

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 624.012.25:539.319

*Е. М. Бабич, В. Е. Бабич, Е. Е. Поляновская*

ИССЛЕДОВАНИЕ СЦЕПЛЕНИЯ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

UDC 624.012.25:539.319

*Y. M. Babich, V. Y. Babich, Y. Y. Polianovska*

RESEARCH OF COHESION OF REINFORCEMENT WITH CONCRETE BY THE METHOD OF MATHEMATICAL EXPERIMENT PLANNING

**Аннотация**

Приведены математические модели сцепления арматуры с бетоном, полученные путем выполнения планированных экспериментов. Представлен анализ влияния диаметра арматуры, класса бетона, длины анкеровки стержней и количества циклов повторных нагружений на предельные напряжения сцепления арматуры с бетоном.

**Ключевые слова:**

бетон, арматура, сцепление, планированный эксперимент, математические модели.

**Abstract**

Mathematical models of cohesion of reinforcement with concrete are presented which were found while performing planned experiments. It has been analyzed how reinforcement diameter, concrete grade, length of rod anchoring and the number of cycles of repeated loadings affect the critical stress of cohesion of reinforcement with concrete.

**Key words:**

concrete, reinforcement, cohesion, planned experiment, mathematical models.

**Введение**

Сцепление арматуры с бетоном является основным фактором обеспечения их совместной работы в железобетонных конструкциях, а поэтому его исследованию уделялось и уделяется значительное внимание. Решено много теоретических вопросов и выполнено значительное количество экспериментальных исследований [1], но в связи с повсеместным использованием в железобетонных конструкциях арматуры нового серповидного профиля [2, 3] ис-

следования сцепления ее с бетоном приобретают весьма важное значение.

Арматурные стержни серповидного профиля имеют геометрические параметры (форма, высота и шаг выступов), которые существенно отличаются от параметров винтового профиля [2, 4]. Уровень сцепления стержней с бетоном оценивают индексом Рэма  $f_R$ , который характеризует геометрические параметры периодического профиля и зависит от диаметра, высоты и шага выступов. По данным [4], для стержней кольцево-

го и серповидного профиля средние значения индекса Рэма соответственно составляют  $f_R = 0,134$  и  $f_R = 0,060$ . Принято, что необходимый уровень сцепления имеют стержни, индекс сцепления которых  $f_R \geq 0,056$ . Кроме этого, величина относительной площади смятия для стержней серповидного профиля в 2,4...3,7 раза меньше, чем соответствующие значения для стержней винтового профиля [2]. Это подтверждает необходимость всестороннего изучения особенностей сцепления с бетоном арматуры серповидного профиля.

На сегодняшний день известны результаты исследований сцепления с бетоном арматуры серповидного профиля, в которых устанавливалось влияние различных факторов на значения граничных касательных напряжений [2, 5–10]. Однако в этих исследованиях влияние отдельных параметров на напряжения сцепления определялось при фиксированном значении других, что требовало большого количества экспериментальных образцов. Для уменьшения числа экспериментальных исследований применены методы математического планирования эксперимента [11].

### Планирование эксперимента

За основные факторы, которые существенно влияют на напряжения сцепления арматуры с бетоном, приняты прочность бетона, диаметр арматуры, длина заделки стержней в бетон (длина анкеровки) и количество циклов повторного нагружения (вытягивания стержней с бетона). Эти факторы между собой не имеют корреляционной зависимости, поэтому предпочтительно выбирать трехфакторный план эксперимента. В [9] отмечается, что напряжения сцепления нелинейно зависят от диаметра арматуры, поэтому необходимо принимать планы для получения квадратичной зависимости (квадратичной математической модели). Приведенным требованием отвечает матрица плана Бокса–Бенкина.

Авторами выполнены две серии трехфакторных экспериментов (табл. 1), в которых за факторы влияния приняты:  $x_1$  – диаметр стержней;  $x_2$  – призмочность бетона;  $x_3$  – длина анкерования стержня (длина заделки стержня в бетон);  $x_4$  – количество циклов малоциклового нагружения (вытягивания стержней из бетона).

Табл. 1. Условия планирования эксперимента

Фактор		Уровень варьирования			Интервал варьирования
натурального вида	кодированного вида	–1	0	+1	
<i>Первая серия</i>					
Диаметр стержней $d$ , мм	$x_1$	12	16	20	4
Призмочность $f_{cm, prism}$ , МПа	$x_2$	21,1	26,1	30,8	4,85
Длина анкеровки $l_b$	$x_3$	$5d$	$10d$	$15d$	$5d$
<i>Вторая серия</i>					
Диаметр стержней $d$ , мм	$x_1$	12	16	20	4
Длина анкеровки $l_b$	$x_3$	$5d$	$7,5d$	$10d$	$2,5d$
Количество циклов нагружения $n$	$x_4$	1	6	11	5

Первый, третий и четвертый факторы  $x_1$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  имеют высокую сте-

пень управления, что дает возможность выбирать заданный уровень варьирова-

ния. Диаметр стержней на основном уровне планирования (0) принят 16 мм, а на нижнем (-1) и верхнем (+1) – соответственно 12 и 20 мм (интервал варьирования 4 мм). Такие диаметры стержней наиболее распространены при армировании железобетонных конструкций. Длина заделки стержней в бетон в первой серии принята на основном уровне (0)  $10d$ , а во второй –  $7,5d$  (интервал варьирования соответственно  $5d$  и  $2,5d$ ). Уменьшение длины анкеровки на основном уровне во второй серии объясняется тем, что в первой серии при длине анкеровки  $15d$  были случаи разрыва стержней.

