

А.А.Хотько, канд.техн.наук, доц.; Ю.В.Попков, А.В.Василевский  
УО «ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

## РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА АНКЕРОВКИ В БЕТОНЕ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

Излагаются 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 (критерий Рэма -  $f_R$ ) [1,4,5,6], вычисляемая по формуле

$$f_R = \frac{F_R}{\pi \cdot \varnothing \cdot t},$$

где  $F_R$  - площадь проекции боковой поверхности поперечных ребер на плоскость, перпендикулярную оси арматурного стержня;  $\varnothing$  - номинальный диаметр стержня;  $t$  - шаг поперечных выступов.

Для армирования железобетонных конструкций используется арматура с различными видами периодического профиля (кольцевой, серповидный, винтовой и др.), отличающаяся значениями параметра  $f_R$  и отношением  $h_b/t$  в несколько раз. Несмотря на это действующая нормативная методика расчета анкеровки не учитывает геометрические параметры профиля арматуры. 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].

Целью данной работы ставилась разработка наиболее приближенной к опытными данным методики расчета анкеровки арматуры в железобетонных конструкциях, учитывающей вид периодического профиля арматуры.

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 профиля, кроме того, имели раз-

личные значения высоты поперечных выступов арматуры (рис. 1, табл. 1) и различную величину заделки арматуры в бетон ( $5\emptyset$ ,  $7\emptyset$ ,  $8\emptyset$  и  $11\emptyset$ ). Проектирование опытных образцов производилось так, чтобы удовлетворять требованиям рекомендаций РИЛЕМ/ЕКБ/ФИП РС 6 /2/. Опытный образец для испытания на сцепление представлял собой центрально армированную бетонную призму с размерами поперечного сечения  $300 \times 300$  мм. Высота призмы варьировалась в зависимости от величины заделки арматуры в бетон. Подбор состава бетона произведен в соответствии с «Руководством по подбору состава бетона» для бетона класса С16/20. Водоцементное отношение  $V/C=0,5$ . Для приготовления смеси использовался цемент марки ПЦ500/Д0 Волковысского цементного завода. В качестве заполнителя использовали промытый гранитный щебень фракции 5...20 Микошевичского завода. Объемная масса в сухом состоянии –  $1400 \text{ кг/м}^3$ , влажность –  $0,3\%$ , содержание пылевидных и глинистых частиц –  $1,6\%$ . Кварцевый песок из карьера «Боровое» Витебской области с модулем крупности МК 2.2, объемной массой в сухом состоянии –  $1550 \text{ кг/м}^3$ , влажностью –  $3,5\%$ .

