

В. Ф. СТЕПАНОВА, С. С. КАПРИЕЛОВ, А. В. ШЕЙНФЕЛЬД, П. И. БАРЫКИН,
кандидаты техн. наук (НИИЖБ)

Влияние добавок микрокремнезема на коррозионную стойкость арматурной стали в бетоне

Одним из факторов, сдерживающих применение микрокремнезема в строительстве, является отсутствие в отечественной литературе достаточных сведений о коррозионных свойствах арматурной стали в бетонах с этими добавками.

Зарубежная информация ограничивается сведениями о бетонах с добавкой микрокремнезема, содержащего не менее 85% диоксида кремния [1]. В то же время под термином «микрокремнезем» мы подразумеваем ультрадисперсные отходы металлургических производств с более широким, чем принято за рубежом, диапазоном свойств [2].

Эффективность микрокремнезема зависит как от его физико-химических свойств, так и от типа применяемой водоредуцирующей химической добавки [2...4]. Наиболее эффективно сочетание микрокремнезема с суперпластификатором С-3 [3].

Применение таких добавок способствует связыванию выделяющейся при гидратации цемента извести с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция, что может привести к уменьшению рН поровой жидкости и снижению пассивирующего действия бетона по отношению к арматуре. С другой стороны, изменение поровой структуры цементного камня с этими добавками, заключающееся в увеличении гелевой и уменьшении капиллярной пористости, способствует снижению проницаемости бетонов [4], что должно положительно сказываться на обеспечении длительной сохранности стали в бетоне.

Основываясь на данных предположениях, в НИИЖБе по результатам ускоренных и длительных испытаний проведена оценка пассивирующего действия тяжелого бетона с добавками микрокремнезема марок МК-85, МК-65, МК-45 (в соответствии с ТУ 7-249533-01-90), содержащего 92, 67 и 45 % диоксида кремния.

Исследования проводили на бетонах, прошедших тепловлажностную обработку по режиму 3+3+6+2 часа при $T_{из}=+80^{\circ}\text{C}$, отличающихся между собой видом и содержанием микрокремнезема, но имеющих постоянный расход вяжущего (Ц+МК) и воды (табл.1). Применяли портландцемент (добавка трепела 12 %) и шлакопортландцемент (добавка шлака 40 %) марки 400 Воскресенского завода. В качестве ингибитора коррозии стали использовали нитрит натрия. Подвижность бетонных смесей регулировали введением суперпластификатора.

Таблица 1

№ состава	Состав бетона, кг/м ³			Дозировка С-3 с добавками МК, % (Ц+МК)				Прочность бетона после ТВО+28 сут нормального хранения, МПа			
	Ц	МК	П	-	МК-85	МК-65	МК-45	-	МК-85	МК-65	МК-45
-	350	-	740	0,5	-	-	-	40	-	-	-
1	315	32	725	-	0,5	1,0	0,5	-	50	48	44
2	290	60	720	-	0,6	1,8	0,6	-	56	52	46
3	270	80	715	-	0,7	2,8	0,7	-	62	57	50

ПРИМЕЧАНИЯ:

1. Бетоны с 30% МК на портландцементе (состав 3) и с 20% МК на шлакопортландцементе (состав 2) были изготовлены с добавкой 2% NaNO₂ и без нее (в дальнейшем маркировка 3Н и 2Н).
2. Расход щебня и воды во всех составах бетона постоянный и равен 1175 кг/м³ и 154 л/м³ соответственно.
3. Подвижность бетонных смесей на портландцементе – 8 см, на шлакопортландцементе – 5 см.

Ускоренные электрохимические испытания проводили в соответствии со СТ СЭВ 4421-81 «Защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре. Электрохимический метод испытаний», а также другими методами. Образцы бетона размером 7х7х14 см с арматурной сталью класса А-1 диаметром 6 мм и длиной 120 мм испытывали после тепло-влажностной обработки, а также после 30 и 60 циклов попеременного увлажнения и высушивания. Об электрохимическом состоянии стали судили по характеру анодных поляризационных кривых на стали в бетоне с микрокремнеземом. Коррозионное состояние стали оценивали площадью коррозионных поражений на арматурных стержнях, извлеченных из бетона после электрохимических испытаний (табл. 2).

