

С.Н. ЛЕОНОВИЧ, д-р техн. наук, иностранный академик РААСН, Н.Л. ПОЛЕЙКО, канд. техн. наук
Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65)

Прочность сцепления арматуры с бетоном, содержащим добавку С-3 и ее модификации

Приведены результаты исследований влияния прочности на сжатие и возраста модифицированного бетона с суперпластификатором С-3 и его модификациями на сцепление с арматурой различных профилей и классов. Установлено, что величина $R_{сц}$ бетона с арматурой существенно зависит от его прочности $R_{сж}$. Эта зависимость линейна и одинакова как для обычного, так и для модифицированного бетона, хотя численные параметры ее различны. В частности, с повышением предела прочности бетона на сжатие от 30 до 70 МПа среднее значение $R_{сц}$ для гладкой арматуры в модифицированном бетоне увеличивается в 1,5 раза, а в обычном – в 1,36 раза. С увеличением величины $R_{сж}$ прочность сцепления арматуры с бетоном повышается, а относительное ее значение $R_{сц}/R_{сж}$ снижается, так как при этом уменьшается относительная прочность бетона на растяжение $R_p/R_{сж}$. Интегральная прочность сцепления существенно зависит от R_p и определяется механическим зацеплением выпусков арматуры с растворной частью бетона. Прочность сцепления с бетоном арматуры периодического профиля значительно выше. Заметно также нарастание прочности сцепления $R_{сц}$ с уменьшением диаметра стержней, особенно арматуры периодического профиля. При этом рельеф поверхности периодического профиля практически не влияет на прочность сцепления с бетоном.

Ключевые слова: модифицированный бетон, химическая добавка, класс бетона, класс арматуры, диаметр, прочность сцепления, профильность арматуры.

S.N. LEONOVICH, Doctor of Technical Sciences, Foreign Academician of RAACS, N.L. POLEIKO, Doctor of Technical Sciences
Belarussian National Technical University (65, Nezavisimosty av., 220013, Minsk, Belarus)

Bonded strength of reinforcement with concrete modified by superplasticizer "S-3"

The results of the effect of the compressive strength and age of modified concrete with superplasticizer C-3 and its modifications to the bond with the reinforcement of various profiles and classes are presented. Established that the adhesive strength R_{ad} of reinforcement and concrete significantly depends on its compressive strength R_c . This dependence is linear and is the same both for normal concrete and for modified concrete, although its numerical parameters are different. Particularly, with increasing of concrete compressive strength limit from 30 to 70 MPa the average value of adhesive strength R_{ad} for smooth reinforcement in modified concrete increases in 1.5 times, and in the normal – 1.36 times. With increasing of compressive strength R_c adhesion strength of reinforcement with concrete increases, and its relative value R_{ad}/R_c reduces, because along with it reduces the relative tensile strength R_p/R_c . Integral adhesion strength essentially depends on the tensile strength R_p and is determined by the mechanical engagement of free length of reinforcing bars with mortar part of concrete. Adhesion strength of periodic profile reinforcement with concrete is much higher. Also it can be seen the increase of adhesive strength R_{ad} with decreasing of rods diameter, especially in periodic profile fittings. Thus, periodic profile surface relief does not affect the adhesive strength with concrete.

Keywords: modified concrete, modifier, class of concrete compressive strength, class of reinforcement, diameter, bonded strength, profile of reinforcement.

В настоящее время в строительном комплексе Республики Беларусь находят применение бетоны, содержащие добавку С-3 и ее модификации, которые характеризуются специфическим составом, различной скоростью нарастания прочности. Эти их особенности оказывают значительное влияние на такой фактор, как сцепление арматуры с бетоном, определяющее несущую способность железобетонных конструкций [1–4]. Цель настоящей работы – оценить влияние прочности и возраста модифицированного бетона на сцепление его с арматурой различных классов.

Для этого изготавливались бетонные образцы-призмы из цемента ОАО «Красносельскстройматериалы» марки ПЦ 500 Д0, гранитного щебня Микашевичского карьера фракции 5–20 мм и кварцевого песка карьера Крапужино с $M_{кр} = 2,4$; количество химической добавки С-3 вводили 0,4% от массы цемента.