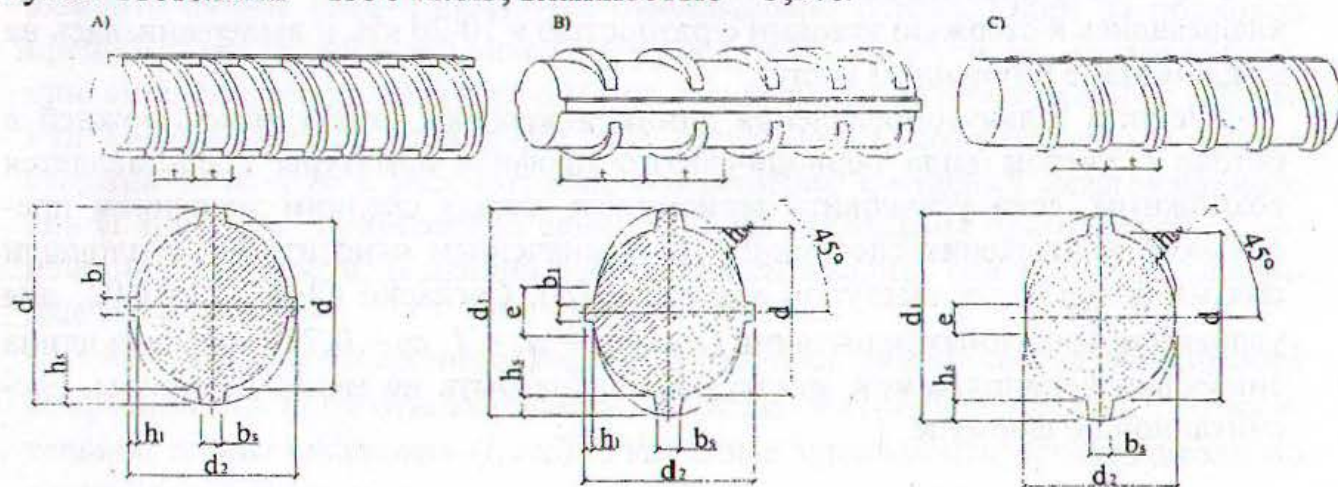


Рис. 1. Виды исследуемых профилей арматуры: а - кольцевой профиль; б - серповидный профиль; с - винтовой профиль.

Табл. 1. Параметры профилей арматуры опытных образцов

Вид периодического профиля	$d_n$	$e$	$t$	$h_l$	$h_s$	$h_{sv}$	$b_l$	$b_s$	$\alpha$ град
	мм								
Кольцевой	25	-	8,6	1,5	2,1	1,79	2,7	1,8	75
	25	-	8,6	$1,5 \pm 0$	$1,5 \pm 0$	$1,5 \pm 0$	2,7	1,8	75
	25	-	8,6	0,6	0,6	0,6	2,7	1,8	75
Серповидный	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	$0,8 \pm 0$	$0,8 \pm 0$	$0,8 \pm 0$	3,2	2,2	60
Винтовой	25	6,0	11,5	-	2,0	1,5	-	3,8	75



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. Среднее значение предела текучести для пяти опытных образцов арматуры  $\sigma_y = 509,3 \text{ МПа}$ , временное сопротивление —  $\sigma_t = 616,8 \text{ МПа}$ . Призмечная прочность бетона по результатам испытаний составила  $24,5 \text{ МПа}$  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. Перед нагружением производилось центрирование образца. Опираие образца на траверсу — насухо, через стальную опорную пластину с центральным отверстием диаметром 175 мм. Усилия прикладывались к стержню этапами с разностью в 10-20 кН, и выдерживалась на каждом этапе в течение 3 минут.

Решить задачу определения длины анкеровки арматурных стержней в бетоне с учетом вида периодического профиля арматуры представляется возможным, если установить зависимость между средним значением предельного напряжения сцепления ( $f_{bd}$ ) и значением относительной площади смятия поперечных выступов арматуры ( $f_R$ ). Согласно СНБ 5.03.01-02, для условий проведенных испытаний ( $\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 1$ ,  $\alpha_1 = 0,7$ ), расчетная длина анкеровки ненапрягаемой арматуры должна быть не менее величины, рассчитанной по формуле

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot l_b = 0,7 \cdot \left( \frac{\varnothing}{4} \right) \left( \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \right),$$

где среднее значение предельного напряжения сцепления равно:

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd}.$$

Расчет анкеровки по существующей нормативной методике может быть уточнен, если установить влияние вида периодического профиля и длины анкеровки на коэффициент  $\eta_3$  в формуле для расчета среднего значения предельного напряжения сцепления по контакту арматуры с бетоном, принимаемый в СНБ 5.03.01 для арматуры кольцевого профиля равным 2,5 и для арматуры серповидного профиля равным 2,0. Для этого, используя полученные опытные значения максимальных напряжений на загруженном конце



арматуры, для всех образцов можно определить требуемые значения коэффициента  $\eta_3$ :

$$\eta_3 = \frac{0.7 \cdot \sigma_s \cdot \varnothing}{4 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ct} \cdot l_{an}}$$

