

ГОССТРОЙ СССР А47

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

С. Н. АЛЕКСЕЕВ

КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА АРМАТУРЫ В БЕТОНЕ

Издание 2-е, переработанное
и дополненное



ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ
Москва 1968

Коррозия и защита арматуры в бетоне. С. Н. Алексеев. НИИЖБ Госстроя СССР. Стройиздат, 1968.

В книге излагаются результаты экспериментальных и теоретических работ, проведенных автором, и обобщаются данные, полученные другими исследователями в области коррозии и защиты арматуры железобетонных конструкций.

На основании электрохимической теории коррозии металлов рассмотрены условия пассивности стали в нейтральных и щелочных средах, разобран механизм защитного действия бетона и установлены причины коррозии арматуры.

Исследованы основные факторы, влияющие на состояние арматуры в бетоне: особенности окружающей среды, плотность бетона и толщина защитного слоя, вид вяжущего и режим твердения бетона, различные добавки, вводимые в бетонную смесь, а также трещины, образующиеся в бетоне при работе конструкций.

Описаны виды разрушения арматуры, в частности специфические хрупкие обрывы; характерные для высокопрочной, в особенности термически упроченной, арматуры предварительного напряжения железобетонных конструкций, вследствие коррозионного растрескивания или водородной хрупкости.

Изложены включенные в последние годы в нормы проектирования практические рекомендации по выбору видов конструкций и армирования, назначению толщины защитного слоя и плотности бетона. Сформулированы основные требования к технологии изготовления железобетонных конструкций, обеспечивающие сохранность арматуры, в частности тонких армирующих сеток в армоцементных конструкциях. Приведены сведения по защите поверхности железобетонных конструкций в агрессивных средах.

Значительное внимание уделено особенностям легких и ячеистых бетонов как среды для арматуры, характеру развития ее коррозии в такой среде и способом защиты. Излагаются практические рекомендации по повышению защитных свойств легких бетонов на пористых заполнителях.

Освещаются основные результаты исследований защитных покрытий арматуры в ячеистых бетонах и технологии их нанесения на арматурные каркасы. Приводятся рекомендуемые рецептуры и технологические правила приготовления и нанесения защитных покрытий в заводских условиях. Описываются механизированные технологические линии по защите арматурных каркасов.

Книга предназначена для проектировщиков, производственников и научных работников, занятых созданием, эксплуатацией и изучением железобетонных конструкций для зданий и сооружений, подвергающихся агрессивным воздействиям.

Таблиц — 55, рисунков — 58, библиография — 234 названия.

Предисловие ко второму изданию

Вопросы качества и долговечности строительных конструкций как в техническом, так и в экономическом аспекте привлекают все большее внимание строителей. Очевидно, что во многих случаях экономически оправдано увеличение первоначальных затрат на изготовление конструкций и ее надежную защиту, если это позволяет сократить число и стоимость ремонтов в процессе эксплуатации.

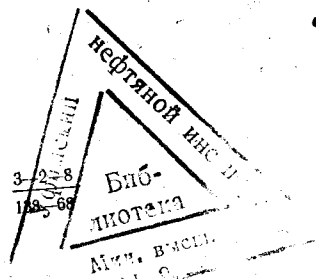
В особенности это относится к железобетонным конструкциям, в которых стальная арматура может быть хорошо защищена бетоном, а последнему можно придать значительную стойкость к воздействию среды.

Длительное и систематическое изучение стойкости разнообразных железобетонных конструкций в различных условиях эксплуатации, проводимое коллективом Центральной лаборатории коррозии НИИ бетона и железобетона под научным руководством д-ра техн. наук проф. В. М. Москвина, показало, что наиболее опасны повреждения, вызываемые развитием коррозии арматуры, а их устранение чрезвычайно затруднительно.

В настоящее время не существует простых и надежных методов прекращения раз начавшегося процесса коррозии арматуры. Поэтому в своих исследованиях и при работе над вторым изданием настоящей книги автор уделит основное внимание теоретическому обоснованию и разработке практических рекомендаций, которые должны обеспечить длительную сохранность арматуры в конструкциях из различных бетонов в разных условиях эксплуатации.