По геометрической оси образцов устанавливали арматурные стержни, выступающие с обеих торцов на 100–300 мм, для крепления приборов и захвата.

Прочностные и деформативные свойства бетона определяли испытаниями стандартных кубов и призм, а физико-механические характеристики арматурной стали определяли испытаниями на растяжение отрезков арматурных стержней.

Для исследования сцепления арматуры с бетоном изготовлены две серии образцов. В первую серию входили образцы-призмы из бетона с химической добавкой проектного класса С12/15 и С35/45, во вторую – призм-близнецы из бетона без добавки. Высоту призм на-

значали в зависимости от длины заделки стержней в бетоне (10d, 15d и 20d), а размеры сечения – 100×100 мм и 150×150 мм в зависимости от диаметра арматуры (d=14; d=16, d=22 мм), принимая расстояние от поверхности стержня до грани призмы равным 3–5 d.

Испытания на выдергивание арматуры из бетона проводили на прессе типа МУП-100 с помощью специального шарнирного приспособления, позволяющего осуществлять осевое приложение растягивающей нагрузки. К свободному концу арматурного стержня крепили индикатор часового типа для фиксации сдвига, до начала которого скорость нарастания нагрузки составляла 100 Н/с; после этого она прикладывалась ступенями, составляющими 1/20 от нагрузки $F_{раз}$, соответствующей достижению предела прочности бетона и нулевой сцеплению арматуры с бетоном (рис. 1).

Прочность сцепления арматуры с бетоном определялась как среднее напряжение в пределах длины заделки стержня:

$$R_{сц} = F_{раз}/(\Pi \cdot d \cdot l_a).$$

Результаты испытания образцов представлены в табл. 1 и на рис. 2. Видно, что прочность сцепления арматуры с модифицированным бетоном несколько выше, чем с обычным: для арматуры периодического профиля – в среднем в 1,16 раза, при этом для стержней диаметром d=10 мм – в 1,39; d=14 мм – в 1,1; d=16 мм – в 1,09; d=22 мм – в 1,04 раза. Для гладкой арматуры это превышение еще значительнее – в отдельных случаях в 1,6 раза.

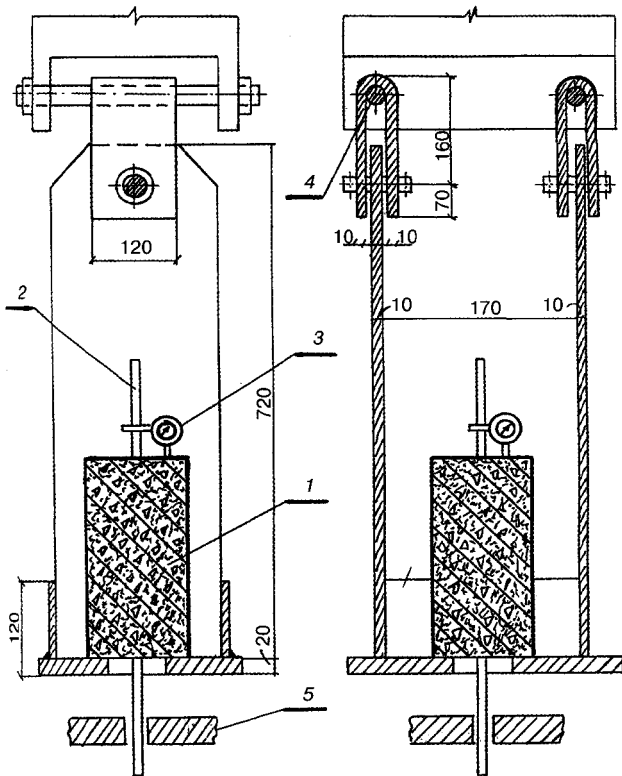


Рис. 1. Схема испытания образцов на сцепление арматуры с бетоном: 1 - бетонная призма; 2 - арматурный стержень; 3 - индикатор; 4 - штанги пресса; 5 - нижние зажимы пресса

