

Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №2 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-2>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/11TVN216.pdf>

DOI: 10.15862/11TVN216 (<http://dx.doi.org/10.15862/11TVN216>)

Статья опубликована 22.03.2016.

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чэнь Тао, Успанов А.М. Анализ экспериментальных данных по кинетике проникания сульфатсодержащих сред в железобетонные конструкции и влиянию их на механические характеристики компонентов железобетона. Часть 2. Влияние на механические характеристики железобетона // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №2 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/11TVN216.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/11TVN216

**УДК 624.042**

**Овчинников Илья Игоревич**

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов<sup>1</sup>  
ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»  
Филиал в г. Сочи, Россия, Сочи  
Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: [bridgeart@mail.ru](mailto:bridgeart@mail.ru)

**Овчинников Игорь Георгиевич**

ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», Россия, Пенза  
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов  
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, Пермь  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: [bridgesar@mail.ru](mailto:bridgesar@mail.ru)

**Чэнь Тао**

ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Россия, Москва  
Аспирант  
E-mail: [313085767@qq.com](mailto:313085767@qq.com)

**Успанов Амергалей Марзагалеевич**

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов  
Аспирант  
E-mail: [u.a.-91@mail.ru](mailto:u.a.-91@mail.ru)

**Анализ экспериментальных данных по кинетике  
проникания сульфатсодержащих сред в железобетонные  
конструкции и влиянию их на механические  
характеристики компонентов железобетона. Часть 2.  
Влияние на механические характеристики железобетона**

**Аннотация.** Приведены экспериментальные данные по влиянию сульфатсодержащей среды на физико-механические характеристики бетона, механические характеристики стальной арматуры, а также по коррозионному разрушению стальной арматуры в условиях воздействия сульфатсодержащей среды.

---

<sup>1</sup> 410054, Саратов, Политехническая 77

Установлено, что воздействие сульфатсодержащей среды на железобетон носит объемный характер, приводя к появлению наведенной, изменяющейся с течением времени неоднородности механических свойств. Подавляющее большинство экспериментальных данных получено на бетонных образцах, имеющих неоднородные механические свойства бетона для различных объемов образца. Поэтому эти данные дают только некоторую качественную характеристику кинетики коррозионных процессов и не позволяют их использовать для идентификации моделей, корректно описывающих изменение физико-механических свойств материала с учетом неоднородности их распределения по объему элемента. На начальных стадиях взаимодействия бетона со средой происходит ее временное упрочнение. Величина упрочнения зависит как от свойств бетона, так и от свойств сульфатсодержащей среды. При коррозионном износе арматуры в бетоне имеет место коррозионное «распухание» арматурных стержней, вызванное тем, что продукты коррозии арматуры занимают больший объем, чем объем «съеденного» коррозией металла. Результатом этого эффекта является появление в защитном слое бетона коррозионных трещин, ориентированных вдоль арматуры.

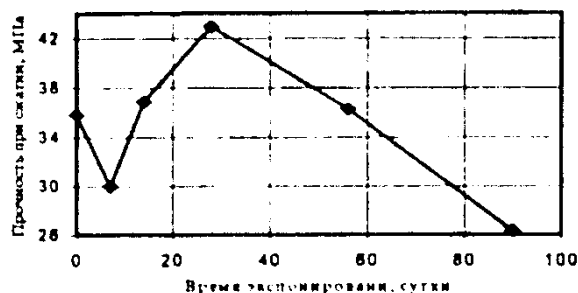
**Ключевые слова:** сульфатсодержащая среда; коррозия; деградация; железобетон; механические свойства; бетон; диаграмма деформирования

### Введение.

В статье [1] рассматриваются экспериментальные данные по кинетике проникания сульфатсодержащих сред железобетонные конструктивные элементы и ее последующему взаимодействию и распределению по сечению элементов. Данная статья является ее продолжением.

### Экспериментальные данные по влиянию сульфатсодержащей среды на физико-механические характеристики бетона

В [2] приводятся данные экспериментальных исследований о кинетике изменения прочности и микротвердости бетонов в условиях воздействия 2% раствора серной кислоты. Метод склерометрической микротвердости позволяет определять характер изменения свойств по высоте поперечного сечения экспериментальных образцов. В начальные сроки (7-14 суток) экспонирования образцов в агрессивной среде отмечается первоначальное снижение прочностных показателей экспериментальных образцов (рис. 1).



*Рисунок 1. Изменение прочности бетона во времени [2]*

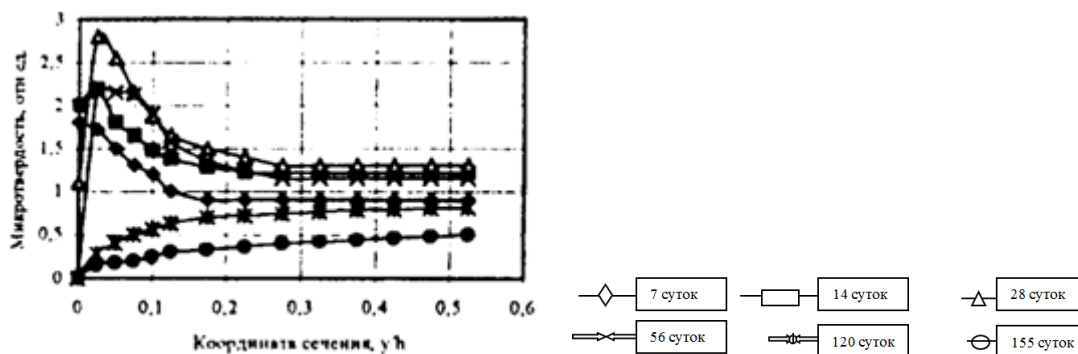


Рисунок 2. Эпюры микротвердости по глубине образца [2]

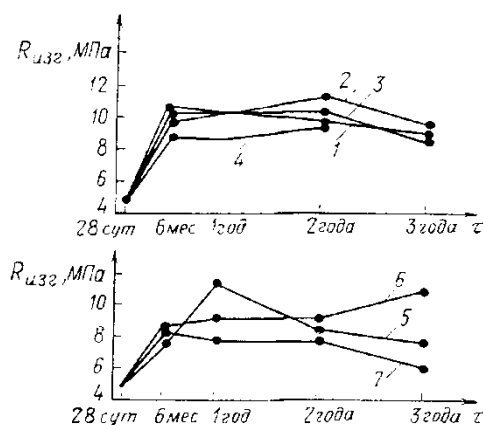


Рисунок 3. Изменение прочности бетонов во времени для разных концентраций среды [3]: 1 — насыщенный раствор гипса; 2 — раствор сернокислого натрия,  $SO_4^{2-}=20000$  мг/л; 3 — то же,  $SO_4^{2-}=35000$  мг/л; 4 — вода; 5 — раствор сернокислого магния,  $SO_4^{2-}=5000$  мг/л; 6 — то же,  $SO_4^{2-}=20000$  мг/л; 7 — 5%-ный раствор хлористого магния

Следующий этап (14-28 суток) связан с повышением прочностных характеристик и в литературе называется этапом позитивной коррозии. При последующем экспонировании (более 28 суток) отмечаются необратимые ухудшения физико-механических свойств материала, выражающиеся в стабильном снижении прочностных. Авторы отмечают, что изменение свойств цементных бетонов под влиянием агрессивных сред происходит послойно. Графические зависимости, полученные по результатам испытаний на склерометре, позволяют выделить:

- 1) зону деструкции (разрушения);
- 2) зону позитивной коррозии, характеризуемой повышенными значениями физико-механических свойств;
- 3) зону деградации (рисунок 2).

В работе [3] представлены результаты исследований влияния сульфатсодержащих сред различных концентраций на прочность бетонов во времени. Бетонные образцы размером 4x4x16 см были изготовлены из различных клинкерных цементов. Образцы испытывали при постоянном погружении в растворы сернокислого натрия (с концентрацией  $SO_4^{2-}$  20000 и 35000 мг/л), сернокислого магния (с концентрацией  $SO_4^{2-}$  5000 и 20000 мг/л и  $Mg^{2+}$  1150 и 4600 мг/л), в насыщенном растворе гипса, а также в 5%-ном растворе хлористого магния. Результаты трехлетних испытаний приведены на рисунке 3.

В работе [4] приводятся экспериментальные данные о влиянии сульфатов различных металлов на прочностные характеристики цементно-песчаного раствора. Исследовались сульфаты меди, никеля, цинка, натрия, магния, железа, марганца, кобальта, кадмия, алюминия, бериллия при концентрации растворов 3; 5; 10 и 25 г/л по  $SO_4^{2-}$ . Изменение прочности характеризовали по коэффициенту стойкости  $K_{ст}$ , определяемому как отношение прочности на изгиб цементно-песчаных (1:3, В/Ц=0,6) призм размером 1x1x6 см, находившихся в агрессивных растворах, к прочности образцов-близнецов, хранившихся в воде (таблица 1). В работе использовался сульфатостойкий портландцемент.