Таблица 2

№ состава	Марка микрокремнезема	рН бетона в зоне расположения арматуры			Плотность тока, мкА/см ² при E _{ст} =+300 мВ			Площадь коррозии, %		
		исходное состояние	30 циклов	60 циклов	исходное состояние	30 циклов	60 циклов	исходное состояние	30 циклов	60 циклов
-	-	12,43/12,2	12,49/12,3	12,51/12,3	6,3/5,3	5,1/5,5	4,9/5,9	0/0	0/0	0/0
1	МК-85	12,3/12,2	11,9/12,0	11,95/12,0	4,1/4,2	3,7/5,3	3,5/4,8	0/0	0/0	0/0
2		11,85/11,7	11,82/11,7	11,80/11,6	4,7/9,8	8,2/11,9	8,8/12,2	0/5	0/20	0/40
3		11,70/-	11,68/-	11,61/-	18,6/-	27,4/-	19,9/-	10/-	25/-	50/-
3Н/2Н		11,73/11,8	11,71/11,9	11,72/11,9	7,4/3,2	5,3/3,7	4,9/4,3	0/0	0/0	0/0
1	МК-65	11,97/12,1	12,0/12,2	12,10/12,2	6,8/3,2	2,3/3,5	3,3/3,5	0/0	0/0	0/0
2		11,83/11,8	11,85/11,6	11,85/11,6	5,4/8,5	3,2/12,3	5,5/12,3	0/3	0/5	0/5
3		11,50/-	11,45/-	11,45/-	10,8/-	16,2/-	18,7/-	10/-	30/-	40/-
3Н/2Н		11,80/12,0	11,90/11,9	11,90/11,9	3,9/4,5	2,8/5,6	4,8/5,9	0/0	0/0	0/0
1	МК-45	11,95/11,8	12,10/11,9	12,15/11,9	4,3/5,2	3,3/3,7	4,1/3,7	0/0	0/0	0/0
2		11,85/11,6	11,90/11,5	11,90/11,6	5,3/12,2	2,4/14,4	5,5/10,8	0/5	0/10	0/10
3		11,60/-	11,50/-	11,50/-	18,5/-	17,7/-	12,6/-	10/-	30/-	80/-
3Н/2Н		11,80/11,7	11,90/11,7	11,90/11,7	4,3/5,6	2,1/4,6	3,2/5,7	0/0	0/0	0/0

ПРИМЕЧАНИЕ: Перед чертой – результаты испытаний арматуры в бетонах с МК на портландцементе, после черты – на шлакопортландцементе.

Длительные исследования арматуры в бетоне с микрокремнеземом проводили в естественных атмосферных условиях, а также в условиях постоянной повышенной влажности. Образцы из армированного бетона помещали на стенд (в атмосферных условиях Москвы) и в боксы с относительной влажностью газовоздушной среды 65, 75, 85 и 95%. После 1 и 2 лет выдерживания в этих условиях определяли площадь коррозионных поражений стали, глубину карбонизации бетона с микрокремнеземом и рН жидкой фазы бетона в зоне расположения арматуры. Результаты коррозионных испытаний стали в таком бетоне представлены в табл.3.

№ состава	Марка микрокремнезема	Площадь коррозии, %					pH поровой жидкости, 2 года атмосферных условий	Период нейтрализации защитного слоя бетона (δ=20 мм) в среде CO ₂ , лет
		2 года, атмосферных условий	W=65%	W=75%	W=85%	W=95%		
-	-	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	12,5/-	100/70
1	МК-85	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	12,0/12,0	160/110
2		0/5	0/10	0/10	0/25	0/30	11,9/11,6	150/70
3		40/-	45/-	40/-	60/-	65/-	11,7/-	145/-
3Н/2Н		0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	11,8/11,8	-/-
1	МК-65	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	12,1/12,1	150/85
2		0/5	0/5	0/10	0/20	0/25	11,9/11,7	100/75
3		50/-	50/-	50/-	70/-	70/-	11,5/-	75/-
3Н/2Н		0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	11,7/11,8	-/-
1	МК-45	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	12,2/12,0	150/80
2		0/5	0/5	0/5	0/10	0/15	11,9/11,9	100/50
3		20/-	20/-	25/-	50/-	50/-	11,5/-	70/-
3Н/2Н		0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	11,7/11,7	-/-

