

УДК 624.012.46

ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ С БЕТОНОМ АРМАТУРЫ РАЗЛИЧНОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

*А.А. ХОТЬКО, канд. техн. наук, доц. Ю.В. ПОПКОВ
(Полоцкий государственный университет)*

Представлены результаты исследования сцепления с бетоном арматуры, проведенные с целью разработки методики расчета анкеровки с учетом влияния особенностей геометрических параметров различного ее периодического профиля. Предложены уточнения нормативной методики расчета анкеровки арматуры с учетом вида периодического профиля.

Совместная работа арматуры и бетона возможна только при наличии надежного сцепления между ними. Периодический профиль арматуры – один из основных факторов, влияющих на сцепление. За оценку влияния параметров периодического профиля стержневой арматуры на сцепление с бетоном обычно принимается отношение высоты поперечных выступов к их шагу h_b/t и величина относительной площади смятия f_R (критерий Рэма), равная отношению площади смятия к площади контакта арматуры с бетоном [1, 4].

$$f_R = \frac{F_R}{\pi d_n t}, \quad (1)$$

где F_R – площадь проекции боковой поверхности поперечных ребер на плоскость, перпендикулярную оси арматурного стержня; d_n – номинальный диаметр стержня; t – шаг поперечных выступов.

Для армирования железобетонных конструкций используется арматура с различными видами периодического профиля (кольцевым, серповидным, винтовым и др.), отличающаяся значениями параметра f_R и отношением h_b/t в несколько раз. Расчет анкеровки арматуры в железобетонных конструкциях производится по методике СНБ 5.03.01, которая, в отличие от методики расчета анкеровки по СНиП 2.03.01-84*, построена более логично, обоснованно и принципиально не отличается от методик ряда других стран. Базовая длина анкеровки ненапрягаемых стержней (l_b), согласно СНБ 5.03.01, вычисляется по формуле:

$$l_b = \left(\frac{\emptyset}{4}\right) \left(\frac{f_{yd}}{f_{bd}}\right), \quad (2)$$

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

Таким образом, расчет производится с использованием такого основного параметра, характеризующего сцепление, как напряжение сцепления f_{bd} . Однако сама величина f_{bd} вычисляется по эмпирической формуле и не зависит от параметров профиля арматуры:

$$f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ctd}, \quad (3)$$

где f_{ctd} – расчетное сопротивление бетона растяжению; η_1 – коэффициент, учитывающий влияние условий сцепления и положение стержней при бетонировании; η_2 – коэффициент, учитывающий влияние диаметра стержня; η_3 – коэффициент, равный 2,25 – для арматуры периодического профиля [3].

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

Цель данной работы – разработка наиболее приближенной к опытным данным методики расчета анкеровки арматуры в железобетонных конструкциях, учитывающей вид периодического профиля арматуры.

Эффективность сцепления обычно определяют по результатам испытаний стержней на вытягивание из бетона. При проведении таких опытов важно было бы установить влияние параметра l_{II} на эффективность сцепления стержней периодического профиля. По результатам испытаний А.Р. Clarek прослеживается достаточно четкая линейная зависимость возрастания максимальных напряжений в стержнях (примерно до 400 МПа) с увеличением l_{II} до 0,07, после чего рост их замедляется, а при $f_H > 0,8$

наблюдается даже тенденция к их снижению. Аналогичные результаты были получены при испытании стержней 055 мм, проведенном Н.М. Мулиным совместно с Т.Ж. Жунусовым.

По способу взаимодействия с бетоном ряд исследователей выделяют два типа профиля арматуры. Если расстояние между выступами превышает их высоту примерно в 10 раз ($\{h_b/t \sim 0,1\}$), частично раскрошенный бетон может образовывать клин под выступом, и разрушение обычно происходит вследствие растрескивания окружающего бетона. Периодические профили, у которых сцепление обеспечивается в основном работой бетона на сдвиг, представляют собой стержни, имеющие на поверхности впадины небольших размеров или часто расположенные выступы [1, 5, 6, 7, 8].