Таблица 1

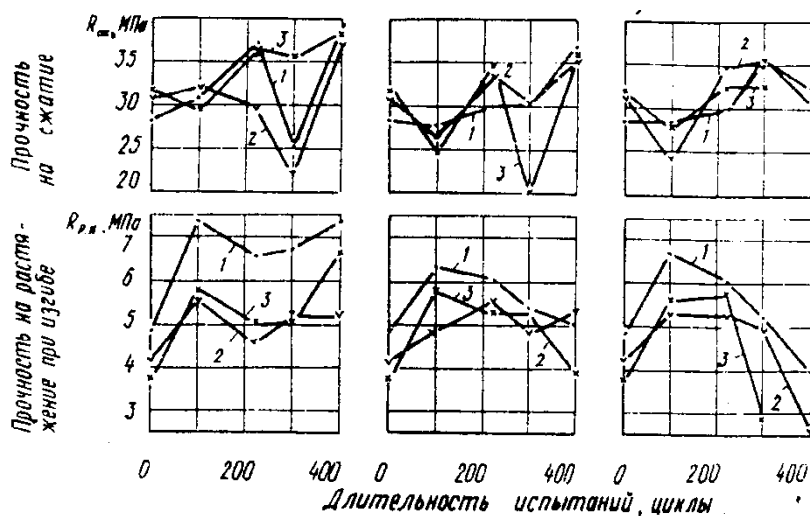
Изменение коэффициента стойкости в разных растворах [4]

Раствор сульфата	Концентрация растворов по $SO_4^{2-}$ , мг/л										
	3000			5000		10000			25000		
	pH	$K_{ст}$ 56 сут	$K_{ст}$ 6 мес.	pH	$K_{ст}$ 56 сут.	pH	$K_{ст}$ 56 сут	$K_{ст}$ 6 мес.	pH	$K_{ст}$ 14 сут.	$K_{ст}$ 56 сут.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кобальта	4,3	-	0,98	-	1,03	5,9	1,2	0,99	3,26	1,4	1,29
Кадмия	5,8	-	0,92	6,1	1,33	4,6	1,1	1,03	5,9	1,29	1,22
Цинка	5,7	1	0,93	5,1	1,14	5,6	1,14	0,96	4,6	1,01	1,08
Меди	4,55	1,08	1,01	4,5	1,11	4,5	1,07	-	3,7	1,2	0,8
Никеля	6,2	0,93	0,83	4,9	0,88	6,3	0,76	0,5	5,35	0,98	0
Магния	6,65	0,92	0,8	6,1	0,89	6,1	0,77	0,52	5,7	1,06	0,15
Натрия	6,1	0,94	0,86	6,4	0,82	5,5	0,8	0,55	5,15	1,13	0,16
Марганца	4,65	0,63	0,65	4,5	0,43	4,4	0,28	0,15	4,3	0,57	0,1
Железа	4	0,86	0,64	3,3	0,68	3,5	0,38	0,36	2,9	-	-
Алюминия	2,45	0,89	0,56	2,3	0,28	2,75	0,08	0,16	1,4	0,24	0
Бериллия	3,65	0,94	0,66	3	-	2,85	0,14	0,28	2,45	-	-

В статье [5] приведены результаты комплексных исследований прочностных свойств бетона в условиях, моделирующих эксплуатацию буронабивных свай в условиях капиллярного подсоса и испарения сульфатных сред различной концентрации. Составы бетона приняты по аналогии с используемыми на практике при возведении буронабивных свай в сильно засоленных грунтовых средах: расход цемента - 400 кг/м, соотношение составляющих бетона Ц:Щ:П=1:1,73:2,61; В/Ц=0,54, добавка ЛСТ - 0,6% массы цемента. Размеры образцов 4x4x16 см. В качестве вяжущего использованы три вида портландцементов: обычный портландцемент ( $C_3A=7\%$ ); сульфатостойкий ( $C_3A=3\%$ ) и барийсодержащий портландцемент Карачаево-Черкесского завода ( $BaO=3,3\%$  и  $C_3A=4,0\%$ ). В качестве агрессивной среды использованы 5%-ный и 10%-ный растворы  $Na_2SO_4$ , эталонной средой служила вода. Данные, представленные на рисунке 4, позволяют проследить характер изменения прочностных и деформативных свойств бетонов на различных портландцементах в течение 400 циклов испытаний в условиях капиллярного подсоса и испарения 5- и 10%-ных растворов  $Na_2SO_4$  и воды.

Под руководством Е.А. Гузеева в лаборатории НИИЖБ был выполнен ряд работ по влиянию сульфатсодержащей среды (сульфата натрия) на прочность бетона и на деформации бетона в нагруженном и ненагруженном состоянии [3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Опыты проводили в растворах  $Na_2SO_4$  при содержании  $SO_4^{2-}$  1000 мг/л, 13,7 г/л, 33,8 и 67 г/л. Влияние сульфатсодержащих сред на прочность бетона оценивалась величиной коэффициента стойкости бетона (отношение прочности бетона погруженного в коррозионную

среду к прочности бетона в условиях постоянного погружения в воду при сжатии и растяжении), значения которой приведены в таблицах 2, 3.



**Рисунок 4.** Изменение прочности бетонов на различных портландцементях [5]: а - вода; б - 5%-ный раствор  $Na_2SO_4$ ; в - 10%-ный раствор  $Na_2SO_4$ ; 1 - на портландцементе; 2 - на сульфатостойком портландцементе; 3 - на барийсодержащем портландцементе

**Таблица 2**

**Коэффициент стойкости бетона (В/Ц=0,6, состав Ц:Щ:П=1:2,4:3,0) в растворах сульфата натрия различной концентрации [7]**

Вид нагрузки при испытании	Содержание $C_3A$ в цементе, %	Концентрация раствора, %	Без нагрузки					Сжатие $R/R_{np}=0,4$
			время испытаний час (мес.)					
			720 (1)	2880 (4)	5760 (8)	8640 (12)	11520 (16)	
Растяжение	4	0,148	1,06	1,03	0,96	0,99	0,98	
		2,0	1,02	0,92	0,87	0,87	0,84	
		5,0	1,08	0,96	0,87	0,86	0,8	
		10,0	1,09	1,02	0,89	0,75	0,71	
	10	0,148	1,0	1,03	1,3	1,38	1,38	
		2,0	1,01	1,28	1,28	1,28	1,13	
		5,0	1,03	0,83	0,83	1,72	0,59	
		10,0	1,04	0,32	0,32	0,28	0,26	
Сжатие	4	0,148	0,93	0,96	1,07	1,03	1,02	1,03
		2,0	0,94	0,94	1,04	0,93	0,95	-
		5,0	0,95	0,91	0,99	0,88	0,84	0,84
		10,0	0,95	0,94	0,92	0,79	0,77	0,8
	10	0,148	0,98	1,0	1,03	0,96	0,96	1,04
		2,0	0,98	1,13	0,95	0,87	0,86	-
		5,0	0,98	1,05	0,85	0,78	0,75	0,93
		10,0	0,98	0,96	0,82	0,63	0,62	0,83

**Таблица 3**

**Коэффициент стойкости бетонов различных составов в 10%-ном растворе сульфата натрия [7]**

Вид нагрузки при испытании	Вид бетона		Время испытаний час (мес.)				
	содержание С <sub>3</sub> А в цементе, %	расход цемента / В/Ц	720 (1)	2880 (4)	5760 (8)	8640 (12)	11520 (16)
Растяжение	4	400/0,5	1,08	1,02	0,91	0,78	0,74
		330/0,6	1,09	1,02	0,89	0,75	0,71
		300/0,7	1,05	1,03	0,86	0,72	0,63
	10	420/0,4	1,04	0,68	0,27	0,16	0,11
		400/0,5	1,04	0,61	0,27	0,14	0,08
		330/0,6	1,04	0,54	0,32	0,28	0,26
		300/0,7	1,05	0,43	0,3	0,25	0,24
Сжатие	4	400/0,5	0,96	0,93	0,92	0,8	0,78
		330/0,6	0,96	0,94	0,91	0,79	0,77
		300/0,7	0,96	0,9	0,89	0,69	0,68
	10	420/0,4	0,99	0,97	0,73	0,45	0,35
		400/0,5	0,99	0,97	0,65	0,46	0,4
		330/0,6	0,98	0,96	0,82	0,68	0,62
		300/0,7	0,98	0,96	0,83	0,67	0,67

В условиях развития преимущественно гипсовой коррозии при длительных испытаниях в растворах с концентрацией сульфат-ионов 13,7; 33,8 г/л и особенно 67 г/л прочность бетона на начальных этапах испытаний несколько возрастает. Что связано, по-видимому, с развитием физико-химических процессов, вызывающих уплотнение, кольтматацию пор. Затем ее рост отстает от роста прочности бетона в воде. Прочность понижается за время 12000 ч (500 сут.) до своего исходного уровня. С ростом концентрации сульфат-ионов в растворах коэффициент стойкости понижается (таблицы 2, 3). Для бетона на низкоалюминатном портландцементе значение  $K_{ст}$  составляет 1,02-0,71, для бетона на высокоалюминатном цементе значения  $K_{ст}$  существенно ниже.

Исследования деформативных свойств бетонов, насыщенных к моменту испытаний до постоянной массы водой или растворами солей (сульфата натрия) в основном равномерно по всему объему, проводились в условиях кратковременной возрастающей со стандартной скоростью нагрузкой на пропаренном бетоне. Структура бетона различалась плотностью, В/Ц=0,4; 0,5; 0,6 и 0,7. В таблице 4 приводятся опытные данные о деформациях образцов (бетон состава Ц:Щ:П=1:2,4:3,0 на низкоалюминатном цементе) в условиях воздействия сульфата натрия различной концентрации, в воде и в состоянии естественной влажности.

В этих же условиях бетон на цементе с повышенным содержанием С<sub>3</sub>А=10% имел деформации расширения в 1,5 раза больше, чем при набухании в воде (таблица 5).

**Таблица 4**

**Деформации бетонных образцов в условиях воздействия сульфата натрия (В/Ц=0,6, состав 1:2,4:3,0, низкоалюминатный цемент) [7]**

Среда	Полные деформации за 10000 ч (420 сут.), мм/м						
	Свободное удлин. без нагрузки	растяжение R/R <sub>p</sub>			сжатие R/R <sub>пр</sub>		
		0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8
Раствор 0,148% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1000мг/л SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,17-0,23	0,18-0,26	0,25-0,29	0,38-0,41	0,86-0,9	1,22-1,3	1,76-1,82
Раствор 2% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 13700мг/л SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,2-0,3	0,22-0,3	0,29-0,35	0,5-0,56 (9000)	0,99-1,1	1,46-1,51	2,13-2,17
Раствор 10% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 67000 мг/л SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,4-0,57	0,42	0,49 (6900)	0,46 (2700)	1,45	2,25-2,7	3,1-3,4
Вода	0,15-0,2	0,16-0,22	0,33-0,28	0,33-0,38	0,74-0,8	1,05-1,13	1,53-1,61
При φ=65-75%	0,05-0,07	0,09	0,14	0,23	0,54-0,58	0,77-0,81	1,09-1,12
Примечание: в скобках указана продолжительность испытаний до разрушения образцов в ч.							