Величина анкеровки арматуры в бетоне должна быть такой, чтобы при длительном действии нагрузки не происходило дальнейшего смещения незагруженного конца арматуры. Поэтому, важным критерием сцепления является величина напряжений в арматуре при начале сдвига всего стержня. Измеряемые в процессе испытаний смещения незагруженного конца стержня не вполне четко характеризуют этот момент, так как включают в себя помимо собственно сдвига арматуры также и перемещения бетона, полученные в результате депланации торца образца, деформаций смятия под выступами периодического профиля. Существует несколько подходов к определению момента начала сдвига арматуры относительно бетона. Один из подходов предполагает за критерий такой нагрузки принимать усилия, соответствующие смещению незагруженного конца арматуры на величину равную 0,2 мм. Ряд исследователей предлагают для определения момента начала сдвига стержня включить в рассмотрение приращения смещений незагруженного конца арматуры, принимая за сдвиг момент отклонения приращений от линейной зависимости. В данной работе использовались обе вышеперечисленные методики.

Методом регрессионного анализа строились эмпирические зависимости коэффициента  $\eta_3$  от относительной площади смятия профиля ( $f_R$ ) и относительной длины анкеровки ( $l_{an}/\varnothing$ ). Указанные зависимости устанавливали по опытным значениям:

- напряжений, соответствующих максимальным усилиям в арматуре ( $\sigma_{S,max}$ ), когда сцепление ее с бетоном не нарушено;
- напряжений, соответствующих усилиям, при которых происходит сдвиг всего арматурного стержня относительно бетона ( $\sigma_{S,0,2}$ ,  $\sigma_{S,A}$ ).

Выполнялся статистический анализ, как отдельных коэффициентов, так и построенных моделей в целом. В таблице 2 приведены значения коэффициента  $\eta_3$ , полученные по опытным значениям напряжений, соответствующих максимальным усилиям в арматуре ( $\sigma_{S,max}$ ), когда сцепление с бетоном не нарушено, соответствующих смещению незагруженного конца стержня на величину равную 0,2 мм ( $\sigma_{S,0,2}$ ) и соответствующих моменту отклонения приращений перемещений незагруженного конца арматуры от линейной зависимости ( $\sigma_{S,A}$ ).



Табл. 2. Средние значения коэффициента  $\eta_3$ , полученные по опытным значениям напряжений

Шифр образца	Вид профиля	Ср.знач. относит. площади смятия $f_R$	Длина анкеровки	Средние значения напряжений			Средние значения коэффициента $\eta_3$		
				$\sigma_{S,max}$ МПа	$\sigma_{S,0,2}$ МПа	$\sigma_{S,\Delta}$ МПа	$\eta_{3,max}$ $x_{ср.}$	$\eta_{3,0,2}$ среднее	$\eta_{3,\Delta}$ среднее
КСс	Винтовой	0,123	200	486,7	465	406,2	6,311	6,030	5,267
КА1с	Кольцевой	0,21		549,3	477,8	406,2	7,123	6,196	5,267
КА2с	Кольцевой	0,167		498,5	421,4	383,3	6,464	5,464	4,970
КА3с	Кольцевой	0,07		447,7	355,3	332,2	5,805	4,607	4,308
КА1а	Кольцевой	0,21	125	446,3	367,5	293,8	9,259	7,624	6,095
КА1d	Кольцевой	0,21	275	592,0	514,5	472,7	5,583	4,852	4,458
КА1b	Кольцевой	0,21	175	518,7	416,5	358,7	7,687	6,172	5,316
КА2а	Кольцевой	0,169	125	422,5	350,0	283,0	8,766	7,261	5,871
КВ1с	Серповидн	0,08	200	552,3	269,5	488,8	7,162	3,495	6,339
КВ2с	Серповидн	0,056		518,7	223,0	407,3	6,726	2,892	5,281
КВ3с	Серповидн	0,038		497,5	215,6	325,8	6,451	2,796	4,225
КВ1а	Серповидн	0,08	125	496,0	196,0	357,7	10,290	4,066	7,421
КВ1b	Серповидн	0,08	175	535,7	249,9	448,0	7,939	3,703	6,640
КВ1d	Серповидн	0,08	275	616,7	367,5	616,0	5,82	3,466	5,82*
КВ3d	Серповидн	0,038	275	543,0	287,0	391,0	5,121	2,707	3,687

После удаления незначимых коэффициентов построенные модели имеют следующий вид.