Решить задачу определения напряженно-деформированного состояния железобетонного элемента на участке активного сцепления (участка, на котором осуществляется передача усилий с арматуры на бетон) призвана теория сцепления, разработкой различных вариантов которой занимались М.М. Холмянский, А.А. Оатул, Н.И. Карпенко и др. Наиболее значительный вклад в теорию сцепления арматуры с бетоном внес М.М. Холмянский [5].

В основу теории положено утверждение о том, что напряжения сцепления τ_{bond} определяются только величиной смещения g . Эту зависимость, определяемую экспериментальным путем, называют законом сцепления.

Рядом исследователей предлагались различные варианты аналитической формы связи силовых τ_{bond} и геометрических g величин. Однако наиболее точные результаты дает так называемый «нормальный закон» сцепления, соответствующий наблюдаемому экспоненциальному характеру роста смещений g :

$$\tau_{bond} = B \cdot \frac{\ln(1 + \alpha \cdot g)}{1 + \alpha \cdot g}, \quad (4)$$

где B и α – параметры закона сцепления, определяемые экспериментальным путем.

Несмотря на большое количество работ, все они посвящены исследованию сцепления с бетоном арматуры кольцевого периодического профиля. Поэтому для достижения поставленной цели необходимы сравнительные экспериментальные данные по сцеплению с бетоном арматуры различного вида периодического профиля.

Для решения данной задачи нами проведены испытания на вытягивание арматурных стержней $\varnothing 25$ мм класса S500 с кольцевым, серповидным и винтовым периодическими профилями из бетонных кубов. Опытные образцы с арматурой серповидного и кольцевого профилей, кроме того, имели различные значения высоты поперечных выступов арматуры (рис. 1, табл. 1) и различную величину заделки арматуры в бетон ($5\varnothing, 7\varnothing, 8\varnothing$ и $11\varnothing$).

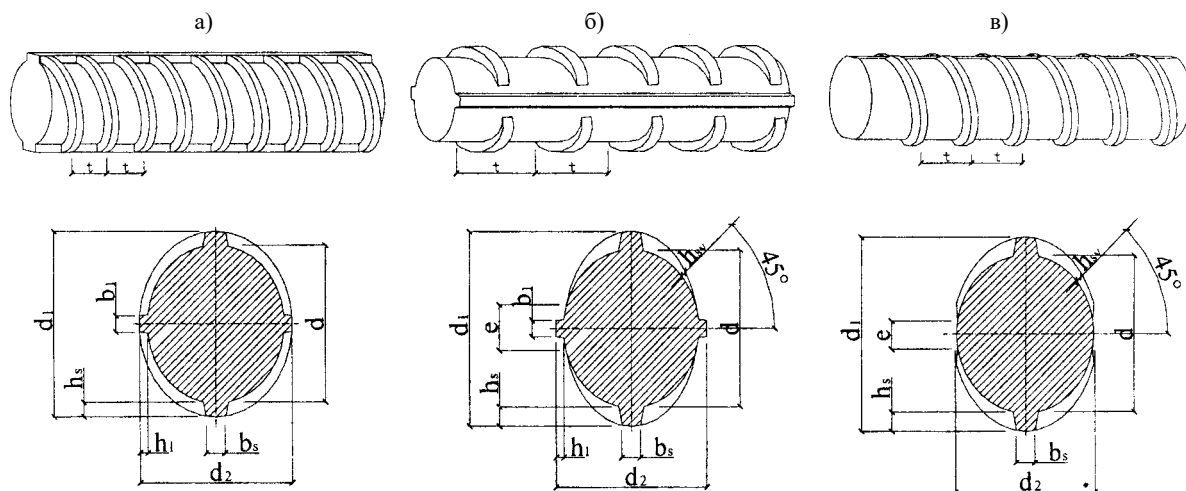


Рис. 1. Виды применяемых профилей арматуры:
 а - кольцевой профиль; б - серповидный профиль; в - винтовой профиль

Проектирование опытных образцов производилось так, чтобы удовлетворять требованиям рекомендаций РИЛЕМ/ЕКБ/ФИП РС 6. Опытный образец для испытания на сцепление представлял собой центрально армированную бетонную призму с размерами поперечного сечения 300×300 мм. Высота призмы варьировалась в зависимости от величины заделки арматуры в бетон.