**Таблица 5**

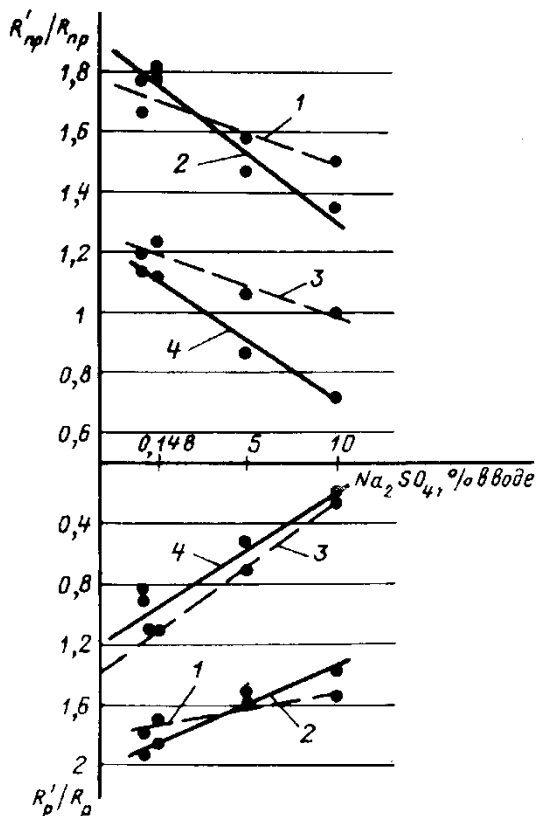
**Деформации бетонных образцов в условиях воздействия сульфата натрия (В/Ц=0,6, состав 1:2,4:3,0, высокоалюминатный цемент) [7]**

Среда	Полные деформации за 10000 ч (420 сут.), мм/м						
	Свободное удлин. без нагрузки	растяжение R/R <sub>p</sub>			сжатие R/R <sub>пр</sub>		
		0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8
Раствор 0,148% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1000мг/л SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	4,6	0,5 (2400)	0,49 (1500)	0,465 (500)	1,0	1,33	2,15
Раствор 2% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 13700мг/л SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7,7	0,505 (1900)	0,47 (11500)	0,46 (500)	1,38	1,85	2,56
Раствор 10% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 67000 мг/л SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	12,7	0,49 (864)	0,48 (672)	0,44 (336)	2,2-2,5	3,12-3,5	4,05-4,2
В воде	3,0	0,52 (2850)	0,5 (1700)	0,47 (700)	0,87	1,43	1,84
При φ=65-75%	-0,24	0,11	0,19	0,28	0,62	1,03	1,41

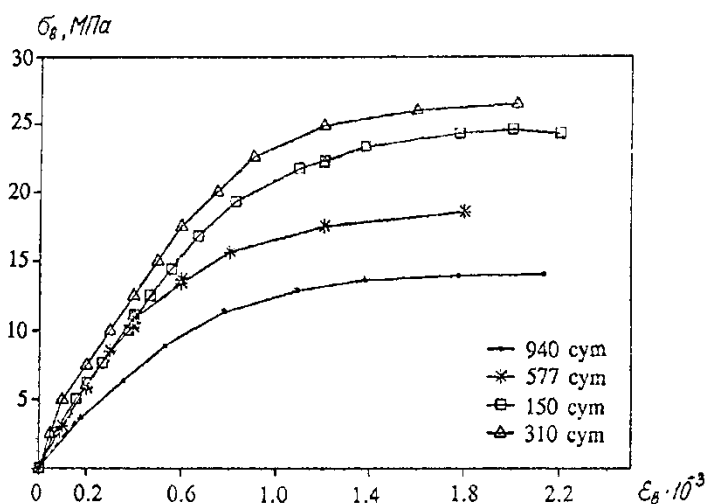
В скобках приведена продолжительность испытаний в ч.

В работах [12, 13] приводятся данные по прочности бетонных призм в процессе длительного их выдерживания в растворах сульфатов (без нагрузки). Анализ опытных данных, приведенных в таблице 6 показывает, что прочность образцов из бетона на

низкоалюминатном цементе при выдержке в воде и агрессивном растворе в течение 8 мес. (240-250 сут.) и через 16 мес. (480 сут.) увеличилась по сравнению с прочностью образцов в первоначальном водонасыщенном состоянии. Однако степень агрессивности раствора проявилась в снижении уровня прироста прочности: за 8 мес. - на 17-20% и за 16 мес. - на 41-57% (рис. 5).



**Рисунок 5.** Влияние агрессивности среды на уровень снижения прочности: 1 - призмы из бетонов с В/Ц = 0,6 на низкоалюминатном цементе после 240 сут. испытаний; 2 - то же, после 480 сут.; 3 - то же, на высокоалюминатном цементе после 240 сут. испытаний; 4 - то же, после 480 сут. [12]



**Рисунок 6.** Диаграммы деформирования бетона при разных сроках действия 5% раствора сульфата натрия [14]

В изменении прочности образцов из бетона на высокоалюминатном цементе наблюдалась такая же закономерность, но более заметно и особенно при испытаниях на растяжение.

**Таблица 6**

**Прочность бетона на сжатие после 8 мес. испытаний образцов размером 40x40x160мм [12]**

Цемент	Среда	Начальная прочность, МПа		Изменение прочности во времени			
		R <sub>np</sub>	R <sub>p</sub>	через 8 мес.			
				R <sub>np</sub> , МПа	R <sub>np</sub> , %	R <sub>p</sub> , МПа	R <sub>p</sub> , %
Высокоалюминатный	воздух	23	2,8	29	-	3,2	-
	вода	15	1,54	18	+20	1,35	-12,3
	0,148% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	15	1,54	18,5	+23	1,7	+10
	5% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	15	1,54	16	+6	1,1	-28,5
	10% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	15	1,54	15	0	0,4	-74
Низкоалюминатный	вода	12	1,39	20	+67	2,5	+78
	0,148% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	12	1,39	21,5	+79	2,4	+71
	5% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	12	1,39	19	+58	2,2	+57
	10% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	12	1,39	18	+50	2,2	+57



**Прочность бетона на сжатие после 16 мес. испытаний образцов размером 40x40x160мм [12]**

Цемент	Среда	Начальная прочность, МПа		Изменение прочности во времени				
		R <sub>пр</sub>	R <sub>p</sub>	через 16 мес.				
				$\sigma/R=0,4$	R <sub>пр</sub> , МПа	R <sub>пр</sub> , %	R <sub>p</sub> , МПа	R <sub>p</sub> , %
Высокоалюминатный	Воздух	23	2,8	25,6	30,5	-	3,3	-
	Вода	15	1,54	22,5	17,3	+15	1,3	-15,6
	0,148% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	15	1,54	23,5	16,9	+12	1,7	+10
	5% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	15	1,54	22	13	-13,4	0,8	-48
	10% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	15	1,54	18,5	10,7	-28,6	0,35	-77,2
Низкоалюминатный	Вода	12	1,39	24	21,2	+76,6	2,7	+93
	0,148% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	12	1,39	24,1	21,7	+80	2,6	+86
	5% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	12	1,39	20,1	17,7	+47	2,2	+57
	10% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	12	1,39	19,2	16,3	+35	1,9	+36

А.И. Попеско в работе [14] приводит данные экспериментов по влиянию сульфатосодержащих сред на физико-механические характеристики бетонов. В таблице 7 и на рисунке 6 представлены результаты испытаний бетонных образцов после воздействия на них в лабораторных условиях 5% раствора сульфата натрия в течение 3, 150, 310, 577 и 940 суток.

**Таблица 7**

**Кинетика изменения физико-механических характеристик бетона в 5% растворе сульфата натрия [14]**

Время воздействия среды, сут.	R <sub>b</sub> , ар. с Мпа	E <sub>b</sub> , ар. с МПа · 10 <sup>-3</sup>	ε <sub>bR</sub> , аа. н · 10 <sup>-3</sup>
0	20,5	27,1	2,0
3	14,4	23,7	2,1
150	25,0	33,0	1,8
310	27,0	33,9	1,9
577	18,5	24,5	1,95
940	14,0	23,6	2,04

Автор [14] приводит результаты проведенных натурных исследований на целлюлозно-картонном комбинате (ЦКК) в г. Амурске Хабаровского края. Физико-механические характеристики бетона определялись на призмах размером 10x10x40 см и кубах 10x10x10 см после длительного хранения их в агрессивной среде производственных цехов ЦКК. Призмы предназначались для получения диаграммы напряжения-деформации при сжатии в соответствии с методикой ГОСТ 24452-80, кубы - для определения кубиковой прочности. Для приготовления бетонной смеси использовались цемент Теплоозерского завода марок М400 и М550, гранитный щебень Корфовского карьера крупностью 15-20 мм и покровский песок с модулем крупности 2,05. Изготовлено четыре серии образцов (таблица 8).

В состав каждой серии входило 50 призм размером 10x10x40 см и 100 кубов с размером ребра 10 см. Чтобы добиться максимальной однородности образцов внутри каждой серии, были сконструированы специальные кассетные съемные формы.

**Таблица 8**

**Расход материалов на разные серии образцов [14]**

Номер серии	В/Ц	Активность цемента, кг/см <sup>2</sup>	Количество составляющих на 1 м <sup>3</sup> бетона по массе, кг			
			В	Ц	П	Щ
I	0,8	550	205	256	632	1214
II	0,4	330	160	400	684	1164
III	0,8	400	205	256	603	1214
IV	0,4	400	160	400	638	400

Средние по каждой серии данные механических испытаний 28-суточных образцов приведены в таблице 9.