Второй фактор – прочность бетона – тяжело управляемый, поскольку обеспечить одинаковый интервал варьирования на трех уровнях почти невозможно. В первой серии предполагалось использовать бетоны классов С 20/25, С 25/30 и С 30/35, которые представляются в виде призматической прочности. Чтобы достичь одинаковых интервалов варьирования прочности бетона, предварительно выполнялись пробные замесы бетона и испытания бетонных призм в возрасте 28 сут. В результате исследований была получена прочность бетона на основном уровне  $f_{cm,prism} = 26,1$  МПа, на нижнем  $f_{cm,prism} = 21,1$  МПа (-5), а на верхнем  $f_{cm,prism} = 30,8$  МПа (+4,7). В среднем интервал варьирования составил 4,85 МПа, при этом отклонение нижнего и верхнего уровней от необходимого – 0,58 %, что находится в пределах точности выполнения эксперимента и не оказывает влияния на построение математической модели. Во второй серии все образцы изготавливались из бетона, средняя призматическая прочность которого в возрасте 28 сут  $f_{cm,prism} = 28,3$  МПа.

Для четвертого фактора количество циклов на основном уровне при малоцикловом нагружении принято  $n = 6$ , т. к. многочисленные исследования свидетельствуют о стабилизации деформативных характеристик бетона при нагружениях, верхний уровень ко-

торых не превышает 60...70 % от разрушающего, принятого в эксперименте. Интервал четвертого фактора принят пять циклов, в результате чего нижний уровень повторных нагружений составил один цикл, а верхний – 11 циклов.

### **Экспериментальные образцы и методика их исследования**

Основные образцы изготавливали в виде бетонных призм квадратного сечения, сторона которого 15 см, длина соответствовала длине заделки стержня в бетон в соответствии с планом эксперимента (см. табл. 1). Арматурные стержни располагали в призмах таким образом, чтобы их продольные оси совпадали. При этом один конец стержня закреплялся в захватах гидравлического пресса, а смещение свободного конца измерялось относительно торца индикаторами часового типа (рис. 1).

Все параметры образцов приняты в соответствии с матрицей плана эксперимента. В каждой точке плана изготавливали по три образца-близнеца, а на основном уровне – шесть образцов. Кроме этого, изготавливали образцы в виде кубов и призм для определения прочностных характеристик бетона. В каждой серии изготавливали по 42 основных образца. В обозначениях образцов первая цифра указывает на серию, вторая – строку в плане, третья – номер образца-близнеца в строке плана.

Напряжения сцепления по контакту арматуры с бетоном  $f_b$  определяли путем вытягивания стержней из бетонных призм с использованием специального реверсного устройства в разрывной гидравлической машине УИМ-50. Вытягивание стержней осуществляли ступенями  $\Delta F = 0,5 \dots 1,0$  кН. Во время нагружения измерялись смещения свободного конца стержня относительно торца призм индикаторами часового типа с ценой деления 0,001 мм (см. рис. 1). Подробно методика испытания образцов изложена в [7–10].

За предельное состояние сцепления арматуры с бетоном принимали усилие в арматуре  $F_u$ , когда смещение его свободного торца относительно торца призм составляло  $\delta_u = 0,10$  мм (рис. 2) или происходило раскалывание призм при  $\delta_u < 0,10$  мм (см. рис. 1). В

предельном состоянии определялись максимальные средние по длине предельные напряжения сцепления по контакту арматуры с бетоном для каждого образца по формуле