Таблица I

Параметры профилей арматуры опытных образцов

Вид периодического профиля	d_n	e	t	h_1	h_x	h_{xy}	b_1	b_x	α , град
	мм								
Кольцевой	25	–	8,6	1,5	2,1	1,79	2,7	1,8	75
	25	–	8,6	1,5 ± 0,1	1,5 ± 0,1	1,5 ± 0,1	2,7	1,8	75
	25	–	8,6	0,6	0,6	0,6	2,7	1,8	75
Серповидны	25	5,6	17,5	2,1	2,5	1,7	3,2	2,2	60
	25	5,6	17,5	1,3	1,3	1,3	3,2	2,2	60
	25	5,6	17,5	0,8 ± 0,1	0,8 ± 0,1	0,8 ± 0,1	3,2	2,2	60
Винтовой	25	6,0	11,5	–	2,0	1,5	–	3,8	75

Подбор состава бетона произведен в соответствии с «Руководством по подбору состава бетона» для бетона класса С16/20. Водоцементное отношение В/Ц = 0,5. Для приготовления смеси использовался цемент марки ПЦ500/ДО Волковысского цементного завода. В качестве заполнителя использовали промытый гранитный щебень фракции 5...20 мм Микошевичского завода (объемная масса в сухом состоянии - 1400 кг/м³; влажность - 0,3 %; содержание пылевидных и глинистых частиц - 1,6 %); кварцевый песок из карьера «Боровое» Витебской области с модулем крупности МК 2,2 (объемная масса в сухом состоянии - 1550 кг/м³; влажность - 3,5 %).

Укладка бетона производилась параллельно оси арматурного стержня. Уплотнение бетонной смеси при укладке в форму осуществлялось с помощью глубинного вибратора. После уплотнения бетона образцы выдерживались в течение 3-х суток под слоем влажных опилок. После распалубки хранились в естественных условиях.

Для построения диаграммы растяжения исследуемой арматуры испытаны образцы арматурных стержней. Среднее значение предела текучести для пяти опытных образцов арматуры $a_y = 509,3$ МПа; временное сопротивление $\sigma_t = 616,8$ МПа.

Для определения прочностных характеристик бетона изготовлены и испытаны кубы с размерами ребер 100x100x100 мм и призмы с размерами ребер 100x100x400 мм в соответствии с ГОСТ 1080-78 «Бетоны. Методы определения прочности на сжатие и растяжение». Призмы при бетонировании и твердении находились в тех же условиях, что и основные образцы. Призменная прочность бетона по результатам испытаний составила 24,5 МПа в возрасте 28 суток.

Испытания проводились на разрывной машине Р50. Для обеспечения надежного крепления арматуры в захватах со стороны загружаемого конца предусматривался выпуск арматуры из бетона.

Бетонный образец фиксировался при помощи системы траверс, 4-х тяжей и зажимов к подвижному захвату разрывной машины так, чтобы свободный конец арматуры проходил между нижними фиксирующими траверсами и закреплялся в неподвижном захвате разрывной машины (рис. 2). Перед нагружением производилось центрирование образца. Опирали образец на траверсу - насухо, через стальную опорную пластину с центральным отверстием диаметром 175 мм. Это обеспечивает практически полное свободное проявление деформаций нижних горизонтальных сечений бетона. Усилия прикладывались к стержню этапами с разностью в 10...20 кН и выдерживалась на каждом этапе в течение 3 минут. В процессе испытаний контролировались: максимальное усилие, при котором сцепление не нарушено; относительные деформации арматуры по длине заделки и деформации нагруженного и ненагруженного концов арматуры относительно бетона.

