

Кудрявцев И.А., Богданов В.П., Прасол А.В.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АРМАТУРЫ В ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОМ РАСТВОРЕ

При изучении коррозионного поведения стальной арматуры в бетонах и цементно-песчаных растворах, в основном, ограничивались определением скорости коррозии, измерением сопротивления ( $R$ ) указанных материалов и величиной потенциалов коррозии арматуры без учета влияния ( $R$ ) на их значения [1-4]. Незаслуженно мало работ, в которых использовались разнообразные электрохимические методы, что не позволило определить количественно факторы, контролируемые коррозионные процессы стали в таких специфических условиях, какими являются цементно-песчаные растворы и бетоны. Количественная оценка вклада анодного, катодного процессов и омического сопротивления ( $R$ ) в коррозионный процесс арматуры может быть определена при изучении работы макрокоррозионных гальванических элементов, теория которого хорошо разработана [5]. Поэтому представляло интересным изучить поведение арматуры в цементно-песчаном растворе с использованием сочетания разнообразных электрохимических методов, что представляет научный и практический интерес, при локальном воздействии на железобетонные конструкции воды и агрессивных растворов.

### ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования служили балочки из цементно-песчаного раствора состава 1:2 с водоцементным отношением 0,5 размером 4x4x7 и 4x4x14 см, в которые по центру заделывали электроды с токоотводами. В качестве электродов использовали гладкую арматуру диаметром 10 мм класса А1. Электроды имели длину 10, 30, 50 мм, к торцевой части которых припаивали токоотводы, покрытые полихлорвиниловой изоляцией. Места пайки изолировали отвержденной эпоксидной смолой.

После отверждения образцы подвергали пропариванию по режиму: 8 часов при температуре 80-90 °С.

Физико-химическим анализом установлено, что пропаренные бетон имел рН водной вытяжки цементного камня 12,55. При таком значении арматура должна находиться в пассивном состоянии [1].

Сопротивление цементно-песчаных образцов, толщина которых составляла 15 мм у всех электродов, но разной площади, осуществляли тестером. Во всех случаях анодным током поляризовали арматурный электрод ЭДС в 4,5 В. Время замеров составляло 2 с. Это позволяло несколько снизить влияние на величину ( $R$ ) явления поляризации анода и катода. Катодом служила фильтровальная полоска, смоченная водопроводной водой или раствором NaCl соответствующей концентрации, что обеспечивало электролитный контакт с цементным камнем. Общепринятые методы определения электропроводности использовать было невозможно, так как в этом случае применяют неполяризующиеся электроды из платины, покрытые платиновой чернью [6].

Электрохимические исследования состояли в измерении стационарных потенциалов, снятии поляризационных кривых в гальваностатическом режиме по общепринятой методике [5]. Также изучали работу коррозионных макроэлементов. По

экспериментальным данным можно построить поляризационные диаграммы коррозионного процесса, позволяющие количественно оценить влияние анодного и катодного процессов, а так же оценить влияние омического фактора на коррозионный процесс [5, 6].

Измерения осуществляли иономером ЭВ-74 и потенциостатом П5827М. Потенциалы представлены в виде ЭДС, возникающей между стальной арматурой и насыщенным хлорсеребряным электродом.

Макрокоррозионный элемент собирался из двух балочек с разными по площади стальными арматурами. Одну из балочек помещали в сосуд с раствором NaCl, а вторую располагали рядом на воздухе. Цементные балочки соединяли электролитическим мостиком, который состоял из 4-х полосок фильтровальной бумаги 2x8 см, смоченной в растворе NaCl. Токоотводы соединяли последовательно с микроамперметром и декадными сопротивлениями в 30 кОм. Электрод сравнения располагали на верхней грани балочек. Первоначально элемент остается разомкнутым для определения стационарных значений потенциалов. Затем элемент замыкали на полное сопротивление магазина, измеряя силу тока и потенциалы электродов. Такие измерения повторяли при последовательном уменьшении сопротивления магазинов. Выдержка измерения показателей составляла 2 мин. По полученным данным строили поляризационные диаграммы, по которым рассчитывали степени поляризации [6].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Бетоны и растворы на цементной основе следует относить к особому виду электролитной среды из-за щелочного состава кристаллогидратной среды и относительно малой объемной пористостью. Поэтому такие электролитные среды характеризуются большим омическим сопротивлением [2]. Влияние ( $R$ ) на величину стационарных потенциалов изучено недостаточно.