$$f_{bu} = F_u / (\pi \cdot d \cdot l_b). \quad (1)$$

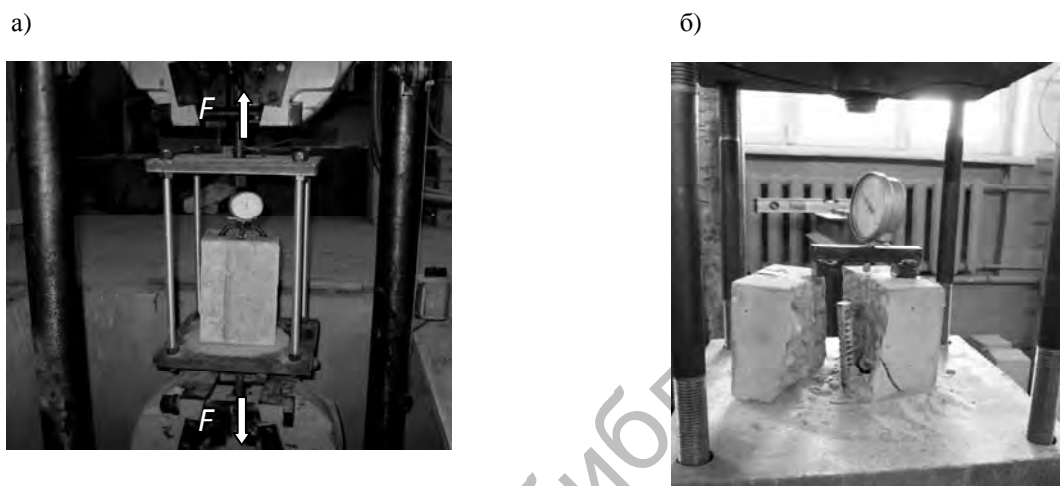


Рис. 1. Общий вид испытания образцов (а) и образец после разрушения (б)

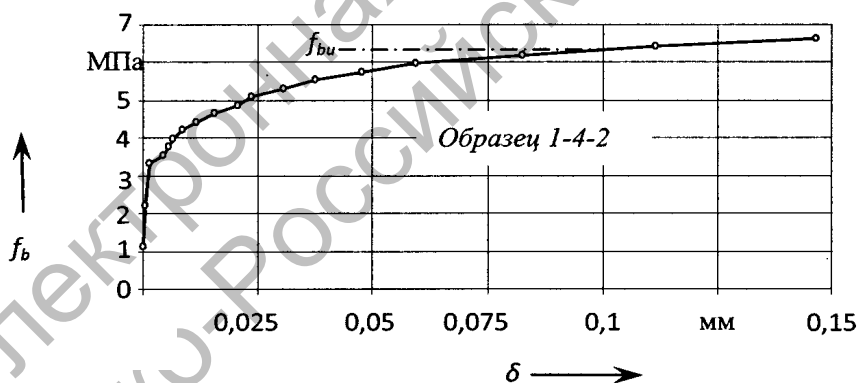


Рис. 2. Смещение свободного конца стержня относительно торца призмы в зависимости от напряжений сцепления

#### **Результаты экспериментальных исследований и построение математических моделей**

Исходными параметрами для построения математических моделей являлись значения предельных напряжений сцепления по контакту арматуры с бетоном  $f_{bu}$ , вычисленные по формуле (1) для всех образцов в каждой точке

плана, а также их средние значения  $f_{bum}$  (табл. 2 и 3).

На основном уровне средние максимальные напряжения сцепления по шести образцам для первой серии опытов составили  $f_{bum} = 7,11$  МПа, а для второй –  $f_{bum} = 7,35$  МПа (призменная прочность бетона второй серии на 8,5 % больше).

Табл. 2. Матрица плана Бокса–Бенкина и исходные экспериментальные данные для первой серии исследований

Точка плана	Матрица планирования			Исходные параметры $f_{bu}$ , МПа			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$f_{bu1}$	$f_{bu2}$	$f_{bu3}$	$f_{bun}$
1	+1	+1	0	6,37	8,36	7,60	7,44
2	+1	-1	0	5,73	5,88	6,05	5,89
3	-1	+1	0	9,51	9,29	9,95	9,58
4	-1	-1	0	6,19	6,09	5,53	5,94
5	+1	0	+1	7,83	7,7	8,23	7,92
6	+1	0	-1	4,46	4,78	5,09	4,78
7	-1	0	+1	9,21	8,11	8,83	8,72
8	-1	0	-1	3,98	3,98	4,64	4,20
9	0	+1	+1	8,08	7,67	8,64	8,13
10	0	+1	-1	6,96	6,97	6,96	6,96
11	0	-1	+1	5,95	6,52	6,64	6,37
12	0	-1	-1	3,98	3,48	4,48	3,98
13	0	0	0	6,99	7,42	6,91	7,11

*Примечание* – В точках плана 1...12 выполнено по три исследования. В точке плана 13 выполнено шесть исследований (основной уровень)

Табл. 3. Матрица плана Бокса–Бенкина и исходные экспериментальные данные для второй серии исследований

Точка плана	Матрица планирования			Исходные параметры $f_{bu}$ , МПа			
	$x_1$	$x_3$	$x_4$	$f_{bu1}$	$f_{bu3}$	$f_{bu4}$	$f_{bun}$
1	+1	+1	0	8,16	7,96	8,67	8,26
2	+1	-1	0	6,98	6,16	5,99	6,38
3	-1	+1	0	9,28	8,49	7,91	8,56
4	-1	-1	0	7,31	7,20	8,17	7,56
5	+1	0	+1	8,63	9,06	8,41	8,70
6	+1	0	-1	7,59	6,84	5,83	6,75
7	-1	0	+1	8,61	8,45	8,59	8,55
8	-1	0	-1	7,04	7,46	7,55	7,35
9	0	+1	+1	10,08	9,75	10,44	10,09
10	0	+1	-1	9,22	8,89	7,91	8,84
11	0	-1	+1	7,71	7,96	7,06	7,58
12	0	-1	-1	7,20	7,78	8,76	7,90
13	0	0	0	6,93	7,14	8,20	7,35
				8,16	7,96	8,67	