В результате экспериментальных исследований была выявлена зависимость нормальных напряжений на нагруженном конце арматурного стержня от вида периодического профиля

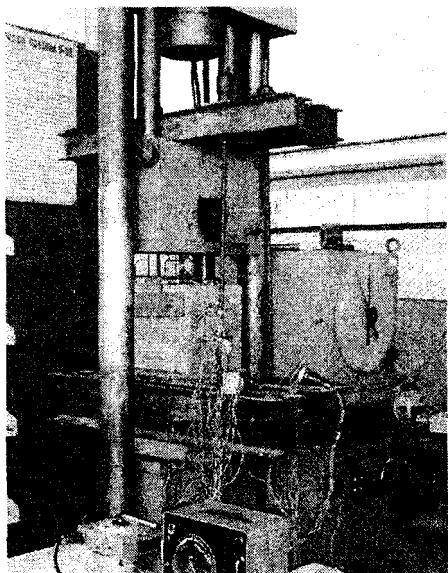
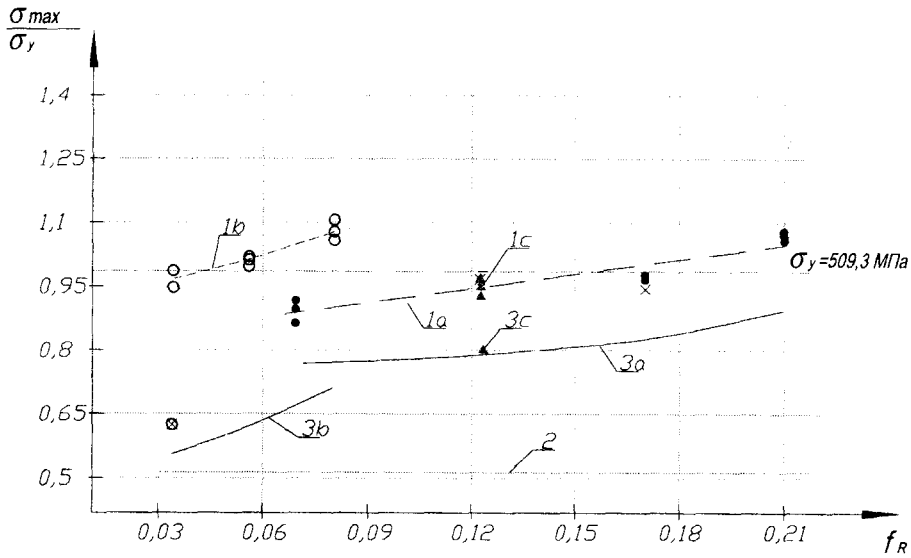
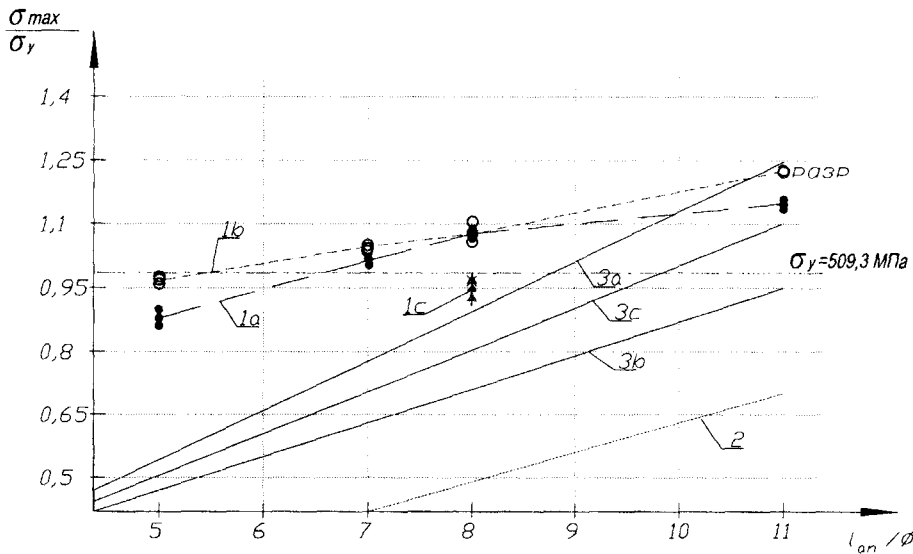


Рис. 2. Общий вид испытательной установки арматуры и от длины анкеровки (рис. 3, 4).