**Таблица 9**

**Результаты испытания образцов в возрасте 28 сут. [14]**

Номер серии	Плотность бетона т/м <sup>3</sup>	R, МПа	R <sub>b</sub> , МПа	E <sub>b</sub> , 10 <sup>-3</sup> МПа	ε <sub>bR</sub> · 10 <sup>5</sup>	ε <sub>к</sub> · 10 <sup>5</sup>
I	2,362	32,00	20,99	31,20	208	316
II	2,367	67,40	55,74	42,50	158	168
III	2,312	22,10	14,89	20,30	197	474
IV	2,376	52,80	42,77	35,80	177	177

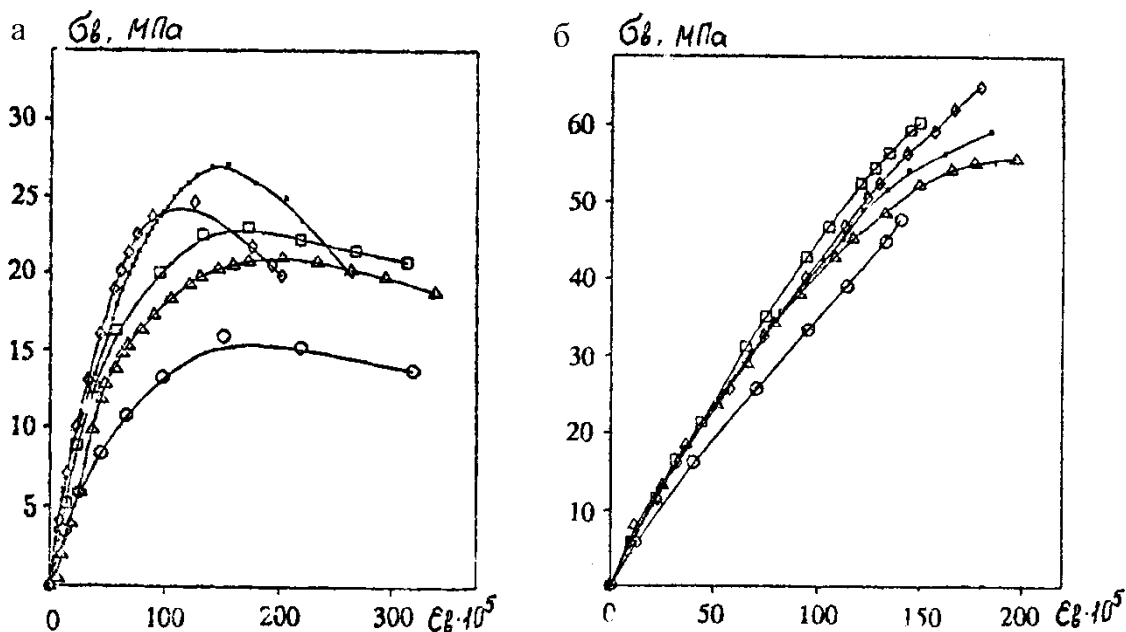
После испытания 28-суточных образцов всех четырех серий остальные бетонные образцы (кроме контрольных - 12 призм и 12 кубов из каждой серии) были вывезены в г. Амурск Хабаровского края на целлюлозно-картонный комбинат. Привезенные образцы были помещены на стеллажах в кислотно-варочном цехе на отметке 13,0 м (вблизи конвейера загрузки серы). По истечении 6, 12, 18, 24 и 30 месяцев проводились механические испытания образцов. На каждом временном этапе испытывалось по 4 куба и 3 призмы из каждой серии для каждой из исследуемых сред. Характеристики микроклимата цехов Амурского ЦКК в местах установки образцов в период испытаний приведены в таблице 10.

На рисунке 7 представлены опытные диаграммы сжатия бетонов находившихся в реальных условиях эксплуатации (в среде содержащей сернистый ангидрид).

**Таблица 10**

**Микроклимат кислотоварочного цеха (отм. 13,0 м) АЦКК в период испытаний [14]**

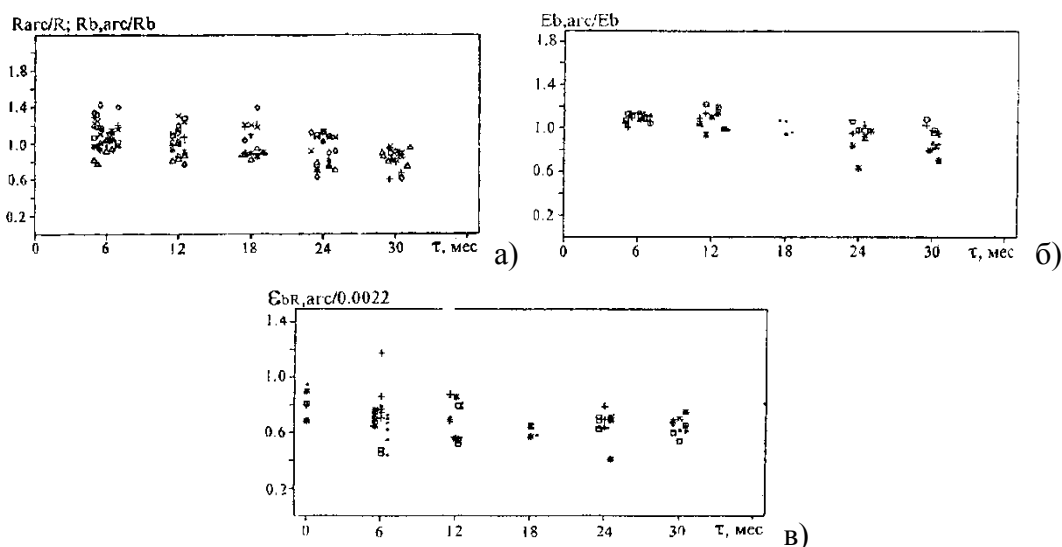
Год	Агрессивный газ	Содержание газов, мг/м <sup>3</sup>		Температура воздуха, °С		Относительная влажность, %	
		среднее	максимум	среднее	максимум	среднее	максимум
1993	SO <sub>2</sub>	40,90	162,0	22,6	36,0	62	82
1994		29,60	204,0	20,7	31,0	65	85
1995		33,0	128	20,0	32,0	67	78
1996		26,00	50,0	24,0	30,0	61	75



**Рисунок 7.** Диаграммы сжатая бетона I (а) и II (б) серий в среде, содержащей сернистый ангидрид:  $\triangle$  - 28 сут.;  $\bullet$  - 6 мес.;  $\diamond$  - 12 мес.;  $\square$  - 18 мес.;  $\circ$  - 24 мес. [14]

На рисунке 8 показана кинетика изменения физико-механических характеристик бетона при воздействии на него сернистого ангидрида.

В этой же работе [14] приводятся данные по влиянию серной кислоты на физико-механические характеристики бетона. В качестве рабочей агрессивной среды был принят 1%-ный раствор серной кислоты с  $pH=0,7$  и с содержанием сульфат-ионов 9,82 г/л. Расход цемента при изготовлении бетона образцов: на  $1 \text{ м}^3$  - 365 кг, В/Ц=0,4. При изготовлении бетонной смеси применялся суперпластификатор С-3. Размеры образцов: бетонные кубы - размер ребра 10 см и призмы размером 10x10x40 см. Условия контакта со средой: всестороннее воздействие 1%-ного раствора серной кислоты ( $H_2SO_4$ ) и хранение образцов в нормальных термовлажностных условиях. Концентрации растворов кислот контролировались, и растворы периодически обновлялись.



**Рисунок 8.** Прочность бетона (а), начальный модуль упругости (б) и относительная деформация, соответствующая максимальным напряжениям (в);  $\bullet$  - серия I,  $+$  - серия II;  $*$  - серия III;  $\square$  - серия IV. [14]

Испытания бетонных кубов и призм показали, что при длительном воздействии жидких кислых сред вследствие диффузии агрессивной среды происходит изменение свойств бетона. Средние опытные значения кубиковой и призмочной прочности, начального модуля упругости и глубины нейтрализации для каждого временного этапа воздействий агрессивной среды приведены в таблице 11.

Таблица 11

Изменение свойств бетона в агрессивных растворах [14]

Среда	Время, сут.	R, МПа	R <sub>b</sub> , МПа	E <sub>b</sub> , 10 <sup>-3</sup> МПа	L, см
Воздух	28	40,2	33,4	35,5	0,00
1%-ный раствор H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	180	43,9	36,6	36,2	0,20
	360	43,4	33,5	33,6	0,40
	540	37,7	30,9	31,3	0,52
	720	33,6	28,8	29,4	0,71

### Экспериментальные данные по влиянию сульфатсодержащей среды на механические характеристики стальной арматуры

По мере проникания сульфатсодержащей среды в железобетонный элемент концентрация сульфат-ионов в зоне расположения арматуры достигает критической величины, после чего арматура депассивируется и начинается ее коррозия. В процессе коррозии стальной арматуры происходит уменьшение ее поперечного сечения и, по некоторым сведениям, снижение механических свойств стали.

Рассмотрим некоторые экспериментальные работы, в которых исследовался вопрос о влиянии сульфатсодержащей среды на механические характеристики стальной арматуры.

В работе [15] отмечается, что для арматурных сталей классов В-I, А-I, А-III в процессе коррозии характерны сплошное или местное разрушение без заметного изменения прочностных или пластических свойств самой стали. В результате исследований установлено, что падение прочности при коррозии пропорционально уменьшению сечения стержня, пластичность практически не уменьшается, растягивающие напряжения практически не ускоряют и не изменяют характера коррозии.

В работе [16] приводятся результаты исследований коррозии арматуры (рисунок 9), которые позволяют заключить, что значительного изменения временного сопротивления и предела текучести не происходит, однако, при этом изменяется характер работы стали – уменьшается относительное удлинение и изменяется форма диаграммы растяжения.

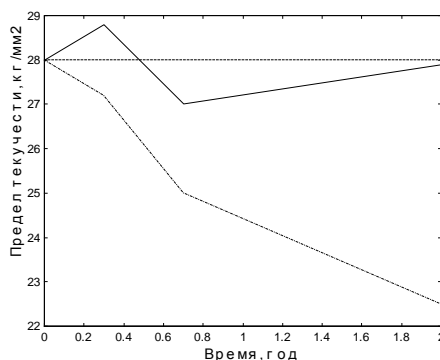
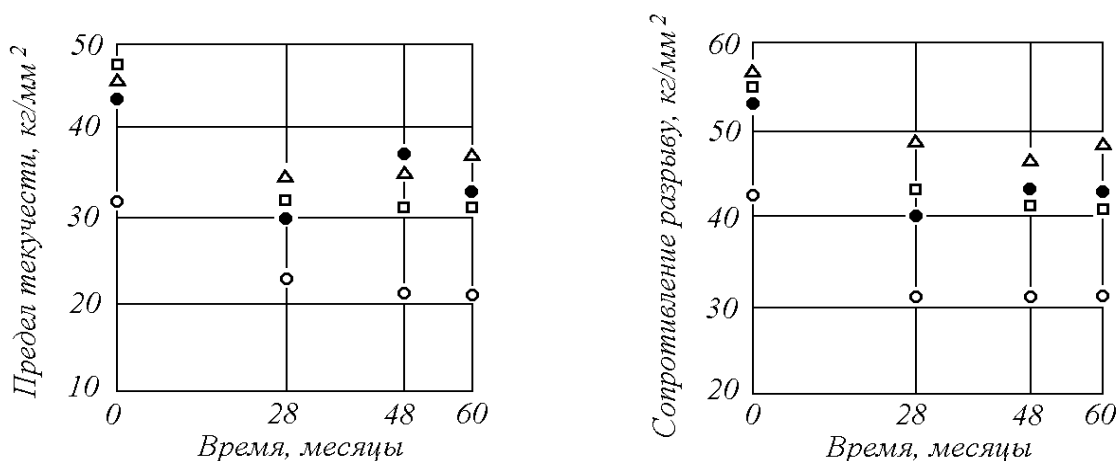


Рисунок 9. Кинетика изменения предела текучести при коррозии [16]: — в пересчете на фактические сечения; - - - в пересчете на первоначальные сечения, - - - эталонной группы



**Рисунок 10.** Изменение предела текучести и сопротивления разрыву сталей разных марок вследствие коррозии в морской воде [23] □ - CXLI-1; △ - МК; • - МС-1; ○ - Ст3

В работе [17] указывается, что поверхностная коррозия практически не оказывает влияния на механические свойства стали. Коррозионные поражения в виде язв приводят к концентрации напряжений в материале. Пластичные арматурные стали менее чувствительны к коррозионным поражениям, так как в процессе деформации происходит перераспределение напряжений вблизи язв. Стали малопластичные чувствительны к коррозионному поражению и надрезам.