*Примечание* – В точках плана 1...12 выполнено по три исследования. В точке плана 13 выполнено шесть исследований (основной уровень)

Полные квадратические уравнения регрессии для описания максимальных касательных напряжений, принимая  $f_{bu} = f_{bum}$ , записывают в виде [11, 12]:

– для первой серии эксперимента

$$f_{bu} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3; \quad (2)$$

– для второй серии эксперимента

$$f_{bu} = b_0 + b_1x_1 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{34}x_3x_4, \quad (3)$$

где  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ii}$ ,  $b_{ij}$  – свободный член уравнения регрессии и коэффициенты линейных, квадратичных факторов и факторов взаимодействия.

По исходным параметрам, представленным в табл. 2, с помощью формул из [11, 12] для первой серии исследований определены все коэффициенты уравнения регрессии:  $b_0 = 7,11$ ;  $b_1 = -0,301$ ;  $b_2 = 1,24$ ;  $b_3 = 1,40$ ;  $b_{11} = -0,15$ ;  $b_{22} = -0,19$ ;  $b_{33} = -0,96$ ;  $b_{12} = 0,523$ ;  $b_{13} = 0,345$ ;  $b_{23} = 0,305$ . Коэффициенты уравнения регрессии определялись при помощи  $t$ -критерия Стьюдента, табличное значение которого для принятых условий исследований  $t = 2,06$ . Расчетные значения критерия  $t_p$  для коэффициентов  $b_1$ ,  $b_{13}$  и  $b_{23}$  оказались меньшими по сравнению с табличными (соответственно 1,89; 1,47; 1,29), поэтому эти коэффициенты можно не принимать во внимание. Для коэффициентов при квадратичных факторах расчетные значения  $t_p$  также оказались меньше табличных, но в данном случае ими не рекомендуется пренебрегать [11, 12].

Окончательное уравнение регрессии, которое можно принимать как математическую модель для определения напряжений сцепления на поверхности бетона и арматуры, по результатам исследований первой серии можно записать в виде

$$f_{bu} = 7,11 + 1,24x_2 + 1,40x_3 - 0,15x_1^2 - 0,19x_2^2 - 0,96x_3^2 + 0,52x_1x_2. \quad (4)$$

Уравнение (4) адекватно описывает результаты экспериментальных исследований первой серии при доверительной вероятности 0,95, поскольку расчетный  $F$ -критерий Фишера  $F_p = 8,22$  не превышает значение табличного  $F_m = 9,55$ . Значения  $F$ -критериев определялись по методике, описанной в [11, 12].

Аналогично получена математическая модель по результатам второй серии исследований, в которой как фактор варьирования отсутствовала прочность бетона и учитывалось малоцикловое повторное нагружение, при этом образцы подвергались таким нагрузениям до уровня 60...65 % от разрушающей силы при одноразовом нагружении. В этом случае пренебрегали коэффициентом  $b_{13}$ .

Тогда уравнение регрессии

$$f_{bu} = 7,35 + 0,61x_3 + 0,74x_4 - 0,15x_1^2 + 0,48x_3^2 + 0,40x_4^2. \quad (5)$$

Адекватность уравнения (5) экспериментальным данным подтверждается, как и в первой серии исследований, критерием Фишера, который составил  $F_p = 2,61$  при табличном значении  $F_m = 5,14$ . Кроме этого, средние отношения теоретических значений напряжений сцепления к экспериментальным составили 1,024 при среднеквадратичном отклонении 0,092 и коэффициенте изменчивости 8,94 %.

### **Анализ влияния факторов варьирования на предельные напряжения сцепления арматуры с бетоном**

**Влияние прочности бетона.** В исследованиях первой серии получены исходные значения напряжений сцепления при изменении призмочной прочности бетона в пределах  $f_{cm,prism} = 21,1...30,8$  МПа, а призмочная прочность бетона на основ-

ном уровне составила 26,1 МПа, что отвечает классу бетона С 25/30. Во второй серии исследований все образцы были изготовлены из бетона этого же класса. Для анализа влияния прочности бетона на напряжения сцепления принимали диапазон классов бетона от С 12/15 до С 32/40, учитывая, что за пределами плана эксперимента могут быть определенные отклонения.

При анализе в случаях, когда натуральные значения факторов отличались от принятых в плане эксперимента,

кодовые значения рассчитывали по формулам, приведенным в [11, 12].

Используя математическую модель (4), при фиксированных значениях диаметра стержней и длины их заделки в бетон находили соответствующие уравнения для определения предельных напряжений сцепления арматуры с бетоном в зависимости от прочности бетона. На основании полученных уравнений составляли таблицы и графики (рис. 3).