Большая часть разработанных рекомендаций включена в «Указания по проектированию антикоррозийной защиты строительных конструкций» и другие нормативные документы. Некоторые рекомендации еще недостаточно конкретны и нуждаются в дальнейшем уточнении. В частности, это относится к нормированию плотности бетона.

Автор выражает сердечную признательность участвовавшим в исследованиях сотрудникам лаборатории



Н. К. Розенталю, В. Ф. Степановой, И. Г. Катаеву, С. И. Ананьевой, Н. И. Жилиной, З. И. Саргиной, аспирантам В. И. Новгородскому, Э. А. Гуревичу и Р. Б. Шапиро. Автор глубоко благодарен В. С. Артамову, В. И. Бабушкину, Г. П. Вербецкому, Ф. М. Иванову и В. Б. Ратинову за полезные советы при обсуждении программ и методик исследований, а также за ценные замечания по рукописи.

Особую благодарность автор выражает В. М. Москвину за ценные указания при работе над книгой.

Автор с признательностью примет все замечания по книге.

ВВЕДЕНИЕ

Железобетон широко известен как долговечный материал, в большинстве случаев не нуждающийся в какой-либо защите от воздействий внешней среды. Бетон, представляющий собой искусственный каменный материал, может быть изготовлен достаточно прочным и стойким к агрессивным воздействиям, а стальная арматура обычно находится под надежной защитой слоя этого бетона.

Действительно, большинство старых железобетонных конструкций и сооружений, относящихся к первым десятилетиям XX в., подтверждает репутацию железобетона как долговечного материала. Однако известно немало фактов, когда происходят как местные повреждения, так иногда и значительные разрушения железобетонных конструкций.

Можно отметить две основные схемы развития процессов коррозии железобетонных конструкций. По первой коррозия арматуры начинается после разрушения бетона в защитном слое, т. е. причина повреждения конструкции заключается в недостаточной стойкости бетона.

Развитие коррозии по второй схеме начинается с арматуры, когда бетон не обладает достаточными защитными свойствами, но и не разрушается под действием среды, которая в данном случае не является по отношению к нему агрессивной. Разрушение бетона происходит под давлением растущей на арматуре ржавчины, т. е. носит чисто механический характер. Обычно такого рода разрушение железобетонных конструкций вызывается действием влажного воздуха или периодического увлажнения и характерно для влажных цехов, особенно при загрязнении атмосферы агрессивными газами.

В настоящей книге рассматриваются в основном особенности коррозии и способы защиты железобетонных конструкций, когда коррозия арматуры развивается по второй схеме.

Изучение вопроса о сохранности стальной арматуры в цементном бетоне показывает, что защитные свойства его по отношению к арматуре могут быть весьма раз-

§ 1. Основные сведения из теории коррозии металлов

Коррозия арматуры в бетоне является частным случаем многообразного явления коррозии металлов.

Под понятием коррозии металлов подразумевается процесс постепенного разрушения их поверхности в результате химического или электрохимического взаимодействия металла с окружающей средой. Чисто химическое взаимодействие металлов со средой встречается несравненно реже, чем электрохимическое. Коррозия стальной арматуры в бетоне является электрохимическим процессом. Поэтому ниже будут кратко изложены основные положения электрохимической теории коррозии металлов, необходимые для понимания сущности процесса коррозии арматуры в бетоне, и обоснования способов ее защиты.

Электрохимическая коррозия, или коррозия в электролитах, является результатом работы множества микроскопических короткозамкнутых гальванических элементов, возникающих на поверхности металла при контакте с электролитом. Их возникновение обусловлено неоднородностью металла или окружающей среды. Таким образом, электрохимическая коррозия предполагает наличие электрического тока, который возникает в процессе коррозии и не нуждается во внешней причине. При наличии внешней причины в виде блуждающих токов коррозия обычно усиливается.

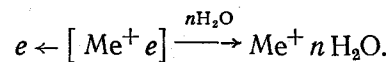
Известно, что при погружении в электролит двух электродов из разных металлов они приобретают различные по величине электрические потенциалы. При замыкании электродов между ними возникает ток. Протекание тока сопровождается растворением электрода с более электроотрицательным потенциалом — анода.