В работе [18] приводятся данные, свидетельствующие о том, что местная незначительная коррозия высокопрочной проволоки почти не уменьшает ее прочность, но существенно снижает пластичность (таблица 12).

В работах [19, 20, 21] авторы делают вывод о незначительном влиянии среды при коррозии на прочностные свойства стали.

**Таблица 12**

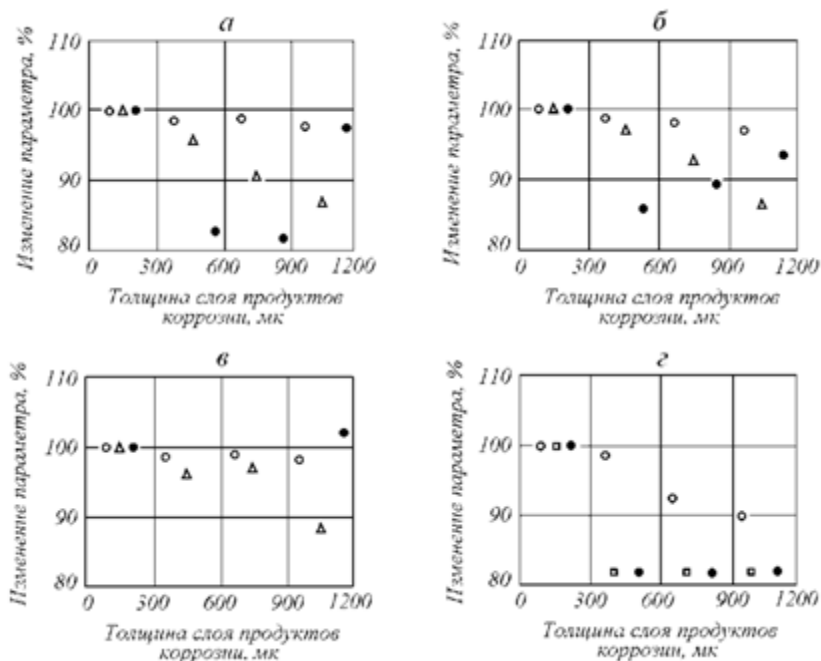
**Влияние коррозии на механические свойства проволоки [18]**

Состояние проволоки	Напряжение при разрыве		Число перегибов на 180°
	кг/мм <sup>2</sup>	%	
Без ржавчины	167	100	12,6
С местными незначительными коррозионными поражениями	159	96	7,7

В работе [22] отмечается, что даже при отсутствии межкристаллитной коррозии наблюдается падение предела текучести и временного сопротивления. На рис. 10 приведены данные [23], показывающие кинетику снижения прочностных свойств сталей при полном погружении в морскую воду после пятилетних испытаний (при расчете напряжений нагрузки отнесены к первоначальному сечению образцов).

В работе [24] приводятся результаты исследования влияния толщины слоя продуктов коррозии на механические свойства арматурной стали: усилие, соответствующее пределу текучести  $P_m$  ( $P_{0,2}$ ) и временному сопротивлению  $P_s$ , относительное удлинение после разрыва на базе 100 мм  $\delta_{100}$  и пяти диаметров  $\delta_5$ , а также относительное равномерное удлинение после разрыва  $\delta_r$ . Испытанию на растяжение подвергались: гладкие арматурные стержни из стали класса А-I марки Ст.3 диаметром 8 мм; проволока класса В-I диаметром 3 мм; стержни периодического профиля из стали класса А-II марки Ст.5 диаметром 10 мм; стержни

периодического профиля из стали класса А-III марки 35ГС диаметром 10 мм. Подготовка образцов исследуемых стержней производилась путем обезжиривания поверхности этиловым спиртом. Затем образцы экспонировались на стенде в атмосферных условиях города Москвы. Для ускорения коррозионных процессов образцы периодически смачивались водой. Через определенные промежутки времени, при фиксировании толщины слоя продуктов коррозии на поверхности образцов с помощью микроскопа МИС-11, образцы снимались со стенда и подвергались испытанию на растяжение по ГОСТ 12004-81. Средние значения результатов испытания трех образцов при каждой толщине слоя продуктов коррозии приведены на рисунке 11.



**Рисунок 11.** Влияние толщины слоя продуктов коррозии на разрывное усилие и пластические свойства арматурных сталей: а - А-I, Ст.3, диаметр 8 мм; б - А-II, Ст.5, диаметр 10 мм; в - А-III, 35ГС, диаметр 10 мм; г - В-I, диаметр 3 мм; ○ - временное сопротивление; △ - относительное удлинение после разрыва на базе пяти диаметров; □ - то же, на базе 100 мм; • - относительное равномерное удлинение после разрыва [24]

Анализ результатов экспериментов показал, что формирование и рост на поверхности образцов арматуры слоя продуктов коррозии отрицательно сказывается на прочностных характеристиках стали. Характер снижения значений разрывного усилия в процессе коррозии сталей представлен в таблице 13.

**Таблица 13**

**Снижение разрывного усилия арматурных сталей в зависимости от толщины слоя продуктов коррозии  $h_{ржс}$ , мкм [24]**

Класс стали	Марка стали или ГОСТ	Диаметр, мм	Снижение значения $P_e$ по отношению к исходному, $\Delta P_e$ в %, через сутки, при $h_{ржс}$ , мкм					
			25		90		130	
			$h_{ржс}$	$\Delta P_e$	$h_{ржс}$	$\Delta P_e$	$h_{ржс}$	$\Delta P_e$
А-I	Ст.3	8	300	1,5	500	1,0	900	2,8
А-II	Ст.3	10	300	0,6	600	2,7	1000	3,6
А-III	35ГС	10	300	1,4	600	2,2	1000	2,9
В-I	6727-80	3	300	2,1	600	8,3	900	11,0

Наибольшая потеря прочности у образцов из проволоки В-I, падение  $P_e$  при толщине слоя продуктов коррозии 900 мкм составило 11%. Наименьшее снижение разрывного усилия при накоплении продуктов коррозии отмечено у стали класса А-I, для которой падение  $P_e$  при толщине слоя продуктов коррозии 900 мкм составило 2,8%. По данным [25] общая равномерная коррозия мягких сталей не изменяет их механических характеристик.

Авторы отмечают, что накопление продуктов коррозии на поверхности исследованных арматурных сталей более отразилось на пластических свойствах ( $\delta_{5(100)}$ ,  $\delta_p$ ), чем на прочностных ( $P_m$  и  $P_e$ ). На рис. 14 представлена зависимость изменения  $P_e$ ,  $\delta_{5(100)}$ ,  $\delta_p$  от толщины слоя продуктов коррозии. Так, у низкопрочных сталей классов А-I и А-II при толщине слоя продуктов коррозии 900 мкм  $\delta_5$  понизилось на 15% относительно исходного значения;  $\delta_p$ , имея большой разброс значений, понизилось при толщине слоя продуктов коррозии 500 мкм соответственно на 20 и 10%.

У стали средней прочности класса А-III марки 35ГС в условиях эксперимента при толщине слоя продуктов коррозии 250-300 мкм не наблюдается снижения пластических свойств и даже отмечено повышение  $\delta_p$  на 35%;  $\delta_5$  практически не меняется относительно его исходного значения. При дальнейшем накоплении продуктов коррозии до 1000 мкм значение  $\delta_p$  было не ниже исходного, а  $\delta_5$  снизилось в пределах 10%. Вероятно, это обусловлено тем, что у сталей средней прочности и, особенно, у высокопрочных горячекатаных арматурных сталей структура и, как следствие, пластические свойства по сечению стержня изменяются [26], при этом пластичность к центру сечения повышается. В процессе коррозии стержней теряются более прочные и менее пластичные слои металла, при этом удельное содержание пластичной составляющей в стержне увеличивается, в результате чего пластические свойства могут не снижаться, если толщина слоя продуктов коррозии при этом не превышает некоторого критического значения, выше которого наблюдается снижение как пластических, так и прочностных свойств стали.

Для проволоки В-I значения удлинений к последнему испытанию снижаются, так  $\delta_{100}$  при толщине слоя продуктов коррозии 900 мкм снизилось в пределах 40%. Это, вероятно, обусловлено малым диаметром исследуемых образцов.

Авторы отмечают, что, несмотря на снижение прочностных и пластических характеристик от их исходных значений, во всех испытаниях и для всех исследованных марок стали в рамках эксперимента их величины превышали нормативные. На основе экспериментальных данных авторы заключают, что мягкие стали классов А-I, А-II, А-III и проволока В-I монотонно уменьшают прочностные свойства при увеличении толщины слоя продуктов коррозии. Слой продуктов коррозии до 300 мкм практически не снижает прочностные свойства указанных арматурных сталей.