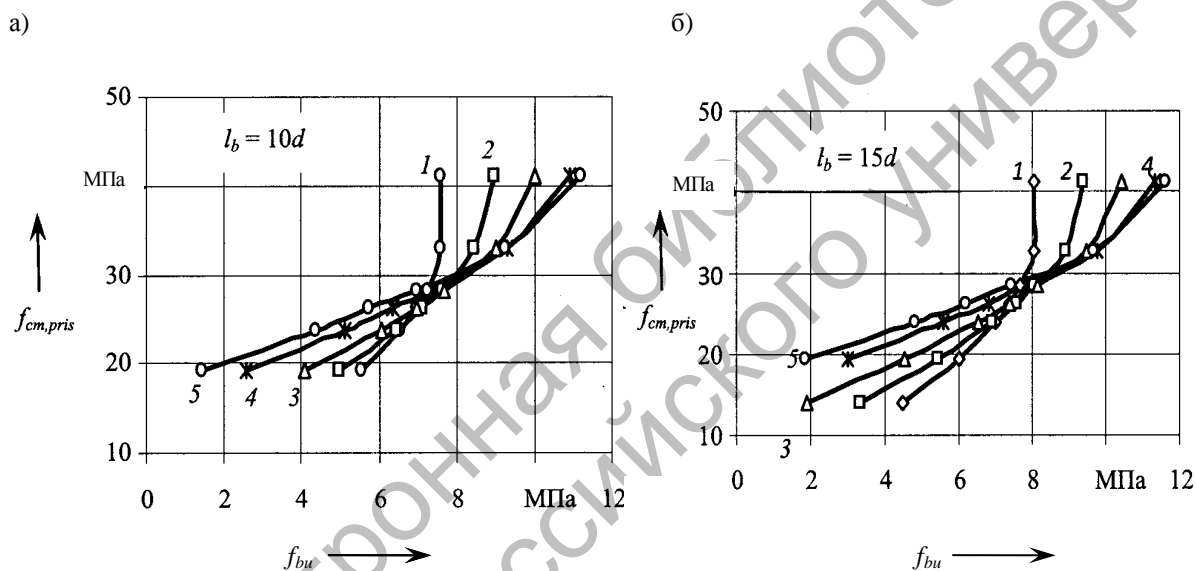


Рис. 3. Зависимость предельных напряжений сцепления  $f_{bu}$  от призмочной прочности бетона  $f_{cm,pris}$ : а – при длине заделке стержней в бетоне 10d; б – то же 15d; 1 – диаметр стержней 12 мм; 2 – то же 16 мм; 3 – то же 20 мм; 4 – то же 25 мм; 5 – то же 28 мм

При длине заделки (анкеровки) стержней в бетоне  $l_b = 5d$  для класса бетона С 20/25 с увеличением диаметра стержней предельные напряжения сцепления  $f_{bu}$  уменьшаются, а начиная с класса бетона С 25/30 увеличиваются. Так, для класса бетона С 30/35 при  $d = 12$  мм  $f_{bu} = 5,25$  МПа, а при  $d = 28$  мм  $f_{bu} = 8,83$  МПа. Это можно пояснить тем, что при меньшей прочности бетона и сравнительно больших диаметрах арматуры разрушение происходит вследствие раскалывания бетона при незначительных перемещениях стержней.

Поэтому не следует принимать длину анкеровки арматуры  $l_b$  равной или меньшей  $5d$ .

Рассмотрим влияние прочности бетона на предельные напряжения сцепления при длине анкеровки  $l_b = 10d$ , которая согласно нормам проектирования железобетонных конструкций рекомендуется как минимальная для обеспечения анкеровки стержней продольной арматуры, заводимых за внутреннюю грань свободной опоры (см. рис. 3, а).

Для стержней диаметром 12 мм с повышением класса бетона с С 16/20 до

С 32/40, т. е. в 2 раза, предельные напряжения сцепления  $f_{bu}$  увеличились с 5,57 до 7,61 МПа, т. е. только в 1,4 раза. При этом для классов бетона С 30/35 и С 32/40 эти напряжения почти одинаковы (7,59 и 7,61). Следовательно, для стержней диаметром 12 мм пропорциональность между прочностью бетона и предельными напряжениями сцепления не наблюдается.

С увеличением диаметра стержней для классов бетона С 15/20 и С 20/25 предельные напряжения сцепления уменьшаются, для класса бетона С 25/30 они почти одинаковые, а для классов бетона С 30/35 и С 32/40 увеличиваются. Это можно объяснить особенностями харак-

тера разрушения бетона при различных диаметрах стержней.

При длине заделки стержней в бетоне  $l_b = 15d$  характер влияния прочности бетона на предельные напряжения сцепления такой же, как и при  $l_b = 10d$ , но значения прочности бетона несколько выше (см. рис. 3, б).

*Влияние диаметра арматуры.* В соответствии с математической моделью (4) характер влияния диаметра стержней на предельные напряжения сцепления с бетоном  $f_{bu}$  при длине анкеровки  $l_b = 5d, 10d$  и  $15d$  почти одинаковый, но величины сцепления различаются (рис. 4).