1- Опытные данные: 1a — ● — — — арматура с кольцевым профилем
 1b — ○ — — — арматура с серповидным профилем
 1c — ▲ — — — арматура с винтовым профилем
 ▲ ● ○ — проскальзывание арматурного стержня
 * × ⊗ — раскол бетонного куба
 2, 3 — Расчетные данные: 2 — по методике СНБ 5.03.01
 3 — по методике Холмянского М.М. 3a — для арматуры кольцевого профиля; 3b — для арматуры серповидного профиля; 3c — для арматуры винтового профиля

Рис. 3. Влияние профиля на максимальные напряжения в арматуре в момент нарушения ее сцепления с бетоном



1- Опытные данные: 1a — ● — — — арматура с кольцевым профилем
 1b — ○ — — — арматура с серповидным профилем
 1c — ▲ — — — арматура с винтовым профилем
 ▲ ● ○ — проскальзывание арматурного стержня
 * — раскол бетонного куба; ОРАЗР — разрыв арматуры
 2, 3 — Расчетные данные: 2 — по методике СНБ 5.03.01
 3 — по методике Холмянского М.М. 3a — для арматуры кольцевого профиля; 3b — для арматуры серповидного профиля; 3c — для арматуры винтового профиля

Рис. 4. Влияние длины анкеровки на максимальные напряжения в арматуре в момент нарушения ее сцепления с бетоном

Максимальные напряжения на загруженном конце арматуры кольцевого профиля с увеличением f_R от 0,07 до 0,21 возрастают по линейной зависимости от 448 МПа до 549 МПа, что соответствует экспериментальным данным, полученным многими авторами. Этой зависимости соответствуют и экспериментальные данные, полученные для случая с арматурой винтового периодического профиля. Данные испытаний образцов с арматурой серповидного профиля не согласуются с утверждениями о линейной зависимости между максимальными напряжениями и относительной площадью смятия профиля арматуры. Согласно этой зависимости, напряжения на загруженном конце арматуры серповидного профиля в момент нарушения сцепления должны быть значительно меньше напряжений на загруженном конце арматуры кольцевого профиля, имеющей значение относительной площади смятия в несколько раз больше аналогичного параметра для арматуры серповидного профиля. Опытные значения максимальных напряжений на загруженном конце арматуры серповидного профиля с увеличением f_R от 0,037 до 0,08 возрастают от 497 МПа до 552 МПа. Это можно объяснить отличительным принципом работы в бетоне арматуры серповидного профиля. Действительно, согласно исследованиям Г. Рэма и других ученых, нарушение сцепления с бетоном арматуры кольцевого профиля, имеющей отношение $h_b/t = 0,24$, происходит в результате среза бетонных консолей, заключенных между поперечными выступами, в то время как в случае с арматурой серповидного профиля с отношением $h_b/t = 0,14$ - в результате раздробления окружающего бетона.

Максимальные напряжения в арматуре, вычисленные по методике СНБ 5.03.01, не зависят от параметра l_c и составляют для данных условий испытания 257,5 МПа, что в 2 раза меньше опытных значений.

По предложенному М.М. Холмянским алгоритму подбора параметров закона сцепления, используя экспериментальные данные при описанных выше характеристиках бетона, арматуры, способе изготовления, армировании, виде нагружения, были определены параметры нормального закона сцепления для арматуры рассматриваемых профилей (табл. 2).

Таблица 2

Параметры нормального закона сцепления для опытных образцов арматуры

Вид профиля	Диаметр арматуры \varnothing , мм	Высота поперечного выступа h_s , мм	Относительная площадь смятия f_R	Фактическая прочность бетона f_c , МПа	α , см ⁻¹	B , МПа
Винтовой	25	2,0	0,123	24,5	75,4	36,0
Кольцевой		2,1	0,21		88,5	40,1
Кольцевой		1,5	0,168		75,38	36,0
Кольцевой		0,6	0,07		34,7	34,8
Серповидный		2,5	0,08		23,6	28,7
Серповидный		1,3	0,056		25,1	27,5
Серповидный		0,8	0,038		27,3	24,8

Расчетные значения максимальных напряжений, определенные по методике М.М. Холмянского с использованием полученных параметров закона сцепления, также не соответствовали опытным данным. Процент недооценки опытных значений составил *15 % для арматуры кольцевого профиля и »30 % для арматуры серповидного профиля.