В таблице 1 представлены результаты измерений ( $R$ ) от площади. Во всех случаях наблюдается снижением ( $R$ ) с возрастанием площади арматуры. Поскольку накладываемое напряжение и время измерения для всех образцов были постоянными, то это можно объяснить влиянием анодной поляризации, которая создает дополнительное сопротивление. Величина поляризационного сопротивления зависит от плотности тока, которая падает с увеличением площади электрода. Если учесть, что анодная поляризация составляет в среднем 3,5 % от общего электрохимического процесса, то это и будет ошибкой измерения ( $R$ ) (таблица 2), а наиболее достоверными значениями ( $R$ ) следует считать для арматуры с площадью 16,5 см<sup>2</sup>.

С увлажнением образцов или погружением их в растворы NaCl ( $R$ ) снижается вследствие возрастания электропроводности электролитной среды.

Из приведенных данных также видно, что величина стационарных потенциалов сильно зависит от ( $R$ ), значение ко-

*Кудрявцев Игорь Александрович. Профессор, доктор технических наук, зав. каф. строительных конструкций Белорусского государственного университета транспорта.*

*Богданов В.П. Доцент, кандидат химических наук Белорусского государственного университета транспорта.*

*Прасол А.В. Магистр технических наук Белорусского государственного университета транспорта.*

*Беларусь, БелГУТ, г. Гомель.*

Таблица 1 - Зависимость омического сопротивления ( $R$ , Ом/см<sup>2</sup>) от площади арматуры и концентрации NaCl при толщине раствора 1,5 см и влияние ( $R$ ) на величину равновесных потенциалов ( $E_{рав}$ )

Площадь арматуры, см <sup>2</sup>	$R$ сухих балочек, кОм/см <sup>2</sup>	$R$ балочек в 3 % NaCl, кОм/см <sup>2</sup>	$R$ балочек в 15 % NaCl, кОм/см <sup>2</sup>
3,9	40,8	6,2	5,0
10,2	11,8	3,0	2,2
16,5	3,6	1,8	1,0
Равновесные потенциалы, В	+0,1	-0,25	-0,33

Примечание - В 3 % и 15 % растворе равновесные потенциалы стали Al соответственно равны -0,55 и - 0,6 В. Сухие балочки измеряли при относительной влажности 37 %, для раствора равновесная влажность составляла  $\approx$  2,6 % [2].

Таблица 2 - Влияние омического фактора на анодные и катодные стадии и скорость коррозии арматуры в балочках от соотношения площадей анода и катода в макрокоррозионных элементах пар дифференциальной аэрации.

Отношение площадей арматуры анода/катода, см <sup>2</sup>	Концентрация NaCl в растворе, %	Степень контроля (С, %)			Ток коррозии, мкА
		Ca	Ск	Ск	
3,9/16,5	3	3,6	17,1	79,3	1,0
10,2/16,5	3	2,8	11,0	86,2	0,9
16,5/16,5	3	3,5	14,6	81,9	0,2
3,9/16,5	15	11,3	15,0	73,7	1,5
10,2/16,5	15	5,6	10,6	84	0,9

Примечание - Степень Ca - анодного, Ск - катодного, Ск - омического контроля коррозионного процесса.

того зависит от множества факторов. Поэтому судить о коррозионных процессах по значениям стационарных потенциалов для систем металл-бетон не всегда оправдано.

До настоящего времени отсутствуют исследования количественной оценки вклада в электрохимическую коррозию арматуры в бетоне омического сопротивления, а также анодного и катодного процессов. Такие сведения можно получить только изучением работы коррозионных элементов.