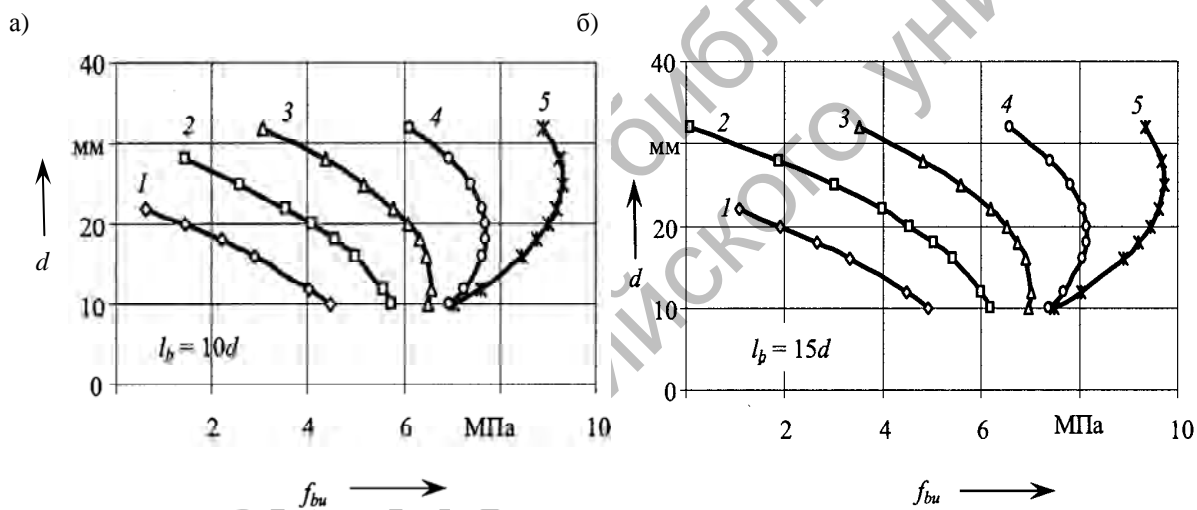


Рис. 4. Зависимость предельных напряжений сцепления  $f_{bu}$  от диаметра стержней  $d$ : а – длина заделки стержней в бетоне  $10d$ ; б – то же  $15d$ ; 1 – класс бетона С 12/15; 2 – то же С 15/20; 3 – то же С 20/25; 4 – то же С 25/30; 5 – то же С 30/35

Для классов бетона С 12/15, С 16/20 и С 20/25 с увеличением диаметра стержней предельные напряжения сцепления уменьшаются. Так, для класса бетона С 20/25 при  $l_b = 10d$  и  $d = 10$  мм  $f_{bu}$  составило 6,51 МПа, а при  $d = 28$  мм – 4,37 МПа (см. рис. 4, а). Для классов бетона С 12/15 и С 16/20 значения предельных напряжений сцепления почти линейно зависят от диаметров стержней, а для классов С 25/30 и С 30/35 эта зависимость приобретает

ярко выраженный криволинейный характер.

Максимальные значения предельных напряжений сцепления для бетона класса С 25/30 достигают при диаметре стержня  $d = 16...22$  мм, а для класса бетона С 30/35  $d = 20...28$  мм. Для класса бетона С 20/25 при значении диаметра стержней  $d = 18$  мм значения предельных напряжений сцепления  $f_{bu}$  почти не изменяются и находятся в пределах 6,51...6,31 МПа, а с увеличением диа-



метра значения начинают уменьшаться (см. рис. 4).

*Влияние длины анкеровки стержней.* В исследованиях длина анкеровки (заделки в бетон) изменялась в пределах  $l_b = 5d \dots 15d$ . Анализ результатов показывает, что при  $l_b = 10d$  и  $l_b = 15d$  предельные напряжения сцепления различаются между собой не больше, чем на 7 %. При  $l_b = 5d$  эта разница достигает 40...50 %. Поскольку нормами определена минимальная длина анкеровки  $l_b = 10d$ , то можно предположить, что длина анкеровки почти не влияет на предельные напряжения сцепления ар-

матуры с бетоном.

*Влияние повторных нагружений.* Уравнение регрессии (5) для фактора количества циклов повторного нагружения  $x_4$  принятого уровня содержит два значимых коэффициента, что свидетельствует о влиянии фактора  $x_4$  на предельные напряжения сцепления арматуры с бетоном. По формуле (5) построены номограммы, которые при фиксированных значениях диаметра арматуры и длины их анкеровки характеризуют влияние повторных нагружений на предельные напряжения сцепления (рис. 5).

