, $P_{crc}$ , кН	Ширина раскрытия трещин, $a_{crc}$ , мм	Разрушающее усилие $P_{fail}$ , кН	Предельное усилие, (соотв. $U_{q,u}$ ), $P_u$ , 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 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 (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.

Предельное выдергивающее усилие  $P_{fail}$ , возникающее от разрыва арматуры, составило для образцов, кН:

АН-V-100-5	– 48,11;	АН-V-100-6	– 48,41;
АН-V-150-7	– 47,61;	АН-V-150-8	– 49,25;
АН-V-200-9	– 48,94;	АН-V-200-10	– 47,42;
АН-V-250-11	– 48,53;	АН-V-250-12	– 48,15;
АН-V-300-13	– 47,11;	АН-V-300-14	– 49,61;
АН-V-300-15	– 48,61;	АН-V-300-16	– 47,54;
АН-V-300-17	– 48,65;	АН-V-300-18	– 47,95;
АН-V-300-19	– 46,50;	АН-V-300-20	– 49,21.

Таким образом, предельное выдергивающее усилие перед нарушением связей сцепления арматуры с бетоном зависит от длины анкеровки и с ее увеличением составляет: при анкеровке 50 мм –  $P_{fail} = 27,235$  кН; при анкеровке 75 мм –  $P_{fail} = 45,595$  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 Ø10 мм класса А400С составляет 28,65 кН. Отсюда следует, что арматура получила необратимые пластические деформации до нарушения связей ее сцепления 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  $\sigma_b$  и предельные значения относительных продольных деформаций  $\varepsilon_{s,u}$ , 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  $\sigma_b$  и составляющему для арматуры Ø10 мм класса А400С 46,3 кН, 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 300 мм.

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 как результат постепенного выхода арматурного стержня из бетона;
- вследствие раскалывания бетона околоарматурной зоны при вдавливании арматуры в бетон (нарушение связей сцепления арматуры с бетоном), что 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 следует отметить наличие нескольких участков (см. рис. 4):

- 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;

- 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. Характерным при этом является то, что при задании нагрузки наблюдается односторонний рост взаимных смещений  $U_q$  без увеличения воспринимаемого зоной сцепления усилия  $P$ , а также происходит уменьшение усилия  $P$  с течением времени выдержки на ступени.

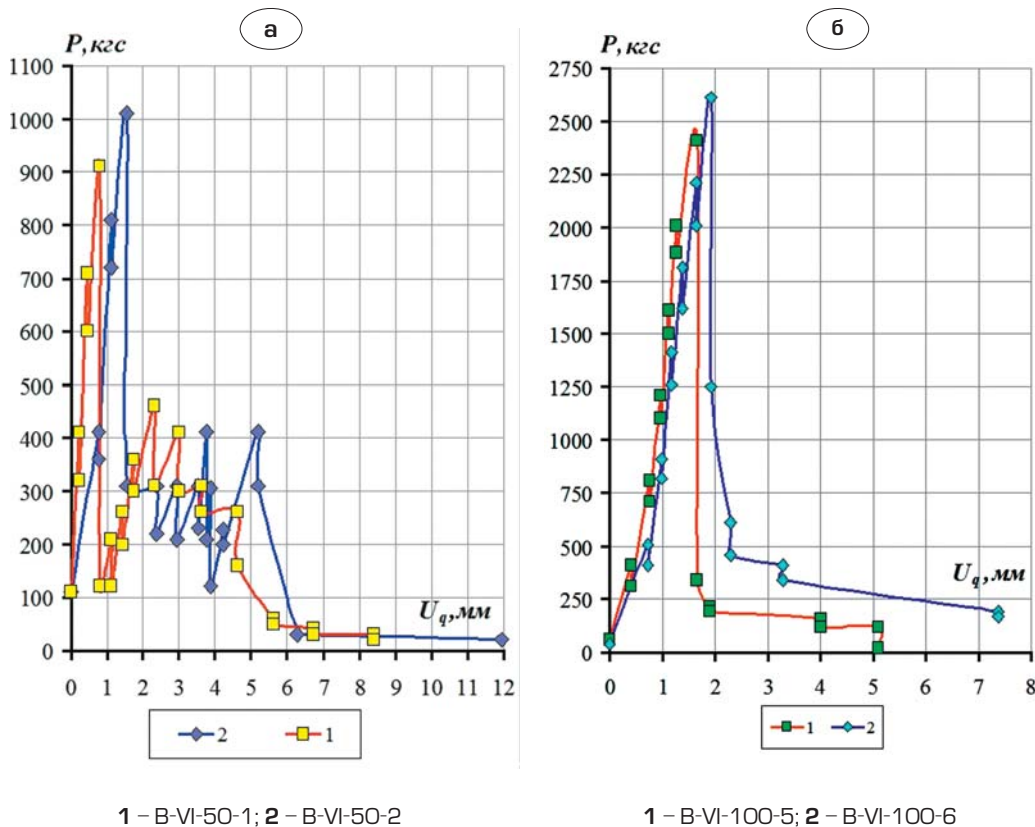


Рис. 4.  
Графики зависимости вдавливающего усилия  $P$  от взаимных смещений арматуры относительно бетона  $U_q$  для образцов В-VI-50-1; В-VI-50-2 (а) и В-VI-100-5; В-VI-100-6 (б)

Для образцов серии В-VI-100 характерно отсутствие 3-го участка, 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, кН: В-VI-50-1 – 10,1; В-VI-50-2 – 9,1; В-VI-75-3 – 13,1; В-VI-75-4 – 15,1; В-VI-100-1 – 24,1 и В-VI-100-2 – 26,1.