Короткозамкнутые гальванические элементы могут возникать и на одном металле вследствие наличия участков поверхности с различными потенциалами. Раз-

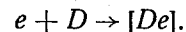
ность потенциалов наблюдается между разными структурными составляющими сплава и примесями, а также между участками поверхности, отличающимися состоянием пленки окислов, обработкой и напряженным состоянием.

На величину потенциала металла влияют и многие другие факторы, например состав электролита, скорость его движения, концентрация растворенных газов. Поэтому практически всегда при соприкосновении с электролитом на поверхности металла возникают короткозамкнутые гальванические элементы, которые называют коррозионными микро- и макроэлементами.

Электрохимическая коррозия, т. е. деятельность коррозионных гальванических пар, — явление довольно сложное, включающее ряд элементарных процессов. На анодных участках имеет место анодный процесс — переход в раствор ионов металла и их гидратация с освобождением избыточных электронов, которые, оставаясь в металле, движутся к катодному участку. Схематически это изображается так [134]:

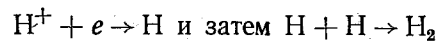


На катодных участках поверхности металла избыточные электроны ассимилируются каким-либо деполаризатором (атомом или ионом раствора, способным восстанавливаться, т. е. поглощать электрон):

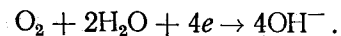


Наиболее практически важными разновидностями катодного процесса являются:

катодная реакция восстановления иона водорода в газообразный водород (водородная деполаризация):



и катодная реакция восстановления кислорода с превращением его в ион гидроксила (кислородная деполаризация)



Происходящие в природе и технике коррозионные процессы в большинстве своем связаны с восстановлением молекулярного кислорода. Такому виду разрушения металлы подвергаются при коррозии в воде, атмос-

фере, почве. Коррозия стали в бетоне, как будет показано ниже, также идет с кислородной деполяризацией.

Катодный и анодный процессы обычно идут на разных участках поверхности металла, и электроны, избыточные у анодов, передвигаются в металле к катодам. Соответственно в растворе происходит направленное перемещение ионов (рис. 1). Возникает электрический ток,

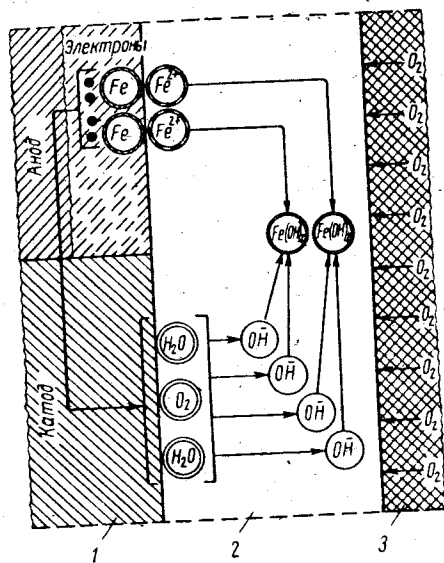
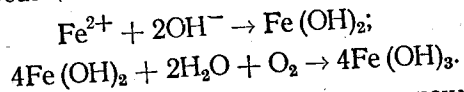


Рис. 1. Схема процесса коррозии

1 — арматура; 2 — электролит (пленка влаги); 3 — бетон

называемый током коррозии. При таком механизме коррозии разрушаются лишь анодные участки поверхности металла. Продукты коррозии образуются в результате вторичных реакций в электролите:



Перечисленные выше процессы взаимосвязаны и протекают в несколько последовательных стадий. В подобных случаях скорость коррозии в целом будет определяться (контролироваться) скоростью того процесса, который в данных условиях протекает наиболее медленно. При коррозии металла в нейтральных и щелочных средах таким контролирующим фактором чаще всего яв-

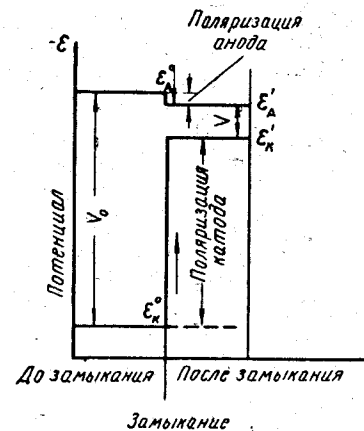
ляется поступление кислорода к корродирующей поверхности.