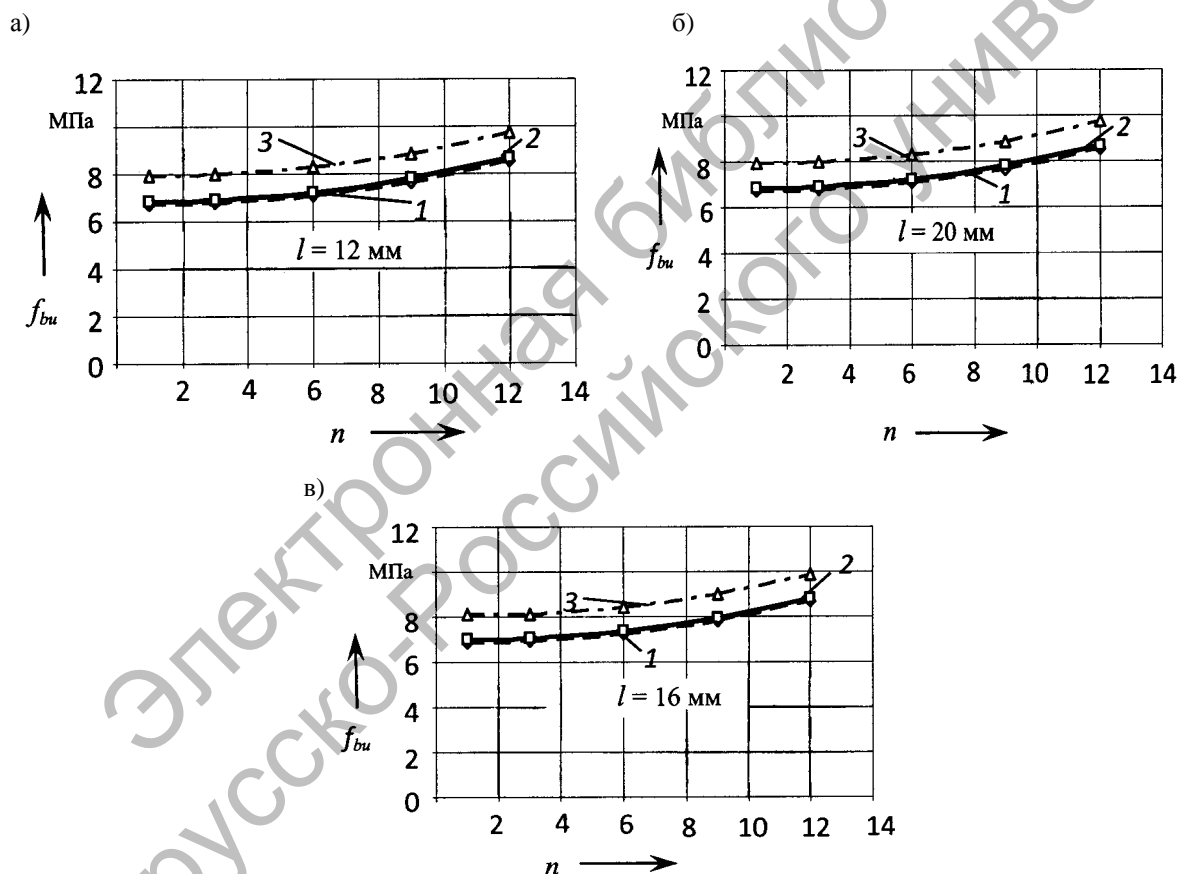


Рис. 5. Номограммы влияния повторного нагружения на предельные напряжения сцепления арматуры с бетоном: 1 – длина анкеровки стержней  $5d$ ; 2 – то же  $7,5d$ ; 3 – то же  $10d$

Из номограмм следует, что предельные напряжения сцепления  $f_{bu}$  в определенной степени зависят от диаметра арматуры, длины анкеровки (заделки стержней в бетон) и количества циклов

повторных нагружений (вытягивания стержней из бетона). Независимо от диаметра при однократном вытягивании и длине анкеровки  $l_b = 5d$  и  $l_b = 7,5d$  значения напряжений сцепления  $f_{bu}$  почти

одинаковы (в пределах 6,73...7,01 МПа), а при  $l_b = 10d$  они несколько выше (в пределах 7,95...8,01 МПа). После шестикратного нагружения до условного эксплуатационного уровня (60...65 % от разрушающей нагрузки) во всех образцах наблюдается увеличение значений  $f_{bu}$  на 4...5 % при догрузении до разрушения по сравнению с однократным нагружением образцов. После действия 11 циклов нагружений  $f_{bu}$  увеличивается почти на 20 %.

Согласно [4], по характеру разрушения сцепления с бетоном типы арматурных профилей можно условно разделить на жесткие и мягкие. Стержни с жестким профилем проскальзывают вследствие хрупкого разрушения бетонных выступов, а стержни с мягким профилем проскальзывают плавно из-за смятия бетонных выступов, образования поперечных трещин и отделения бетона от арматуры. Доказано, что бетонные шпонки, образованные серповидным профилем арматуры, при классах бетона В15...В40 разрушаются вследствие смятия. Можно предположить, что при действии повторного вытягивания нагрузкой эксплуатационного уровня происходит уплотнение бетона, которое при последующем однократном нагружении до разрушения приводит к увеличению предельных напряжений сцепления.