### **Коррозионное разрушение стальной арматуры в условиях воздействия сульфатсодержащей среды**

Стальная арматура в бетоне защищена от коррозии тонкой пассивирующей пленкой, состоящей из оксидов железа, которая формируется на поверхности арматуры из-за сильно щелочной среды поровой влаги бетона. В работе [27] отмечается, что пассивность стали обеспечивается адсорбционно-химическим взаимодействием поверхности металла с гидроксид-ионом и любые обстоятельства, препятствующие адсорбции гидроксид-иона, будут препятствовать пассивации металла.

Процесс коррозии арматуры в бетоне возникает в результате депассивации стали, которая может быть вызвана либо уменьшением щелочности среды, окружающей арматуру, до  $pH=11$  при его коррозии, либо прониканием к поверхности арматуры активирующих ионов

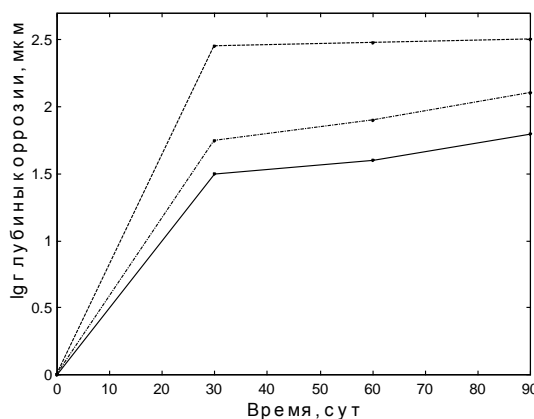
при неизменном pH. Хорошо известно активирующее действие сульфат-ионов, которое заключается в том, что адсорбция  $SO_4^{2-}$  препятствует при определенных потенциалах электрода адсорбции гидроксид-иона и приводит к нарушению пассивного состояния стали. Например, В.С. Артамонов в работе [28] при исследовании защитных свойств гипсоглиноземистого расширяющегося цемента по отношению к арматуре, объяснял интенсивную коррозию арматуры наличием в этих цементах сульфат-ионов, разрушающих защитные пленки окислов на поверхности стали. Результаты опытов [27] свидетельствуют, что активирование стали сульфат-ионами усиливается при увеличении концентрации сульфатов в электролите. Таким образом, коррозия арматурной стали начинается при разрушении пассивирующей пленки (депассивации) в момент, когда у поверхности арматуры образуется среда, содержащая определенное количество сульфат-ионов, называемое критической концентрацией. Разные исследователи предлагают различные значения критической концентрации сульфат-ионов, при которой начинается коррозия стали. Как следует из экспериментальных работ В.М. Москвина и С.Н. Алексеева [17], активация арматуры наступает, при концентрации сульфат-ионов в количестве 800-1000 мг/л. Значение критической концентрации сульфатов можно получить с использованием рекомендуемого в нормах СНиП 2.03.И.-85 коэффициента 0,25 приведения концентрации ионов  $SO_4^{2-}$  к эквивалентной по агрессивности концентрации ионов  $Cl^-$ . В таблице 14 приведены значения критической концентрации хлорид-ионов в бетоне.

Таблица 14

**Критическая концентрация хлоридов в бетоне [17]**

$C_{кр}$ , кг/м <sup>3</sup>	Год	Исследователи
0,66	1974	Clear K.C. [30]
0,66	1975	Stratfull R.F., Spellman D.L. [31]
0,6 – 1,3	1978	Cady P.D. [32]
1,33	1982	Browne R.D. [33]
0,5 – 1,33	1986	Pfeifer D.W., Landgren J.R., Zoob A. [34]
0,4 % от массы цемента	1990	Алексеев С.Н., Иванов Ф.М. [35]

В работе [36] приводятся данные по кинетике коррозии стали в условиях воздействия сернистого газа (рис. 12).

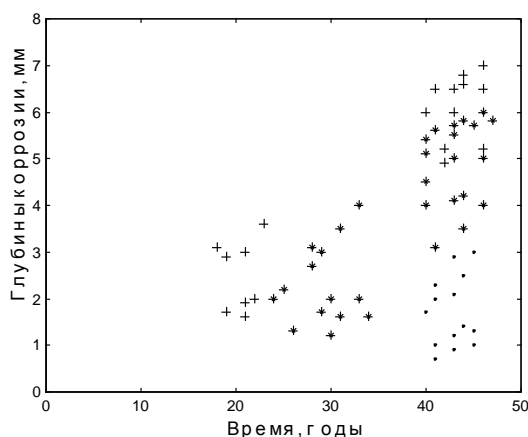


**Рисунок 12.** Кинетика коррозии стали в условиях воздействия сернистого газа [36]

В статье [37] приводятся результаты испытаний железобетонных образцов в условиях периодического и постоянного воздействия 5%-ного раствора сульфата натрия, целью которых было получить данные о коррозии содержащейся в них арматуры. Образцы—призмы выполнялись с арматурой в виде стального шлифованного стержня диаметром 8 мм и длиной



80 мм. При изготовлении образцов толщина защитного слоя обеспечивалась 1 см. Оценка степени развития коррозии арматуры производилась по трем показателям: площади поражения коррозией, весу прородированного металла, глубине коррозионных поражений. В условиях постоянного хранения в течение 1,5 года в 5%-ном растворе сульфата натрия отмечалась коррозия арматуры, занимающая большую часть поверхности, но имеющая малую глубину (119μ) и малую скорость, составляющую 0,004 г/м<sup>2</sup>час, по мнению авторов, вследствие недостатка кислорода. После 708 циклов периодического увлажнения образцы были разбиты и стержни осмотрены. В бетоне, изготовленном на гипсоглиноземистом цементе отмечена сплошная коррозия арматурного стержня, причем язвы коррозии достигали глубины 0,5 мм. В работе [38] приводятся данные по кинетике коррозионных повреждений арматуры в железобетонных конструкциях, эксплуатирующихся в условиях воздействия на них сернистого газа (рисунок 13).



*Рисунок 13. Кинетика коррозионных повреждений арматуры в условиях воздействия сернистого газа [38]*

### Последние публикации по проблеме

К сожалению, в последнее время в силу ряда объективных причин интенсивность экспериментальных исследований в этой области снизилась, и количество публикаций по этой важной тематике уменьшилась. Для исследователей, интересующихся данной проблемой, отметим работы В.Н. Мигунова с соавторами, в которых проводятся эксперименты по исследованию процессов коррозии арматуры в трещинах железобетонных элементов.

В монографии [39] приводятся известные экспериментальные данные по влиянию карбонизации, хлоридной и сульфатной коррозии, коррозионного растрескивания и радиации на поведение железобетонных конструкций и механические характеристики компонентов железобетона. Рассматривается использование теории структурных параметров для построения моделей железобетонных конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами, с последующим анализом построенных моделей. В [40] приводятся экспериментальные исследования авторов по изучению влияния коррозии арматуры как в силовых поперечных, так и в продольных коррозионных трещинах при различных программах нагружения на деформативность и несущую способность прямых моделей железобетонных конструкций. Рассмотрено влияние переменной и постоянной нагрузки, жидкой хлоридсодержащей и газообразной среды на коррозию арматуры в силовых поперечных трещинах и образование коррозионных продольных трещин в защитном слое бетона.

Книга [41] посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям долговечности железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в условиях воздействия различных видов нагрузки и агрессивной жидкой хлоридсодержащей среды. Рассмотрены теоретические основы изучения долговечности железобетонных конструкций, с учётом коррозионного поражения арматуры в железобетонных элементах. С помощью разработанной методики проведения теоретических исследований, на основании результатов длительных экспериментальных исследований, полученных на прямых моделях железобетонных элементов, а также данных натурных обследований, эксплуатирующихся железобетонных конструкций в агрессивной среде, получены уравнения регрессии значений ширины раскрытия коррозионных продольных трещин в зоне влияния поперечных трещин, в зависимости от ширины раскрытия расчётных поперечных трещин на поверхности защитного слоя бетона, в условиях воздействия на опытные железобетонные конструкции переменной и постоянной изгибающей нагрузки, в присутствии агрессивной жидкой хлоридсодержащей среды. В книге содержатся научные результаты, необходимые для практического использования при прогнозировании долговечности железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивной хлоридсодержащей среде.

### **Выводы:**

1. Воздействие сульфатсодержащей среды на железобетон носит объемный характер, приводя к появлению наведенной, изменяющейся с течением времени неоднородности механических свойств.

2. Экспериментальному исследованию влияния сульфатсодержащих сред на физико-механические свойства бетонов посвящено довольно большое количество публикаций, однако подавляющее большинство экспериментальных данных получено на бетонных образцах, имеющих неоднородные механические свойства бетона для различных объемов образца. Поэтому эти данные дают только некоторую качественную характеристику кинетики коррозионных процессов и не позволяют их использовать для идентификации моделей, достаточно корректно описывающих изменение физико-механических свойств материала с учетом неоднородности их распределения по объему элемента.

3. В результате анализа экспериментальных данных по влиянию сульфатсодержащих сред на физико-механические свойства бетонов установлено, что на начальных стадиях взаимодействия бетона со средой происходит ее временное упрочнение. Величина упрочнения зависит как от свойств бетона, так и от свойств сульфатсодержащей среды.