Скорость коррозии, выраженная в весовых потерях металла на единицу поверхности в единицу времени, зависит от величины тока коррозии, т. е. от разности потенциалов анодных и катодных участков и омического сопротивления внутренней цепи коррозионного элемента.

Однако начальные значения электродных потенциалов катодных и анодных участков микропар не определяют величину тока и скорость коррозии. Вследствие ряда причин значения этих потенциалов с самого начала работы коррозионного элемента начинают изменяться в сторону уменьшения первоначальной разности потенциалов. Фактически величина тока коррозии, таким образом, определяется не первоначальной, а значительно меньшей разностью потенциалов, как это показано на рис. 2. Это

Рис. 2. Схема изменения потенциалов при замыкании гальванической пары (по Акимову)

ϵ_a^0 — начальный потенциал анода; ϵ_k^0 — начальный потенциал катода; V_0 — начальная разность потенциалов; V — разность потенциалов, определяющая ток коррозии; ϵ_a' — потенциал анода после замыкания; ϵ_k' — потенциал катода после замыкания



явление, т. е. изменение потенциалов электродов, называют поляризацией. Факторы, уменьшающие поляризацию электродов, называются деполяризующими. Различают анодную и катодную поляризацию.

Анодная поляризация вызывается главным образом увеличением концентрации ионов растворяющегося металла в прилегающем слое электролита. Движение электролита, уносящего от поверхности анода ионы металла, уменьшает анодную поляризацию. Аналогично действует связывание ионов металла растворенными веществами с

образованием продуктов коррозии. Другой причиной анодной поляризации является образование на аноде не-растворимых и непроницаемых для катионов пленок — пассивирование.

Катодная поляризация вызывается недостаточно быстрым связыванием электронов, поступающих с анодных участков, в результате недостатка деполяризатора.

Характер катодного процесса зависит от концентрации ионов водорода в электролите. При коррозии в кислых средах ($\text{pH} < 4$), как правило, на катоде выделяется водород, в нейтральных и щелочных средах поглощается кислород.

Кислород играет в коррозии двойную роль: с одной стороны, как деполяризатор он может усиливать ее, а с другой, — тормозить за счет образования и поддержания в стабильном состоянии защитных окисных пленок на поверхности металла.

Вещества, повышающие скорость коррозии, обычно называют стимуляторами; вещества, которые снижают ее скорость, называют замедлителями коррозии. В зависимости от механизма действия замедлители делятся на ингибиторы и пассиваторы. Кислород, например, является одновременно и стимулятором, и пассиватором. Он способствует улучшению защитной окисной пленки, т. е. уменьшает вероятность коррозии, сокращает число очагов, в которых может возникнуть коррозионный процесс. Вместе с тем кислород повышает скорость коррозии в начавших корродировать точках, т. е. действует стимулирующе, поскольку является сильным катодным деполяризатором.

Сильнейшими стимуляторами коррозии являются ионы хлора. Несколько слабее действие сульфат-ионов. Успешно тормозят коррозионный процесс в нейтральных и щелочных средах сильные окислители — соли щелочных и щелочноземельных металлов: хроматы, нитраты и др. [106]. Однако, действуя в основном на анодный процесс и сокращая площадь анодных участков, эти ингибиторы являются опасными; в случае недостаточной концентрации они, уменьшая площадь распространения коррозии, могут повысить ее интенсивность, т. е. увеличить глубину проникания.

Наряду с обычным ускоряющим действием повышение температуры может вызвать и замедляющий эффект. В частности, при кислородной деполяризации повышение температуры сверх определенного предела замедляет

коррозионный процесс вследствие уменьшения растворимости кислорода.

По характеру разрушения поверхности металла различают следующие основные виды коррозии:

1) равномерная, или общая, коррозия, т. е. равномерно распределенная по поверхности металла;

2) местная, или локальная (пятнами), коррозия, сосредоточенная на отдельных участках поверхности;

3) точечная коррозия, или питтинг, сосредоточенная на очень малых участках поверхности, но отличающаяся глубоким прониканием;

4) межкристаллитная (интеркристаллитная) коррозия, сосредоточенная на границах кристаллитов.