В данном исследовании изучена работа макрокоррозионных элементов пар дифференциальной аэрации. Образование подобных макроэлементов возможно на железобетонных конструкциях при локальном воздействии на них агрессивных растворов, что часто наблюдается на практике.

На рисунке 1 и в таблице 2 приведены результаты таких исследований. Для того, чтобы не загромождать рисунок множеством кривых, на нем приведены две поляризационные диаграммы. По диаграммам были рассчитаны степени анодного, катодного и омического контроля, результаты которых приведены в таблице 2.

Полученные данные свидетельствуют о том, что коррозия арматуры в основном контролируется ( $R$ ), т.е. затрудненностью движения катионов и анионов в бетоне к анодным и катодным зонам. Поляризуемость анодных процессов значительно ниже катодных и их вклад в коррозионный процесс невелик, что объясняет невысокую эффективность работы коррозионного элемента. Однако следует ожидать значительного возрастания токов коррозии при уменьшении ( $R$ ) за счет сокращения толщины бетонной прослойки между электродами. В наших экспериментах она составляла 5 см. Из приведенного также видно, что эффективность коррозионного элемента выше от площади локального воздействия среды и концентрации ионов хлора.

Сравнение результатов работы коррозионных элементов с поляризационными кривыми, полученными на тех же образцах, показывают о не совсем точной возможности количественной

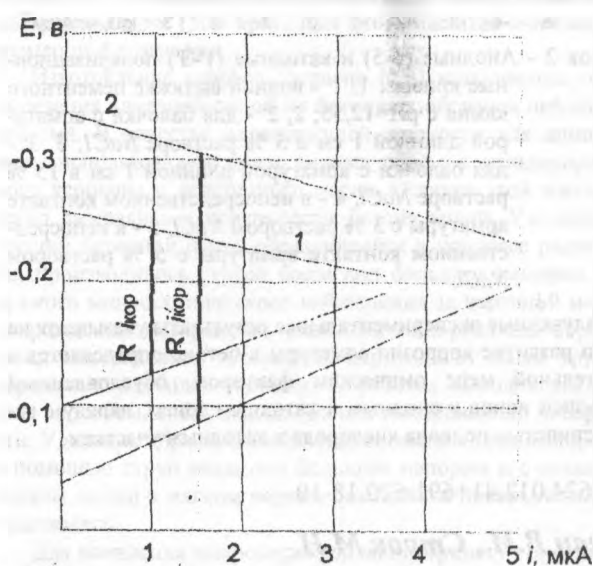


Рисунок 1 - Поляризационные диаграммы макрокоррозионных элементов:

1 - в 3 % растворе NaCl; 2 - в 15 % растворе NaCl, когда в обоих случаях площадь анода составляла 3,9 см<sup>2</sup>, а катода 16,5 см<sup>2</sup>

оценки вклада ( $R$ ) в общий электрохимический процесс (рисунок 2). Косвенно это просматривается при сравнении кривых для электродов в цементной оболочке с кривыми для чистого металла (рисунок 2, кривые 1-5). На чистом металле анодный процесс резко облегчается (анодный ток возрос на четыре порядка). Однако на этих кривых можно определить степень поляризации анодного и катодного процессов в условиях больших омических сопротивлений, что хорошо видно на рисунке 2. Пунктирная линия на этом рисунке соот-

ветствует плотности коррозионного тока реальной макропары с соотношением площадей анода и катода соответственно 3,9:16,5 в 3 %-ном растворе NaCl.

В начальной стадии развития коррозии арматуры в бетоне коррозионный процесс микрогальванических элементов будет также тормозиться омическим сопротивлением, несмотря на существенное сокращение расстояния между анодными и катодными участками. Следует учесть, что на микроуровне разность потенциалов максимально не превышает 10 мВ [5], следовательно, при переходе на микроуровень понижением ( $R$ ) сопровождается сильным снижением ЭДС микрокоррозионных элементов. Начальная стадия развития коррозии протекает чрезвычайно замедленно и только после образования зазора между металлом и бетоном заполненного продуктами окисления влияние омического фактора должно снижаться.