Малоцикловое вытягивание стержней способствует увеличению полного их проскальзывания в бетоне. Например, в образцах со стержнями диаметром 12 мм и длиной анкеровки 90 мм в первом цикле нагружений (уровень – 62 % от разрушающей нагрузки) про-

скальзывание торца стержня составило 0,017 мм, а на третьем, шестом и десятом – соответственно 0,021; 0,022 и 0,024 мм, при этом остаточные проскальзывания – 0,006; 0,009 и 0,012 мм соответственно. Необходимо отметить, что кратковременные проскальзывания в циклах уменьшались от 0,017 в первом цикле до 0,012 мм в десятом. Это свидетельствует об уплотнении бетона под ребрами стержней и увеличении его сопротивления смятию. Непосредственно перед разрушением при силе  $F = 24$  кН среднее проскальзывание стержней в бетоне составило 0,054 мм, а при  $F = 25$  кН – 0,202 мм. За разрушающую силу принято  $F_u = 24,4$  кН, при котором смещение торца стержня относительно торца призмы составило примерно 0,10 мм.

### Выводы

1. Исследования сцепления арматуры с бетоном методом математического планирования экспериментов дали возможность построить математические модели для определения предельных напряжений сцепления в зависимости от основных влияющих факторов и их взаимодействия.

2. Математические модели сцепления арматуры с бетоном позволяют проанализировать влияние исследуемых факторов на предельные напряжения сцепления и могут быть использованы в расчетах анкеровки арматуры в железобетонных конструкциях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холмянский, М. М. Контакт арматуры с бетоном / М. М. Холмянский. – М. : Стройиздат, 1981. – 184 с.
2. Шмуклер, В. С. Каркасные системы облегченного типа / В. С. Шмуклер, Ю. А. Климов, Н. П. Бурак. – Харьков : Золотые страницы, 2008. – 336 с.
3. ДСТУ 3760:2006. Прокат арматурный для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови. – Київ : Держспоживстандарт України, 2007. – 28 с.
4. Особенности сцепления с бетоном стержневой арматуры различных профилей / А. С. Семченков [и др.] // Экспертиза. – 2008. – № 8. – С. 58–62.

5. **Хотько, А. А.** Расчетная оценка анкеровки в бетоне ненапрягаемой арматуры с различными видами периодического профиля / А. А. Хотько, Ю. В. Попков, А. В. Василевский // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : сб. науч. тр. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – С. 480–487.
6. **Солдатченко, О. С.** Експериментальні дослідження зчеплення композитної неметалевої арматури з бетоном / О. С. Солдатченко, Ю. А. Клімов, Д. А. Орешкін // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2010. – Вип. 662. – С. 237–241.
7. **Бабич, Є. М.** Визначення напружень зчеплення з бетоном арматури серповидного профілю / Є. М. Бабич, О. С. Бабіч, О. С. Чапюк // Будівельні конструкції : зб. наук. пр. – Київ : ДП НДІБК, 2011. – Вип. 74, кн. 1. – С. 285–292.
8. **Бабич, Є. М.** Зчеплення арматури класу А500С з бетоном різної міцності / Є. М. Бабич, О. С. Чапюк // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій : зб. наук. пр. – Львів : Каменяр, 2009. – Вип. 8. – С. 132–139.
9. **Бабич, Е. М.** Анкеровка в бетоне арматуры серповидного профиля / Е. М. Бабич, Е. Е. Поляновская, А. С. Чапюк // Проблемы современного бетона и железобетона : материалы Третьего междунар. симп. – Минск : Минсктиппроект, 2011. – Т. 1. – С.37–45.
10. **Бабич, Є. М.** Дослідження малоциклової втомленості зчеплення з бетоном арматури серповидного профілю / Є. М. Бабич, О. С. Чапюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне : НУВГП, 2008. – Вип. 17. – С. 105–113.
11. **Дворкін, Л. Й.** Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін, В. В. Житковський. – Рівне : НУВГП, 2011. – 174 с.
12. Рекомендации по применению методов математического планирования эксперимента в технологии бетона. – М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1982. – 103 с.

*Статья сдана в редакцию 18 июля 2014 года*

**Евгений Михайлович Бабич**, д-р техн. наук, проф., Национальный университет водного хозяйства и природопользования. Тел.: +38-050-142-25-04.

**Владимир Евгеньевич Бабич**, канд. техн. наук, доц., Национальный университет водного хозяйства и природопользования. Тел.: +38-050-288-59-68.

**Елена Евгеньевна Поляновская**, аспирант, Национальный университет водного хозяйства и природопользования. Тел.: 38-067-915-09-27.

**Yevgeny Mikhailovich Babich**, DSc (Engineering), Prof., National University of Water Management and Nature Resources Use. Phone: +38-050-142-25-04.

**Vladimir Yevgenyevich Babich**, PhD (Engineering), Associate Prof., National University of Water Management and Nature Resources Use. Phone: +38-050-288-59-68.

**Yelena Yevgenyevna Polianovska**, PhD student, National University of Water Management and Nature Resources Use. Phone: +38-067-915-09-27.