Для арматуры кольцевого периодического профиля:

$$\eta_{3,max} = 9,0264 \cdot f_R + 3,725 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{l_{ан}}{\varnothing}\right)^2 - 1,206 \cdot \frac{l_{ан}}{\varnothing} + 12,3914;$$

$$\eta_{3,0,2} = 10,986 \cdot f_R + 2,92 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{l_{ан}}{\varnothing}\right)^2 - 0,9154 \cdot \frac{l_{ан}}{\varnothing} + 9,247;$$

$$\eta_{3,\Delta} = 6,8726 \cdot f_R + 1,23 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{l_{ан}}{\varnothing}\right)^2 - 0,4634 \cdot \frac{l_{ан}}{\varnothing} + 6,7462.$$

Для арматуры серповидного периодического профиля:

$$\eta_{3,max} = 16,985 \cdot f_R + 1,021 \cdot 10^{-1} \cdot \left(\frac{l_{ан}}{\varnothing}\right)^2 - 2,379 \cdot \frac{l_{ан}}{\varnothing} + 18,2882;$$

$$\eta_{3,0,2} = 17,099 \cdot f_R - 0,1893 \cdot \frac{l_{ан}}{\varnothing} + 3,5832 - \text{при } l_{ан}/\varnothing < 8;$$

$$\eta_{3,0,2} = 17,099 \cdot f_R - 9,6 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{l_{ан}}{\varnothing} + 2,1456 - \text{при } l_{ан}/\varnothing > 8,$$



$$\eta_{3,\Delta} = 49,958 \cdot f_R + 2,52 \cdot 10^{-2} \cdot \left( \frac{l_{an}}{\varnothing} \right)^2 - 0,6753 \cdot \frac{l_{an}}{\varnothing} + 6,1733.$$

Полученные полиномиальные модели справедливы при значениях относительной площади смятия  $0,038 \dots 0,21$  и относительных длинах анкеровки  $5\varnothing \dots 11\varnothing$ . Проверка адекватности и информационной способности моделей по критерию Фишера показала, что при принятом уровне значимости ( $\alpha=0,05$ ), уравнения адекватно представляют результаты эксперимента и информационно полезны. Зависимости коэффициента  $\eta_3$  от относительной площади смятия профиля ( $f_R$ ) и относительной длины анкеровки ( $l_{an}/\varnothing$ ) для арматуры винтового профиля по ТУ РБ 400074854.025-2002 соответствуют модели для арматуры кольцевого периодического профиля.

Используя полученные полиномиальные модели, построены графики зависимости относительной прочности анкеровки ( $\sigma_{max}/f_{ct}$ ) от относительной длины анкеровки ( $l_{an}/\varnothing$ ) (рис. 2 - 4), которые хорошо согласуются с результатами опытных данных.