Анализ построенных по результатам исследований зависимостей максимальных напряжений на загруженном конце арматуры от величины заделки стержня в бетон показал несоответствие расчетных данных, вычисленных и по методике М.М. Холмянского, и по методике СНБ 5.03.01, опытным данным (см. рис. 4). Главным недостатком расчетных методик является наличие в них линейной зависимости между максимальными напряжениями в арматуре и длиной ее заделки в бетон, которая не обнаружена в опытах. Такую же нелинейную зависимость, характерную для арматуры больших диаметров (> 10 мм), наблюдал в своих экспериментах и М.М. Холмянский.

Расчет анкеровки по существующей нормативной методике может быть уточнен, если установить влияние вида периодического профиля и длины анкеровки на коэффициент η_3 в формуле для расчета среднего значения предельного напряжения сцепления по контакту арматуры с бетоном, принимаемый в СНБ 5.03.01 для арматуры периодического профиля равным 2,25. Для этого, используя полученные опытные значения максимальных напряжений на загруженном конце арматуры, для всех образцов по формуле (5) можно определить требуемые значения коэффициента η_3 :

$$\eta_3 = \frac{\sigma_{s, \max} \cdot \varnothing}{4 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ct} \cdot l_{an}} \quad (5)$$

Определенные таким образом значения коэффициентов сведены в табл. 3. По найденным значениям строим графики зависимости коэффициента η_3 от профиля арматуры и от длины заделки арматуры в бетон (рис. 5, 6).

Таблица 3

Опытные значения коэффициента η_3

Вид профиля	h_s , мм	f_R	l_{an} , мм	$\sigma_{S,max}$, МПа	f_{ct} , МПа	η_3 , по СНБ 5.03.01-02	η_3 , опытное			
Винтовой	2,0	0,123	200	481	5,11	2,25	4,2 (раскол)**			
	2,03	0,124		490			4,28			
	2,0	0,123		489			4,27			
Кольцевой	2,1	0,21		545			4,76			
	2,1	0,21		550			4,81			
	2,1	0,21		553			4,83			
Кольцевой	1,49	0,165		483			4,2 (раскол)**			
	1,53	0,17		499			4,36			
	1,5	0,168		498			4,35			
Кольцевой	0,60	0,07		448			3,91			
	0,58	0,069		450			3,93			
	0,6	0,07		445			3,89			
Кольцевой	2,1	0,21		125			445	5,11	2,25	6,22
	2,1	0,21					448			6,26
	2,1	0,21					446			6,23
Кольцевой	2,1	0,21	275	594	3,77					
	2,1	0,21		590	3,75					
	2,1	0,21		592	3,76					
Кольцевой	2,1	0,21	175	519	5,18					
	2,1	0,21		520	5,19					
	2,1	0,21		517	5,16					
Серповидный	2,5	0,08	200	555	5,11	2,25	4,85			
	2,5	0,08		550			4,81			
	2,5	0,08		552			4,82			
Серповидный	1,29	0,055		519			4,53			
	1,30	0,056		520			4,54			
	1,31	0,058		517			4,52			
Серповидный	0,80	0,038		500			4,37			
	0,81	0,038		326			2,9 (раскол)**			
	0,78	0,035		495			4,32			
Серповидный	2,5	0,08		125			495	5,11	2,25	6,92
	2,5	0,08					498			6,96
	2,5	0,08					495			6,92
Серповидный	2,5	0,08		175			535			5,34
	2,5	0,08					536			5,35
	2,5	0,08					536			5,35
Серповидный	2,5	0,08	275	618	3,9 (разрыв)*					
	2,5	0,08		616	3,9 (разрыв)*					
	2,5	0,08		616	3,9 (разрыв)*					

Примечание. * – разрыв арматуры предшествовал нарушению сцепления;
 ** – нарушение сцепления в результате раскола бетонного куба.