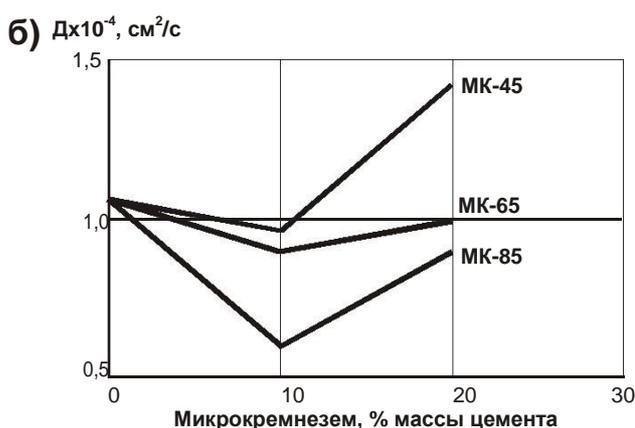
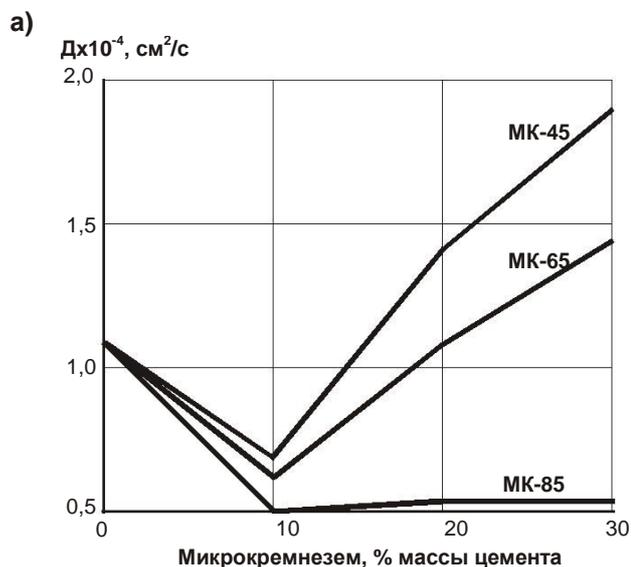
ПРИМЕЧАНИЕ: Перед чертой – результаты испытаний арматуры в бетонах с МК на портландцементе, после черты – на шлакопортландцементе.

Анализ коррозионного состояния стали в исследованных, составах бетона показал, что использование микрокремнезема марок МК-45, МК-65 и МК-85 в дозировках до 20 % массы портландцемента (составы 2) и до 10 % массы шлакопортландцемента (составы 1) не снижает пассивирующего действия бетона по отношению к стальной арматуре. Применение микрокремнезема в количествах, превышающих указанные дозировки (состав 3 на портландцементе и состав 2 на шлакопортландцементе), вызывает коррозию арматуры уже сразу после тепловлажностной обработки.

Анализ результатов длительных коррозионных испытаний показал, что при относительной влажности газовоздушной среды до 75 % и в естественных атмосферных условиях в течение 2 лет коррозии арматуры не наблюдается. При увеличении относительной, влажно-сти более 75% коррозия арматуры начинает развиваться, причем степень коррозионных поражений (см. табл.3) возрастает с увеличением влажности, что связано с понижением pH жидкой фазы бетона.

Исследование щелочности жидкой фазы бетонов в исходном состоянии (см. табл.2) и прошедших длительные испытания (см. табл.3) показало, что pH поровой жидкости в составах, содержащих до 20 % микрокремнезема от массы портландцемента и до 10 % от массы шлакопортландцемента (составы 2 и 1) практически не изменяется и составляет 12,3...11,83. Дальнейшее увеличение расхода микрокремнезема снижает pH поровой жидкости бетона ниже минимального значения, необходимого для пассивации стали (pH=11,8). Использо-

ние ингибитора коррозии стали — нитрита натрия (NaNO_2) в количестве 2% массы вяжущего (Ц+МК) позволяет расширить диапазон применения микрокремнезема в бетонах до 30 % массы портландцемента и 20 % массы шлакопортландцемента (составы 3Н и 2Н) при сохранении пассивирующего действия бетона по отношению к стальной арматуре.



Эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в карбонизированном слое бетона с добавками микро-кремнезема и суперпластификатора С-3
а - на портландцементе б - на шлакопортландцементе

В процессе эксплуатации в атмосферных условиях бетон подвергается воздействию углекислого газа (карбонизации) вследствие чего происходит связывание щелочных компонентов бетона в карбонаты, уменьшение рН поровой жидкости бетона, а, следовательно, развитие коррозии арматуры в процессе эксплуатации конструкции.

Критерием оценки длительности защитного действия бетона с микрокремнеземом по отношению к стали является коэффициент диффузии углекислого газа, в карбонизированном слое бетона [5]. Результаты определения проницаемости бетонов с микрокремнеземом и С-3 для углекислого газа показали (см. рисунок), что введение 10% микрокремнезема приводит к снижению коэффициента диффузии CO_2 на 40...60%, что способствует увеличению длительности защитного действия бетона по отношению к стальной арматуре.

Увеличение дозировок микрокремнезема до 20 % практически не влияет на изменение проницаемости, бетона для CO_2 . При увеличении его расхода до 30% массы цемента проницаемость бетона для углекислого газа возрастает, что связано, на наш взгляд, с малым запасом клинкерного фонда в бетоне, а также с повышенным содержанием в составе цементного камня низкоосновных гидросиликатов кальция [4], которые карбонируются быстрее других силикатных фаз [6]. Но и в этом случае период нейтрализации защитного слоя этих бетонов

толщиной 20 мм составляет не менее 70 лет. Увеличение расхода микрокремнезема более 20% массы цемента требует детального изучения стойкости бетона при воздействии на него знакопеременных температур.

Анализ состояния ферм пролетом 24 м, пустотных и ребристых плит, колонн, ригелей, тубингов, а также монолитных сооружений, выпущенных с добавками микрокремнезема и суперпластификатора С-3 заводами ЖБИ Павлодара, Актюбинска и Новокузнецка с 1988 по 1992 гг. и использованных на строительстве промышленных и гражданских объектов пока-зал, что конструкции находятся в рабочем состоянии, коррозии арматуры не наблюдается.

Выводы

Для обеспечения сохранности арматурной стали в железобетонных конструкциях допускается применение микрокремнезема марок МК-85, МК-65 и МК-45 как добавок в бетон в количестве не более 20% массы портландцемента и 10% массы шлакопортландцемента.

Применение ингибитора коррозии стали — нитрита натрия в количестве 2% массы вяжущего (Ц+МК) позволяет расширить диапазон применения микрокремнезема в бетонах до 30% массы портландцемента и 20% массы шлакопортландцемента,

Использование до 20 % микрокремнезема позволяет получать особоплотные бетоны, что обеспечивает надежную защиту арматуры при эксплуатации конструкций при относительной влажности газовой среды до 75%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. S.Helland, P.Acker, H.E.Gram, E.J.Sellevoid. Condensed silica fume in concrete // State of art report, FIP Commission on concrete, 1988, p.28-31,
2. В.Г.Батраков, С.С.Каприелов, Ф.М.Иванов, А.В.Шейнфельд. Оценка ультрадисперсных отходов металлургических производств как добавок в бетон. // Бетон и железобетон, 1990, № 12, с.15-17.
3. Батраков В.Г. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Эффективность применения ультрадисперсных отходов ферросплавного производства. // Бетон и железобетон, 1989, № 8, с.24 -25.
4. Kapriyelov S.S., Sheinfeld A.V. Influence of cement stone structure with silica fume and superplastlcizer admixtures on concrete strength and permeability // Blended cements in construction - Structural Integrity Research Institute, University of Sheffild, UK,1991, p.317-328.
5. Руководство по определению диффузионной проницаемости бетона для углекислого газа, М.: НИИЖБ, 1974, с.19.
6. Ю.М.Бутт, С.Д.Окороков, М.М.Сычев, В.В.Тимашев. Технология вяжущих веществ, М.: Высшая школа, 1965, с.143.