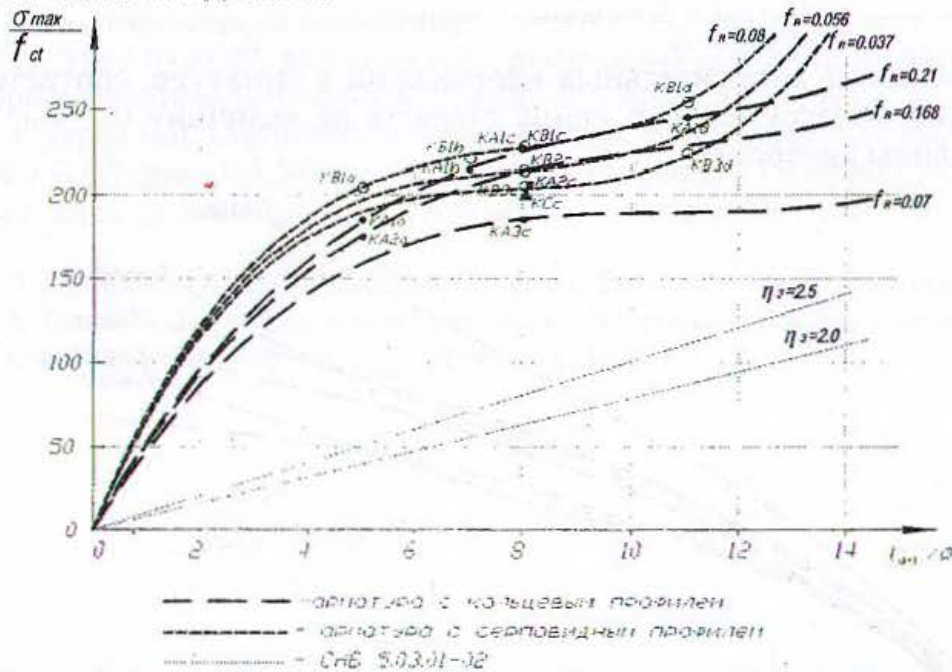


Рис. 2. Зависимость относительных максимальных напряжений в арматуре, соответствующих нарушению сцепления с бетоном, от относительной длины анкеровки

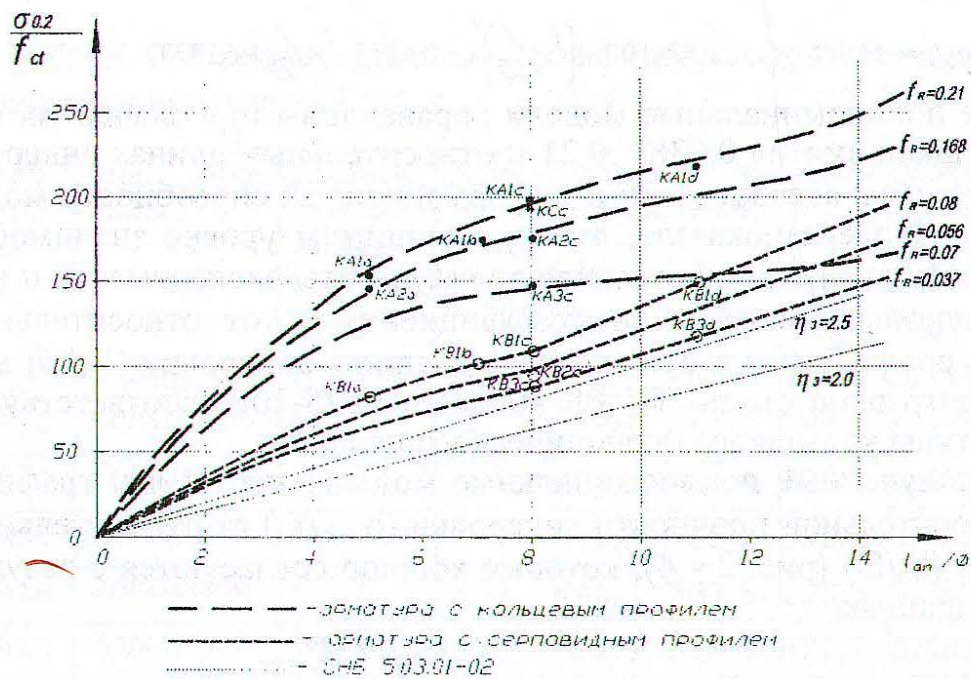


Рис. 3. Зависимость относительных напряжений в арматуре, соответствующих смещению незагруженного конца стержня на величину 0,2 мм, от относительной длины анкеровки.