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 – 9,1 и 10,1 кН; для образцов с высотой бетона 75 мм при выдергивании 45,61 и 45,58 кН, при вдавливании – 13,1 и 15,1 кН; для образцов с высотой бетона 100 мм разрушающая сила при выдергивании равна 48,15 и 48,41 кН, 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 раза. 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 гладкой арматуры  $\varnothing 6$  мм класса А240С с размером ячейки 50 мм, 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  $\tau_{gm}$  по ниже приведенной формуле и сравнить с результатами испытания (табл. 2):

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

где  $N$  и  $\sigma_s$  – предельное усилие и напряжение в стержне соответственно;  $A_s$ ,  $d_s$  и  $l$  – площадь поперечного сечения, средний диаметр и длина забетонированного стержня.

При выполнении условия  $N_{gm} < N_{\partial p}$  (предельное экспериментальное усилие сцепления образца, выведенное из формулы (1), меньше усилия, соответствующего временному сопро-

Таблица 2

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

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



тивлению арматуры) наблюдается разрушение образцов вследствие нарушения связей сцепления арматуры с бетоном.

При выполнении условия  $N_{gm} \approx N_{\theta p}$  (предельное экспериментальное усилие сцепления образца находится в пределах  $\pm 1,05 N_{\theta p}$ ) происходит 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  $\tau_{gm}$  для образцов, представленных в таблице 2, определяем, что для описанной ранее схемы армирования и конкретных принятых размеров, длины анкеровки, классов бетона и арматуры образцов серии АН-V  $\tau_{gm}$  составляет 17,32 МПа. Среднее значение  $\tau_{gm}$ , применительно к каждой длине анкеровки составило 17,34 МПа для анкеровки длиной 50 мм, 19,35 МПа – длиной 75 мм и 15,31 МПа – для анкеровки длиной 100 мм.

Значение  $\tau_{gm}$  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  $\tau_{gm}$  для образцов, выполненных из тяжелого бетона класса С16/20, определяется по формуле

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

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  $\tau_{gm}$  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 выполнить проверку рабочих гипотез и достоверности расчетной методики определения ширины раскрытия трещин, усилия закрытия трещин, жесткости арматур-

ного 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. Впервые проведенные испытания сцепления арматуры с бетоном при выдергивании/вдавливании арматурного стержня из бетона/в бетон с учетом ниспадающей ветви деформирования бетона 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.

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 испытываемой конструкции. Положение образцов, закрепляемых на установке, позволяет исследовать картину образования, раскрытия и распространения трещин по торцам конструкций под действием нагрузки.

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.



Анализ экспериментальных данных сцепления арматуры с бетоном при деформационных воздействиях при выдергивании и вдавливаниях арматурного стержня из бетона (в бетон) и сдвиге вдоль дискретной трещины с варьированием дли-

ны 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.

- [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] 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 // Ресурсо-экономні 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.М. Холмянский. – М.: Стройиздат, 1981. – 184 с.
- [5] Колчунов В.И. Конечнo-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.: Мінгепіонбуд 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. Experimental investigation on the use of steel-concrete bond tests for estimating axial compressive strength of concrete: Part 1 / B. V. Silva, M. P. Barbosa, L. C.P. Silva Filho, M.S. Lorrain // 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, pp. 92–104.

Надійшла 07.11.2016 р.

## В АКАДЕМІЇ БУДІВНИЦТВА УКРАЇНИ

**У листопаді ц.р. в Академії будівництва України відбулися загальні збори, на яких були підведені підсумки роботи Академії протягом 2014–2016 рр.**

Зазначено, що протягом звітнього періоду діяльність президії Академії та її відділень була направлена на підвищення рівня конкурентоспроможності будівельної галузі, розроблення новітніх методів енергоощадження та енергоефективності, вдосконалення технології малоповерхового будівництва, покращення структури Академії, підготовку та внесення пропозицій до Закону України «Про освіту» в частині реформування інженерної освіти в Україні тощо.

З метою більш оперативного вирішення нагальних питань будівельної галузі і промисловості будівельних матеріалів створені нові територіальні та галузеві відділення.

Академія щорічно видає «Вісник», науково-технічні збірки «Будівництво. Наука. Проекти. Економіка», «Техніка будівництва», який є фаховим.

За звітний період 79 членів Академії удостоєно звання лауреатів Премії імені академіка М.С. Буднікова, 7 членів Академії успішно захистили свої роботи і здобули звання «доктора будівництва» Академії будівництва України.

Заслухавши і обговоривши звітну доповідь президії, загальні збори вирішили наступне:

- ✓ Роботу президії за звітний період визнати задовільною.
- ✓ Керівникам галузевих і територіальних відділень:
  - обговорити у відділеннях завдання і напрямки, викладені у звітній доповіді президента Академії Назаренка І.І.;
  - підвищити ефективність науково-технічної роботи відділень;
  - надавати інформацію до виконавчого органу Академії про стан та нагальні питання галузі у регіонах, а також пропозиції щодо розвитку будівельної галузі.
- ✓ Затвердити новий склад президії та нову редакцію Статуту Академії будівництва України.