Если не учитывать случаи преждевременного раскалывания образцов, то, аппроксимируя эти зависимости, получим для данных условий испытаний значения коэффициента η_3 :

– для арматуры кольцевого и винтового профилей:

$$\eta_3 = 6,237 \cdot f_R + 17,75 \cdot \left(\frac{l_{an}}{\varnothing} \right)^{-0,6395} - 1,301;$$

– для арматуры серповидного профиля:

$$\eta_3 = 11,686 \cdot f_R + 21,68 \cdot \left(\frac{l_{an}}{\varnothing} \right)^{-0,7151} - 1,013.$$

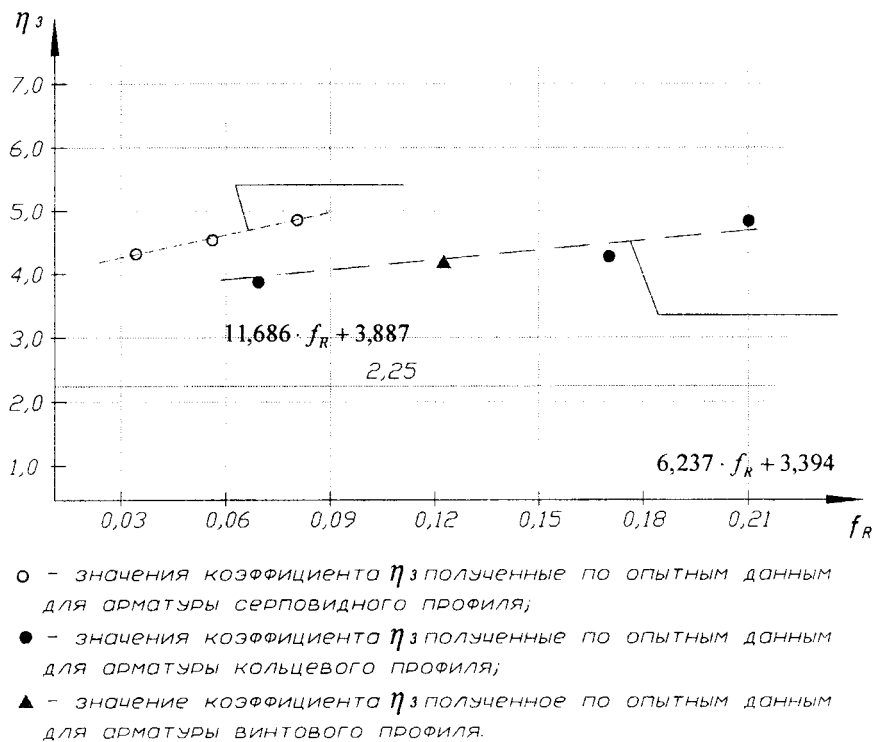


Рис. 5. Аппроксимация зависимости коэффициента η_3 от относительной площади смятия f_R (для $l_{an} = 8\varnothing$)