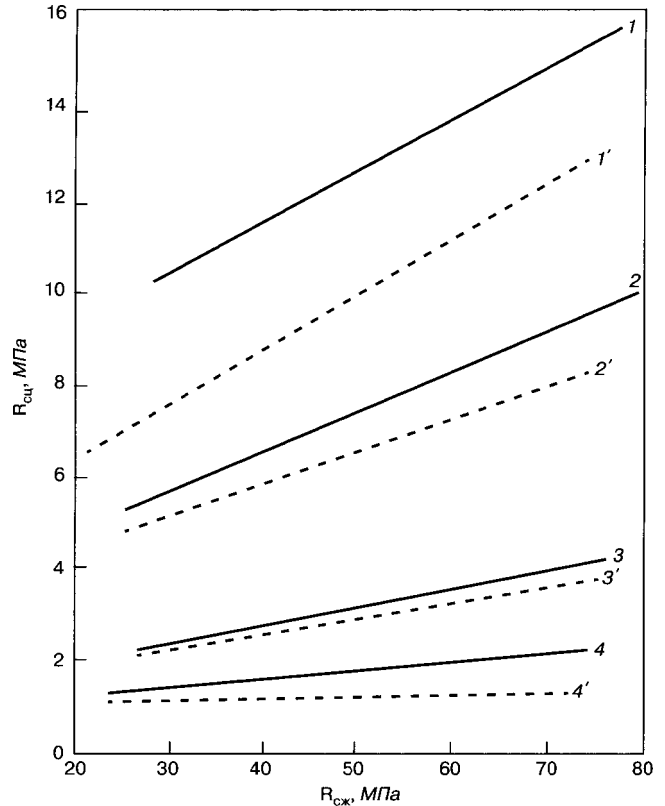


Рис. 2. Прочность сцепления арматуры с бетоном в зависимости от предела прочности бетона: 1, 1' - арматура периодического профиля, $d=10$ мм; 2, 2' - то же, $d=22$ мм; 3, 3' - гладкая арматура, $d=10$ мм; 4, 4' - то же, $d=22$ мм (сплошная линия - модифицированный бетон, пунктирная - обычный бетон)

Значение $R_{сщ}$ существенно зависит от прочности бетона. Эта зависимость линейна и одинакова как для обычного, так и для модифицированного бетона, хотя численные параметры ее различны (рис. 2). В частности, с повышением предела прочности бетона на сжатие $R_{сж}$ от 30 до 70 МПа среднее значение $R_{сщ}$ для гладкой арматуры в модифицированном бетоне увеличивается в 1,5, а в обычном - в 1,36 раза.

С увеличением $R_{сж}$ прочность сцепления арматуры с бетоном повышается, а относительное ее значение $R_{сщ}/R_{сж}$ снижается, так как при этом уменьшается относительная прочность бетона на растяжение $R_p/R_{сж}$. Интегральная прочность сцепления существенно зависит от R_p и определяется механическим зацеплением выступов арматуры с растворной частью бетона, работающего на срез. В проведенных испытаниях при увеличении $R_{сж}$ от 30 до 70 МПа среднее значение $R_{сщ}$ для арматуры периодического профиля снижалось в 1,5 раза для модифицированного и в 1,8 раза для обычного бетона.

Прочность сцепления с бетоном арматуры периодического профиля значительно выше (с модифицированным бетоном - в среднем в три раза). Заметно также нарастание прочности сцепления $R_{сщ}$ с уменьшением диаметра стержней, особенно арматуры периодического профиля. Так, с уменьшением ее диаметра в 2,2 раза (с 22 до 10 мм) прочность сцепления бетона с арматурой $R_{сщ}$ в модифицированном бетоне возрастает в среднем в 1,6 раза (в обычном бетоне - в 1,4 раза). При этом рельеф поверхности периодического профиля практически не влияет на прочность ее сцепления с бетоном.