4. Из анализа экспериментальных данных и результатов натурных обследований установлено, что при коррозионном износе арматуры в бетоне имеет место коррозионное «распухание» арматурных стержней, вызванное тем, что продукты коррозии арматуры занимают больший объем, чем объем «съеденного» коррозией металла. Результатом этого эффекта является появление в защитном слое бетона коррозионных трещин, ориентированных вдоль арматуры. При дальнейшем развитии коррозии арматуры происходит отслаивание защитного слоя бетона, при этом изменяется характер сцепления арматуры и возможно ее продергивание.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чэнь Тао, Успанов А.М. Анализ экспериментальных данных по кинетике проникания сульфатсодержащих сред в железобетонные конструкции и влиянию их на механические характеристики компонентов железобетона. Часть 1. Эксперименты по изучению кинетики проникания // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №5 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
2. Селяев В.П., Ошкина Л.М. Влияние водных растворов серной кислоты и сжимающих нагрузок на свойства цементных композитов // Современные проблемы строительного материаловедения: Материалы пятых академических чтений РААСН/Воронеж. гос. арх.-строит. акад. - Воронеж, 1999. – С. 419-422.
3. Гузеев Е.А., Савицкий Н.В., Тытюк А.А. Расчет напряженно-деформированного состояния нормальных сечений железобетонных изгибаемых элементов с учетом кинетики сульфатной коррозии бетона // Защита бетона и железобетона от коррозии. Сб. тр. под ред. С.Н. Алексева, В.Ф. Степановой. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1990. – С. 59-66.
4. Тихомирова М.Ф. Агрессивность сульфатных растворов в зависимости от вида катиона // Бетон и железобетон, 1982, №3. С. 43-44.
5. Михальчук П.А., Рябчун С.А. Характер и скорость коррозионных разрушения бетона в условиях капиллярного подсоса и испарения высокоминерализованных сред // Коррозионная стойкость бетона, арматуры и железобетона в агрессивных средах. Сб. тр. / Под ред. С.Н. Алексева. - М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1988. - С. 20-28.
6. Гузеев Е.А. Влияние агрессивных сред на работу железобетонных конструкций / Технология и долговечность железобетонных конструкций. Тр. НИИЖБ. - М., 1977. - С. 133-141.
7. Гузеев Е.А. Влияние среды на механические свойства бетона // Прочность, структурные изменения и деформации бетона. - М., 1978. - С. 223-253.
8. Гузеев Е.А. Основы расчета и проектирования железобетонных конструкций повышенной стойкости в коррозионных средах. Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – М., 1981. – 49 с.
9. Гузеев Е.А., Мальганов А.И. Влияние плотности бетона на долговечность бетонных и железобетонных конструкций, работающих в сульфатных средах / Материалы второй республиканской научно-технической конференции по нефтехимии АН Каз. СССР. Алма-Ата, 1971. С. 112-113.
10. Гузеев Е.А., Ренский А.Б., Мальганов А.И. Методика измерения деформаций в жидких агрессивных средах // Реферативный сборник «Межотраслевые вопросы строительства». Отечественный опыт. М., 1972, вып. 1. С. 10-12.
11. Гузеев Е.А., Рубецкая Т.В., Мальганов А.И. Деформации пропаренного бетона в растворах сульфатов при длительном нагружении // Бетон и железобетон, 1972, №5.

12. Гузеев Е.А., Рубецкая Т.В., Бубнова Л.С., Мальганов А.И. Деформации и прочность пропаренного бетона в зависимости от его плотности в растворах сульфатов при длительном действии нагрузки / Защита строительных конструкций промышленных зданий от коррозии. Труды НИИЖБ, 1972. С. 65-73.
13. Гузеев Е.А., Рубецкая Т.В., Мальганов А.И. Долговечность бетона в агрессивных сульфатных водах // Реферативный сборник «Межотраслевые вопросы строительства». Отечественный опыт, 1971, вып. 11. С. 21-22.
14. Попеско А.И. Работоспособность железобетонных конструкций, подверженных коррозии / СПб гос. архит.-строит. ун-т. - СПб., - 1996. - 182 с.
15. Алексеев С.Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне. Стройиздат, - 1968. - 232 с.
16. Вольберг Ю.Л., Коряков А.С. Учет воздействия агрессивной среды на несущую способность стальных конструкций // Металлические конструкции в строительстве / Сб. тр. Моск. инженер. строит. ин-та: - М., 1983. - С. 28-35.
17. Москвин В.М., Алексеев С.Н., Вербецкий Г.П., Новгородский В.И. Трещины в железобетоне и коррозия арматуры. - М.: Стройиздат, 1971. - 144 с.
18. Карпенко Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов. - К.: Наукова думка, 1976. - 125 с.
19. Бережнов К.П., Филиппов В.В. Коррозионно-механическая прочность строительных сталей в агрессивных средах // Цветная металлургия. 1986. № 9. - С. 70-72.
20. Карпенко Г.В. Прочность стали в коррозионной среде. - М.-К.: Машгиз, 1963. - 188 с.
21. Кудайбергенов Н.Б. Основы обеспечения долговечности стальных строительных конструкций промзданий в агрессивных средах: Автореф. дисс. ... д.т.н. - М., 1994. - 31 с.
22. Акимов Г.В. Теория и методы исследования коррозии металлов. - М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1945. - 415 с.
23. Кошелев Г.Г., Розенфельд И.Л. Коррозионная устойчивость малоуглеродистых и низколегированных сталей в морской воде // Исследования коррозии металлов. - М., 1960. - с. 333-344.
24. Степанова В.Ф., Красовская Г.М., Елшина Л.И. Исследование влияния толщины слоя продуктов коррозии на механические свойства ненапрягаемой арматурной стали // Защита бетона и железобетона от коррозии. Сб. тр. / Под ред. С.Н. Алексеева, В.Ф. Степановой. - М.: НИИЖБ Госстроя СССР. 1990. - С. 42-46.
25. Красовская Г.М. Исследование коррозионного поведения термически упрочненной катанки в атмосферных условиях // Стойкость бетона и железобетонных конструкций в агрессивных средах. - М.: Стройиздат, 1977.
26. Юхвец И.А. Производство высокопрочной проволочной арматуры. - М.: Металлургия, 1973.
27. Москвин В.М., Алексеев С.Н., Новгородский В.И. О механизме коррозии стальной арматуры в бетоне с трещинами // Коррозия, методы защиты и повышения долговечности бетона и железобетона. - М., 1965. - С. 27-38.

28. Артамонов В.С. Защитные свойства цементов. Цемент. - 1955, №2.
29. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузеев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. - М.: Стройиздат, 1980. - 536 с.
30. Clear K.C. Evaluation of Portland Cement Concrete for Permanent Bridge Deck Repair // Rept. FHWA-RD-74-5. Federal Highway Administration. - Washington, D.C., Feb. 1974. - 48 pp.
31. Stratfull R.F., Joukovich W.J., Spellman D.L. Corrosion Testing of Bridge Decks // Transportation Research Record № 539. Transportation Research Board. 1975. - P. 50-59.
32. Cady P.D. Corrosion of Reinforcing Steel // Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, STP-169B, ASTM. - Philadelphia, 1978. - P. 275-299.
33. Brown R.D. Design Prediction of the Life for Reinforced Concrete in Marine and Other Chloride Environments // Durability of Building Materials. Vol. 1. - Amsterdam: Elsevier Scientific, 1982. - P. 113-125.
34. Pfeifer D.W., Landgren J.R., Zoob A. Protective System for New Prestressed and Substructure Concrete // Rept. FHWA-RD-86-293. Federal Highway Administration. - Washington, D.C., 1986. - 16 pp.
35. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шиссль. - М.: Стройиздат, 1990. - 320 с.
36. Мошанский Н.А., Пучинина Е.А. Определение сравнительной агрессивности главных газов к стали, бетону и защитным органическим покрытиям // Коррозия железобетона и методы защиты. Труды НИИЖБ. Вып. 28. - М., 1962. - С. 5-27.
37. Москвин В.М., Алексеев С.Н., Батраков В.Г. Влияние некоторых видов цемента на стойкость бетона и арматуры / Коррозия железобетона и методы защиты. - Сб. науч. тр. НИИЖБ. - Вып. 9. - М. - 1959. С. 4-20.
38. Сетков В.Ю., Шибанова И.С. Разрушение перекрытий промзданий при действии сернистого газа // Бетон и железобетон, 1988, №3. - С. 28-29.
39. Экспериментально-теоретическое моделирование армированных конструкций в условиях коррозии. Часть 1: / И.И. Овчинников, В.Н. Мигунов, И.Г. Овчинников. - Пенза: ПГУАС, 2014. - 280 с.
40. Экспериментально-теоретическое моделирование армированных конструкций в условиях коррозии. Часть 2: / В.Н. Мигунов, И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников. - Пенза: ПГУАС, 2014. - 352 с.
41. Влияние расчётных поперечных трещин в железобетонных элементах на образование коррозионных продольных трещин / В.Н. Мигунов. - Пенза: ПГУАС, 2015. - 502 с.

### **Ovchinnikov Ilya Igorevich**

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov  
Moscow state automobile & Road technical university  
Sochi branch, Russia, Sochi  
E-mail: [bridgeart@mail.ru](mailto:bridgeart@mail.ru)

### **Ovchinnikov Igor Georgievich**

Penza State University of Architecture and Construction, Russia, Penza  
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov  
Perm national research polytechnic university, Russia, Perm  
E-mail: [bridgesar@mail.ru](mailto:bridgesar@mail.ru)

### **Chen Tao**

Moscow State Automobile & Road Technical University, Russia, Moscow  
E-mail: [313085767@qq.com](mailto:313085767@qq.com)

### **Uspanov Amergaley Marzagaleevich**

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov  
E-mail: [u.a.-91@mail.ru](mailto:u.a.-91@mail.ru)

## **Analysis of experimental data on the kinetics of penetration of sulfate environment in concrete structures and their influence on mechanical properties of concrete components. Part 2. The influence on the mechanical characteristics of the concrete components**

**Abstract.** Experimental data on the effect of sulfate-containing environment on the physical and mechanical characteristics of concrete, mechanical properties of steel reinforcement, as well as corrosion of the steel reinforcement under the action of sulfate-containing environment are considered.

It was found that the impact of sulfate environment on the reinforced concrete has a volume character, leading to the appearance of induced, changing over time heterogeneity of mechanical properties. The vast majority of experimental data obtained on concrete samples with heterogeneous mechanical properties of concrete for different sample volumes. Therefore, these data provide only qualitative characteristics of some of the kinetics of corrosion processes and do not allow their use for identifying models correctly describe changes in the physical and mechanical properties of material given the heterogeneity of their distribution over the volume element. In the initial stages of interaction with the environment takes place concrete its temporary hardening. The amount of hardening depends on the properties of concrete and of sulfate-medium properties. When corrosive wear in concrete reinforcement corrosion occurs "swelling" of rebars caused by the fact that the reinforcement corrosion products occupy a larger volume than the volume of "eaten" by corrosion of the metal. The result of this effect is the appearance of the protective layer of concrete corrosion cracks oriented along the reinforcement bar.