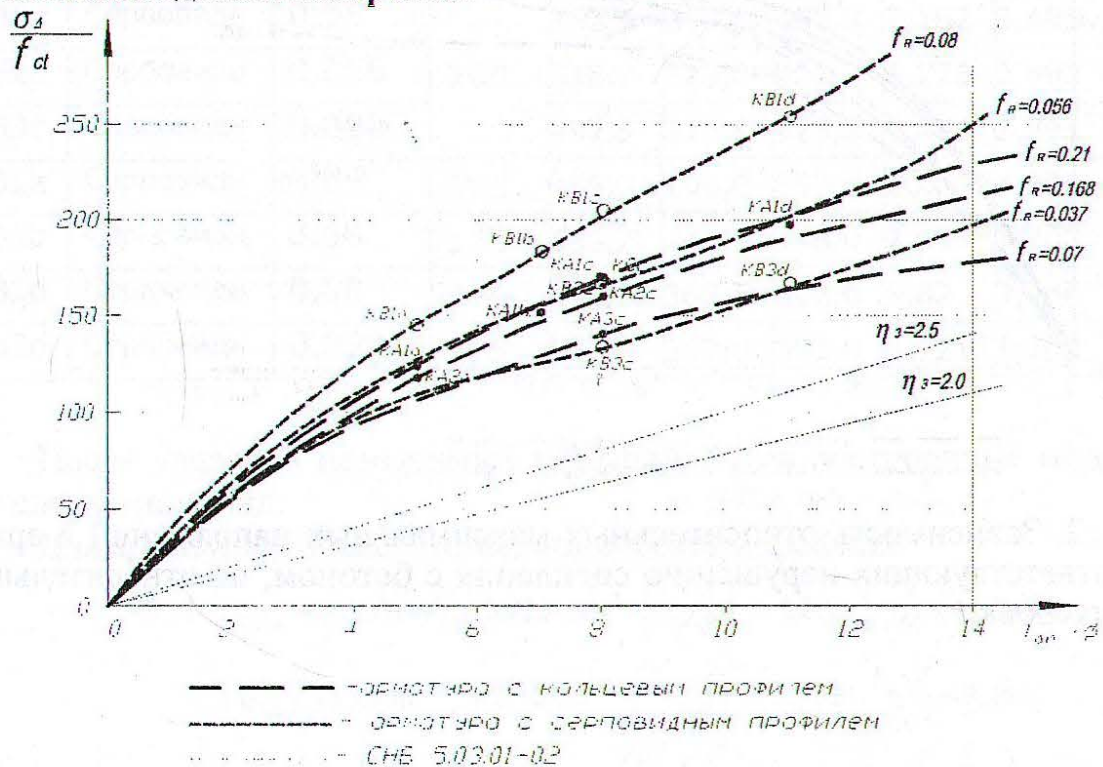


Рис. 4. Зависимость относительных напряжений в арматуре, соответствующих моменту отклонения приращений перемещений незагруженного конца арматуры от линейной зависимости, от относительной длины анкеровки.

Наблюдаемое на рис. 2 - 4 отсутствие предлагаемой в СНБ 5.03.01-02 линейной зависимости между максимальными напряжениями в арматуре и



относительной длиной анкеровки, подтверждается опытными данными Холмянского М.М., Мулина Н.М., Ф. Альшайха, Али Абдель Захира и др. На результаты экспериментов повлияло относительное сужение арматурного стержня при нагрузках, превышающих предел текучести арматуры. Наибольшее влияние данного фактора, вероятно, сказалось на образцах с максимальной длиной анкеровки. Данный факт может свидетельствовать о некотором запасе при определении длины анкеровки по представленным рекомендациям.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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./ Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Мн., 2003. – 139 с.
4. Терин В.Д. Сцепление с бетоном ненапрягаемой арматуры различных видов профилей / В.Д.Терин, А.А.Хотько; Под.ред. Т.М.Пецоляда // Совершенствование железобетонных конструкций оценка их состояния и усиление: Сб.науч.тр. – Мн., 2001. – С.188-195.
5. Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном. – М.: Стройиздат, 1981. – 184 с.
6. Оатул А.А. Основы теории сцепления арматуры с бетоном // Исследования по бетону и железобетону: Сб трудов. – Челябинск, 1967. – С. 6-26.