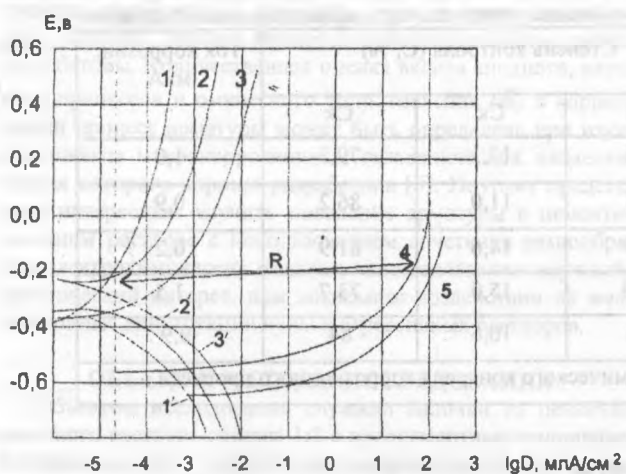


Рисунок 2 - Анодные (1-5) и катодные (1'-3') поляризационные кривые: 1, 1' - водной вытяжке цементного камня с pH=12,55; 2, 2' - для балочки с арматурой длиной 1 см в 3 % растворе NaCl, 3, 3' - для балочки с арматурой длиной 1 см в 15 % растворе NaCl, 4 - в непосредственном контакте арматуры с 3 % раствором NaCl, 5 - в непосредственном контакте арматуры с 5 % раствором NaCl.

Полученные экспериментальные результаты указывают на то, что развитие коррозии арматуры в бетоне определяется в значительной мере омическим фактором, обусловленным диффузией ионов к анодным и катодным зонам, наряду с затрудненностью подвода кислорода к катодным участкам.

УДК 624.012.41+691:620.18-19

Драган В.И., Строк М.Н.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ НАКОПЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ И ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ МИКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

В ходе эксплуатации зданий и сооружений на конструкции действует сложный спектр нагрузок и воздействий. Изменчивость их во времени приводит к непрерывному накоплению и росту дефектов, повреждению конструкций, что сокращает сроки службы этих конструкций и требует проведе-

ния мероприятий по их ремонту и усилению. Анализ закономерностей образования и развития микро- и макротрещин позволит определить остаточные сроки эксплуатации и рассчитать долговечность бетонных и железобетонных конструкций.

Возможно развитие коррозии за счет образования макрокоррозионных пар дифференциальной аэрации при локальном воздействии воды и сильных электролитов.

### ВЫВОДЫ

Экспериментальные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- материалы на цементной основе характеризуются высокими сопротивлениями, величина которых определяется насыщенностью водой и концентрацией электролитов;
- значения стационарных потенциалов зависят от омического сопротивления, чем выше сопротивление, тем положительной величина потенциала;
- показана возможность функционирования макрокоррозионных пар дифференциальной аэрации, эффективность работы которых определяется омическим сопротивлением;
- количественное влияние катодной и анодной стадий на скорость коррозионного процесса невелико и составляет 20-25 %;
- метод гальваностатической поляризации не позволяет количественно оценить вклад в коррозионный процесс арматуры в бетоне омической составляющей;
- развитие коррозии арматуры идет значительно медленнее, чем в обычных электролитных средах.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М.: Стройиздат, 1980.
2. Bicrok J. Cement corrosion and concrete protection. Budapest. 1964.
3. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Модры С., Шисль П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. М.: Стройиздат, 1990.
4. Москвин В.М. Коррозия бетона. М.: Госстройиздат, 1952.
5. Томашов Н.Д. Теория коррозии и защита металлов. М.: Изд. АН СССР, 1959.
6. Шаталов А.Я., Маршаков И.К. Практикум по физической химии. М.: Высшая школа, 1975.

Драган Вячеслав Игнатьевич. Профессор, кандидат технических наук, проректор по научной работе, зав. каф. строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Строк Михаил Николаевич. Аспирант каф. строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.