Обработка результатов испытаний позволила установить опытные зависимости между прочностью сцепления арматуры с бетоном и прочностью последнего:

- для модифицированного бетона и арматуры периодического профиля:

$$R_{сщ} = 61 + 0,066 R_{сж}; \quad (1)$$

- для модифицированного бетона и гладкой арматуры:

$$R_{сщ} = 24 + 0,015 R_{сж}; \quad (2)$$

- для бетона без добавки и арматуры периодического профиля:

$$R_{сщ} = 47,3 + 0,08 R_{сж}; \quad (3)$$

- для бетона без добавки и гладкой арматуры:

$$R_{сщ} = 9,6 + 0,015 R_{сж}; \quad (4)$$

Полученные зависимости справедливы в исследованном диапазоне прочности бетона ($R_{сж}=20-70$ МПа). При $R_{сж} \leq 20$ МПа, когда прочность сцепления падает до нуля, формулам (1-4) соответствуют зависимости вида:

- для модифицированного бетона и арматуры периодического профиля $R_{сщ}=0,32 R_{сж}$, гладкой арматуры - $R_{сщ}=0,32 R_{сж}$;

- для бетона без добавки и арматуры периодического профиля $R_{сщ}=0,32 R_{сж}$, гладкой арматуры - $R_{сщ}=0,063 R_{сж}$.

Опытные значения прочности сцепления бетона с арматурой соответствуют теоретическим, вычисленным по формулам (1-4).

Экспериментальные данные характеризуются определенным разбросом, и поэтому прочность сцепления бетона с арматурой определить по формулам (1-4) нельзя. Необходимо знать нормативное значение.

Формулы для определения в диапазоне изменения предела прочности бетона на сжатие от 20 до 70 МПа имеют вид:

Таблица 1

№ п/п	Модифицированный бетон				Обычный бетон			
	Диаметр и класс арматуры	Длина заделки стержней в бетоне, см	Прочность бетона $R_{сж}$, МПа	Прочность сцепления $R_{сц}$, МПа	Диаметр и класс арматуры	Длина заделки стержней в бетоне, см	Прочность бетона $R_{сж}$, МПа	Прочность сцепления $R_{сц}$, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	10S240	10	28,7	2,5	10S240	10	26,2	1,4
2	10S400	10	28,7	7	10S400	10	35,5	6,1
3	10S800	10	35,5	10,6	10S800	10	26,2	7,1
4	10S240	15	35,7	2,4	10S240	10	22	5
5	10S500	15	36,7	7,4	10S240	15	35,5	1,5
6	10S1200	15	35,5	11,7	10S500	15	35,5	8,2
7	10S240	20	35,7	2,8	10S1200	15	22	8,5
8	10S1200	20	38,2	12,2	10S240	20	35,5	1,5
9	10S240	9,3	35,7	2,6	10S1200	20	34,6	11,1
10	16S400	9,3	38,6	8,2	16S240	9,3	35,5	1,6
11	16S800	9,3	38,2	7,8	16S400	9,3	38,7	5,4
12	16S240	12,5	28,7	3,1	16S800	9,3	34,6	5,3
13	16S500	12,5	28,7	7,5	16S500	12,5	35,5	8,7
14	14S1200	14,3	35,5	8,9	14S1200	14,3	22,0	7,6
15	22S240	9,1	35,7	3,4	22S240	9,1	35,5	1,9
16	22S400	9,1	38,2	7,4	22S400	9,1	34,6	7
17	22S500	9,1	28,2	4,7	22S500	9,1	16,2	6,4
18	16S240	18,7	38,6	2,1	16S240	21,4	34	10,6
19	16S800	18,7	28,2	8,5	14S1200	21,4	26,2	7,9
20	22S240	13,6	28,2	2,4	22S240	13,6	34	1,4
21	22S400	13,6	37,3	6,7	22S400	13,6	34	6,6
22	22S800	13,6	37,3	6,5	22S800	13,6	33	5,8
23	22S240	20,4	37,3	2,8	22S240	20,4	33	1,2
24	22S800	20,4	32,8	5	22S800	20,4	33	4,8
25	10S240	10	75,3	4,5	10S240	10	64,9	2,5
26	10S800	10	75,6	16,3	10S800	10	64,2	12
27	10S1200	15	75,6	15,9	10S240	9,3	61,1	1,7
28	16S240	9,3	68,7	3,7	16S800	9,3	58,5	10,9
29	16S800	9,3	70,4	10,8	14S1200	10,7	64,2	11
30	14S1200	14,3	75,6	11,5	14S1200	14,3	58,5	9,5
31	22S240	9,1	68,7	3,9	22S240	9,1	61,1	1,5
32	22S500	9,1	74,9	10	22S500	9,1	59	7,7
33	22S400	13,6	69,5	6,8	22S400	13,6	59,2	7