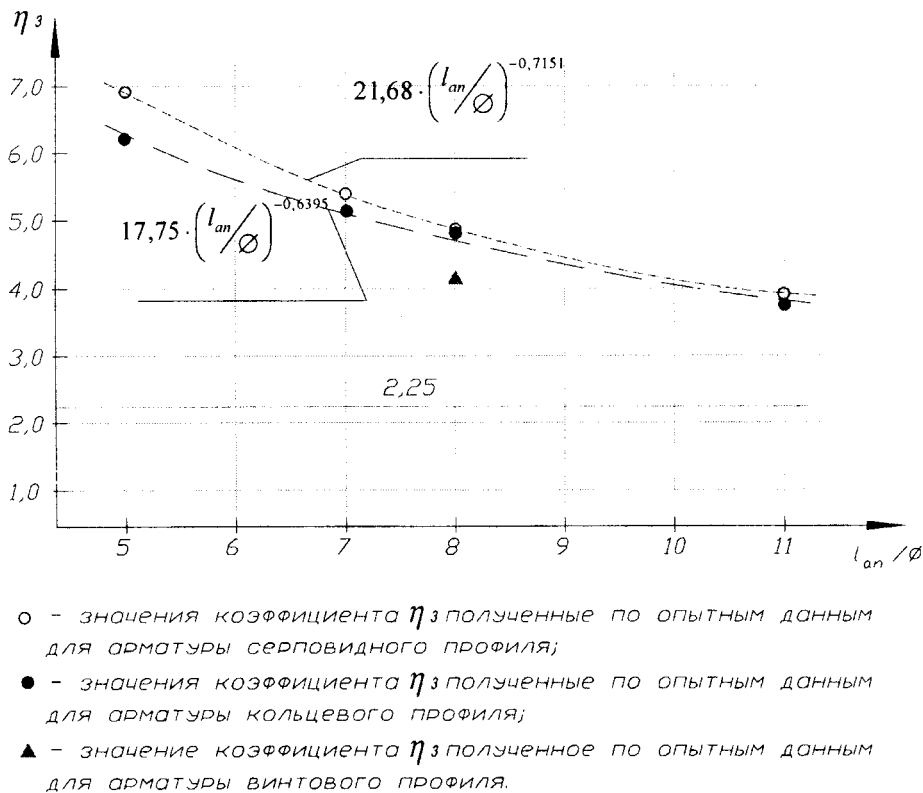


Рис. 6. Аппроксимация зависимости коэффициента η_3 от величины заделки арматуры в бетон (l_{an}) для $f_R = 0,21$ (кольцевой профиль), $f_R = 0,08$ (серповидный профиль), $f_R = 0,123$ (винтовой профиль)

Заключение

1. В результате экспериментальных исследований установлены зависимости прочности сцепления бетона и арматуры от вида периодического профиля арматуры и от величины заделки арматуры в бетон.

2. Сопоставлением опытной и теоретической прочности сцепления арматуры и бетона показано, что фактические ее значения в отдельных случаях длин анкеровки и видов профилей более чем в 2 раза превышают расчетные, выполненные по нормативной методике СНБ 5.03.01.

3. Впервые в результате экспериментально-теоретических исследований для рассматриваемых видов профилей арматуры подобраны параметры «нормального закона», положенного в основу теории сцепления, предложенной М.М. Холмянским. Расчет прочности сцепления по теории М.М. Холмянского дает меньшее отклонение от опытных данных, нежели расчет по нормативной методике, однако также не учитывает особенности влияния различных профилей. Недооценка опытных значений составляет «15 % для арматуры кольцевого профиля и «30 % для арматуры серповидного профиля.

4. Экспериментальные исследования показали примерно одинаковое значение прочности сцепления арматуры серповидного периодического профиля, по сравнению с арматурой кольцевого периодического профиля, имеющего критерий f_R в несколько раз больший. В расчетной оценке прочности сцепления арматуры и бетона необходимо, кроме относительной площади смятия f_R поперечных ребер того или иного вида профиля, учитывать особенности напряженно-деформированного состояния бетона по длине участка активного сцепления.

5. Экспериментальные исследования показали отсутствие присущей для нормативной методики расчета анкеровки линейной зависимости между величиной заделки арматурного стержня в бетон и прочностью сцепления.

6. Предложенные нами значения коэффициента rj_3 , используемого в формуле (3) для определения среднего значения предельного напряжения сцепления по контакту арматуры с бетоном и учитывающего вид периодического профиля и длину анкеровки, позволяют уточнить нормативную методику расчета анкеровки по СНБ 5.03.01.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мулин Н.М. Стержневая арматура железобетонных конструкций. - М.: Стройиздат, 1974. - 232 с.
2. Рекомендации РИЛЕМ/ЕКБ/ФИП РС 6. Испытание на сцепление арматурной стали. Ч. 2. Испытания на вытягивание.
3. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / М-во арх. и стр-ва Республики Беларусь. - Мн., 2003. - 139 с.
4. Терин В.Д., Хотько А.А. Сцепление с бетоном ненапрягаемой арматуры различных видов профилей // Совершенствование железобетонных конструкций оценка их состояния и усиление: Сб. науч. тр. / Под ред. Т.М. Пецольда. - Мн., 2001. - С. 188 - 195.
5. Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном. - М.: Стройиздат, 1981. - 184 с.
6. Дмитриев О.В. Теория зоны анкеровки железобетонных конструкций, напрягаемых арматурой без анкеров. - Ростов н/Д, 1972. - 130 с.
7. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. - М.: Стройиздат, 1996. - 414 с.
8. Оатул А.А. Основы теории сцепления арматуры с бетоном // Исследования по бетону и железобетону: Сб. тр. № 46. - Челябинск, 1967. - С. 6 - 26.