**Keywords:** sulfate-containing environment; corrosion; degradation; reinforced concrete; the mechanical properties; concrete; deformation curve

## REFERENCES

1. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chen' Tao, Uspanov A.M. Analiz eksperimental'nykh dannykh po kinetike pronikaniya sul'fatsoderzhashchikh sred v zhelezobetonnye konstruksii i vliyaniyu ikh na mekhanicheskie kharakteristiki komponentov zhelezobetona. Chast' 1. Eksperimenty po izucheniyu kinetiki pronikaniya // Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE» Tom 7, №5 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF> (dostup svobodnyy). Zagl. s ekrana. Yaz. rus., angl.
2. Selyaev V.P., Oshkina L.M. Vliyanie vodnykh rastvorov sernoy kisloty i szhimayushchikh nagruzok na svoystva tsementnykh kompozitov // Sovremennye problemy stroitel'nogo materialovedeniya: Materialy pyatykh akademicheskikh chteniy RAASN/Voronezh. gos. arkh.-stroit. akad. - Voronezh, 1999. – S. 419-422.
3. Guzeev E.A., Savitskiy N.V., Tytyuk A.A. Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya normal'nykh secheniy zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov s uchetom kinetiki sul'fatnoy korrozii betona // Zashchita betona i zhelezobetona ot korrozii. Sb. tr. pod red. S.N. Alekseeva, V.F. Stepanovoy. – M.: NIIZhB Gosstroya SSSR, 1990. – S. 59-66.
4. Tikhomirova M.F. Agressivnost' sul'fatnykh rastvorov v zavisimosti ot vida kationa // Beton i zhelezobeton, 1982, №3. S. 43-44.
5. Mikhal'chuk P.A., Ryabchun S.A. Kharakter i skorost' korrozionnykh razrusheniya betona v usloviyakh kapillyarnogo podsosa i ispareniya vysokomineraliovannykh sred // Korrozionnaya stoykost' betona, armatury i zhelezobetona v agressivnykh sredakh. Sb. tr. / Pod red. S.N. Alekseeva. - M.: NIIZhB Gosstroya SSSR, 1988. - S. 20-28.
6. Guzeev E.A. Vliyanie agressivnykh sred na rabotu zhelezobetonnykh konstruksiy / Tekhnologiya i dolgovechnost' zhelezobetonnykh konstruksiy. Tr. NIIZhB. - M., 1977. - S. 133-141.
7. Guzeev E.A. Vliyanie sredy na mekhanicheskie svoystva betona // Prochnost', strukturnye izmeneniya i deformatsii betona. - M., 1978. - S. 223-253.
8. Guzeev E.A. Osnovy rascheta i proektirovaniya zhelezobetonnykh konstruksiy povyshennoy stoykosti v korrozionnykh sredakh. Avtoref. diss. ... dokt. tekhn. nauk. – M., 1981. – 49 s.
9. Guzeev E.A., Mal'ganov A.I. Vliyanie plotnosti betona na dolgovechnost' betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksiy, rabotayushchikh v sul'fatnykh sredakh / Materialy vtoroy respublikanskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po neftekhimii AN Kaz. SSSR. Alma-Ata, 1971. S. 112-113.
10. Guzeev E.A., Renskiy A.B., Mal'ganov A.I. Metodika izmereniya deformatsiy v zhidkikh agressivnykh sredakh // Referativnyy sbornik «Mezhotraslevye voprosy stroitel'stva». Otechestvennyy opyt. M., 1972, vyp. 1. S. 10-12.
11. Guzeev E.A., Rubetskaya T.V., Mal'ganov A.I. Deformatsii proparenogo betona v rastvorakh sul'fatov pri dlitel'nom nagruzhении // Beton i zhelezobeton, 1972, №5.
12. Guzeev E.A., Rubetskaya T.V., Bubnova L.S., Mal'ganov A.I. Deformatsii i prochnost' proparenogo betona v zavisimosti ot ego plotnosti v rastvorakh sul'fatov pri dlitel'nom deystvii nagruzki / Zashchita stroitel'nykh konstruksiy promyshlennykh zdaniy ot korrozii. Trudy NIIZhB, 1972. S. 65-73.

13. Guzeev E.A., Rubetskaya T.V., Mal'ganov A.I. Dolgovechnost' betona v agressivnykh sulfatnykh vodakh // Referativnyy sbornik «Mezhotraslevye voprosy stroitel'stva». Otechestvennyy opyt, 1971, vyp. 11. S. 21-22.
14. Popesko A.I. Rabotosposobnost' zhelezobetonnykh konstruksiy, podverzhennykh korrozii / SPb gos. arkhит.-stroit. un-t. - SPb., - 1996. - 182 s.
15. Alekseev S.N. Korroziya i zashchita armatury v betone. Stroyizdat, - 1968. - 232 s.
16. Vol'berg Yu.L., Koryakov A.S. Uchet vozdeystviya agressivnoy sredy na nesushchuyu sposobnost' stal'nykh konstruksiy // Metallicheskie konstruksii v stroitel'stve / Sb. tr. Mosk. inzhener. stroit. in-ta: - M., 1983. - S. 28-35.
17. Moskvин V.M., Alekseev S.N., Verbetskiy G.P., Novgorodskiy V.I. Treshchiny v zhelezobetone i korroziya armatury. - M.: Stroyizdat, 1971. - 144 s.
18. Karpenko G.V. Vliyanie sredy na prochnost' i dolgovechnost' metallov. - K.: Naukova dumka, 1976. - 125 s.
19. Berezhnov K.P., Filippov V.V. Korroziionno-mekhanicheskaya prochnost' stroitel'nykh staley v agressivnykh sredakh // Tsvetnaya metallurgiya. 1986. № 9. - S. 70-72.
20. Karpenko G.V. Prochnost' stali v korroziionnoy среде. - M.-K.: Mashgiz, 1963. - 188 s.
21. Kudaybergenov N.B. Osnovy obespecheniya dolgovechnosti stal'nykh stroitel'nykh konstruksiy promzdaniy v agressivnykh sredakh: Avtoref. diss. ... d.t.n. - M., 1994. - 31 s.
22. Akimov G.V. Teoriya i metody issledovaniya korrozii metallov. - M-L.: Izd-vo AN SSSR, 1945. - 415 s.
23. Koshelev G.G., Rozenfel'd I.L. Korroziionnaya ustoychivost' malouglerodistykh i nizkolegirovannykh staley v morskoy vode // Issledovaniya korrozii metallov. - M., 1960. - s. 333-344.
24. Stepanova V.F., Krasovskaya G.M., Elshina L.I. Issledovanie vliyaniya tolshchiny sloya produktov korrozii na mekhanicheskie svoystva nenapryagaemoy armaturnoy stali // Zashchita betona i zhelezobetona ot korrozii. Sb. tr. / Pod red. S.N. Alekseeva, V.F. Stepanovoy. - M.: NIIZhB Gosstroya SSSR. 1990. - S. 42-46.
25. Krasovskaya G.M. Issledovanie korroziionnogo povedeniya termicheskii uprochnennoy katanki v atmosferynykh usloviyakh // Stoykost' betona i zhelezobetonnykh konstruksiy v agressivnykh sredakh. - M.: Stroyizdat, 1977.
26. Yukhvets I.A. Proizvodstvo vysokoprochnoy provolochnoy armatury. - M.: Metallurgiya, 1973.
27. Moskvин V.M., Alekseev S.N., Novgorodskiy V.I. O mekhanizme korrozii stal'noy armatury v betone s treshchinami // Korroziya, metody zashchity i povysheniya dolgovechnosti betona i zhelezobetona. - M., 1965. - S. 27-38.
28. Artamonov V.S. Zashchitnye svoystva tsementov. Tsement. - 1955, №2.
29. Moskvин V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N., Guzeev E.A. Korroziya betona i zhelezobetona, metody ikh zashchity. - M.: Stroyizdat, 1980. - 536 s.



30. Clear K.C. Evaluation of Portland Cement Concrete for Permanent Bridge Deck Repair // Rept. FHWA-RD-74-5. Federal Highway Administration. - Washington, D.C., Feb. 1974. - 48 pp.
31. Stratfull R.F., Joukovich W.J., Spellman D.L. Corrosion Testing of Bridge Decks // Transportation Research Record № 539. Transportation Research Board. 1975. - P. 50-59.
32. Cady P.D. Corrosion of Reinforcing Steel // Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, STP-169B, ASTM. - Philadelphia, 1978. - P. 275-299.
33. Brown R.D. Design Prediction of the Life for Reinforced Concrete in Marine and Other Chloride Environments // Durability of Building Materials. Vol. 1. - Amsterdam: Elsevier Scientific, 1982. - P. 113-125.
34. Pfeifer D.W., Landgren J.R., Zoob A. Protective System for New Prestressed and Substructure Concrete // Rept. FHWA-RD-86-293. Federal Highway Administration. - Washington, D.C., 1986. - 16 pp.
35. Dolgovechnost' zhelezobetona v agressivnykh sredakh / S.N. Alekseev, F.M. Ivanov, S. Modry, P. Shissl'. - M.: Stroyizdat, 1990. - 320 s.
36. Moshchanskiy N.A., Puchinina E.A. Opredelenie sravnitel'noy agressivnosti glavneyshikh gazov k stali, betonu i zashchitnym organicheskim pokrytiyam // Korroziya zhelezobetona i metody zashchity. Trudy NIIZhB. Vyp. 28. - M., 1962. - S. 5-27.
37. Moskvina V.M., Alekseev S.N., Batrakov V.G. Vliyanie nekotorykh vidov tsementa na stoykost' betona i armatury / Korroziya zhelezobetona i metody zashchity. - Sb. nauch. tr. NIIZhB. - Vyp. 9. - M. - 1959. S. 4-20.
38. Setkov V.Yu., Shibanova I.S. Razrushenie perekrytiy promzdaniy pri deystvii sernistogo gaza // Beton i zhelezobeton, 1988, №3. - S. 28-29.
39. Eksperimental'no-teoreticheskoe modelirovanie armirovannykh konstruktsiy v usloviyakh korrozii. Chast' 1: / I.I. Ovchinnikov, V.N. Migunov, I.G. Ovchinnikov. - Penza: PGUAS, 2014. - 280 s.
40. Eksperimental'no-teoreticheskoe modelirovanie armirovannykh konstruktsiy v usloviyakh korrozii. Chast' 2: / V.N. Migunov, I.I. Ovchinnikov, I.G. Ovchinnikov. - Penza: PGUAS, 2014. - 352 s.
41. Vliyanie raschetnykh poperechnykh treshchin v zhelezobetonnykh elementakh na obrazovanie korroziyonnykh prodol'nykh treshchin / V.N. Migunov. - Penza: PGUAS, 2015. - 502 s.