– для модифицированного бетона и арматуры периодического профиля:

$$R_{сц}^H = 24 + 0,066 R_{сж}; \quad (5)$$

– для модифицированного бетона с гладкой арматурой:

$$R_{сц}^H = 12 + 0,015 R_{сж}; \quad (6)$$

– для бетона без химической добавки и арматуры периодического профиля:

$$R_{сц}^H = 16 + 0,08 R_{сж}; \quad (7)$$

– для бетона без химической добавки и гладкой арматуры:

$$R_{сц}^H = 3,6 + 0,015 R_{сж}; \quad (8)$$

Соответственно при $R_{сж} \leq 20$ МПа:

– для модифицированного бетона и арматуры периодического профиля:

$$R_{сц}^H = 0,186 R_{сж}; \quad (9)$$

– для модифицированного бетона и гладкой арматуры:

$$R_{сц}^H = 0,075 R_{сж}; \quad (10)$$

– для бетона без химической добавки и арматуры периодического профиля:

$$R_{сц}^H = 0,016 R_{сж}; \quad (11)$$

– для бетона без химической добавки и арматуры гладкой:

$$R_{сц}^H = 0,033 R_{сж}; \quad (12)$$

Таблица 2

Прочности бетона при сжатии, МПа	Значения $R_{сж}^н$ для арматуры	
	периодического профиля	гладкой
10	1,86	0,75
20	3,72	1,5
30	4,38	1,65
40	5,04	1,8
50	5,7	1,95
60	6,36	2,1
70	7,02	2,25
80	7,68	2,4

Значения для модифицированного бетона, вычисленные по формулам (5–10), приведены в табл. 2.

Расчетные значения прочности сцепления арматуры с бетоном определяются делением $R_{сж}^н$ на требуемый коэффициент надежности по бетону.

Список литературы

1. Мадатян С.А. Свойства арматуры железобетонных конструкций в России на уровне лучших мировых стандартов // *Бетон и железобетон*. 2013. № 5. С. 2–5.
2. Мадатян С.А. Новая арматурная сталь класса А 600 С // *Стройметалл*. 2010. № 5. С. 7–10.
3. Мадатян С.А. Холоднодеформированная арматура класса В 500 С // *Метизы*. 2008. № 2. С. 20–25.
4. Тихонов И.Н. Оценка эффективности арматурного проката с различными видами периодического профиля поверхности // *Строительные материалы*. 2013. № 3. С. 29–34.

Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

Сцепление арматуры с бетоном зависит от его прочности, с повышением которой сцепление возрастает. Закономерность эта качественно одинакова как для обычного, так и для модифицированного бетона, однако количественные значения, характеризующие сцепление, в обоих случаях различны. Для модифицированного бетона и арматуры периодического профиля повышение прочности бетона с 30 до 70 МПа способствует увеличению сцепления в среднем в 1,5 раза, а в обычном бетоне в 1,36 раза.

С увеличением $R_{сж}$ бетона прочность сцепления арматуры с бетоном повышается, а относительное ее значение ($R_{сж}^н/R_{сж}$) снижается, так как при этом уменьшается относительная прочность бетона на растяжение ($R_p/R_{сж}$).

Сцепление бетона с арматурой зависит также от ее диаметра и класса. Наиболее значительный прирост сцепления для обоих видов бетона соответствует арматуре периодического профиля диаметром 10 мм, а для остальных диаметров сцепление несколько ниже.

References

1. Madatyan S.A. The properties of reinforced concrete structures in Russia on the level of the best world's standards. *Beton i zhelezobeton*. 2013. No. 5, pp. 2–5 (in Russian).
2. Madatyan S.A. New reinforcement steel by class A 600 C. *Stroimetall*. 2010. No. 5, pp. 7–10.
3. Madatyan S.A. Cold-deformed reinforcement by class B 500 C. *Metizi*. 2008. No. 2, pp. 20–25 (in Russian).
4. Tikhonov I.N. The estimation of reinforcement with different kinds of periodic profile of surface. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 3, pp. 29–34.