На корродирующей поверхности можно одновременно наблюдать разные виды разрушений. Чаше наблюдается постепенный переход одного вида в другой: например, коррозии пятнами — в общую с развитием в дальнейшем глубоких местных изъязвлений.

Местная коррозия, несмотря на вызываемые ею меньшие весовые потери металла, более опасна, чем общая, так как приводит к быстрой потере прочности отдельных участков.

Несмотря на малые весовые потери металла, особенно резко понижает прочность межкристаллитная коррозия, нарушающая связи между кристаллами.

Продукты коррозии железа (ржавчина) имеют различный состав, который зависит от условий протекания процесса. Наиболее часто образуются такие соединения, как $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Fe_2O_3 . Ржавчина занимает в 2—3 раза больший объем, чем прокорродировавшая сталь, и отличается рыхлостью (объем окисла Fe_2O_3 в плотном теле, например, в 2.16 раза больше объема окислившегося металла).

Общепринято выражать коррозионную стойкость металлов по 10-балльной шкале в зависимости от скорости коррозии, определяемой либо потерей веса с единицы поверхности, либо глубиной проникания коррозии за единицу времени. Однако из изложенного выше о видах коррозионных разрушений очевидно, что эти показатели не всегда могут служить критерием стойкости.

Как будет показано ниже, для стальной арматуры железобетонных конструкций использовать общепринятую шкалу стойкости не представляется возможным. Объясняется это тем, что даже очень медленный процесс коррозии арматуры, в результате которого ее прочность

остается еще достаточной, может привести к растрескиванию бетона под давлением растущего слоя ржавчины, т. е. к нарушению расчетного сечения железобетонной конструкции.

Борьба с коррозией металла ведется различными путями. Стойкость многих металлов и сплавов повышают путем введения полезных компонентов и удаления вредных примесей. В применении к стали этот способ называется легированием.

Целесообразно также снижать агрессивность среды, например удалять из атмосферы производственных зданий вредные составляющие, вводить ингибиторы (замедлители) коррозии в газовую и в жидкую среды.

Давно и широко применяемым способом защиты металлов от коррозии являются металлические и неметаллические покрытия. Как те, так и другие можно выбрать так, что они будут не только изолировать металл от внешней среды, но и защищать его электрохимически. Примером может служить цинковое покрытие стали. Цинк является анодом по отношению к железу, так как его электродный потенциал более отрицателен. Поэтому даже при повреждении такое покрытие обеспечивает защиту стали, так как в возникающей у места нарушения покрытия гальванической паре разъедается цинк, а сталь остается невредимой. Такого рода покрытия называют протекторными.

Электрохимическая защита крупных сооружений трубопроводов, резервуаров, морских судов осуществляется при помощи протекторов или путем наложения на конструкцию катодного потенциала от постороннего источника тока. При этом конструкция, будучи катодом, не корродирует, разрушаются лишь специально предназначенные для этого аноды. При протекторной защите к защищаемой конструкции присоединяют пластинки из металла или сплава с более отрицательным потенциалом, которые служат анодами.

Известно очень много лакокрасочных защитных покрытий с различной степенью защитного действия и разной долговечностью. Соответствующим подбором компонентов, в частности пигментов и наполнителей, лакокрасочным покрытиям можно придать кроме изолирующих свойств также и ингибирующие, например, путем введения хромата цинка в состав грунта. Влага, проникая через пленку покрытия, растворяет частицы хромата цин-

ка, а получающийся раствор, соприкасаясь со сталью, пассивирует ее поверхность.

Защита стали от коррозии в железобетонных конструкциях в значительной степени основана также на пассивирующем действии щелочной среды, образующейся в процессе гидратации и твердения цементного камня.

§ 2. Условия пассивности стали в нейтральных и щелочных средах

Содержание свободных ионов водорода в электролите принято характеризовать величиной pH, которая представляет собой отрицательный десятичный логарифм концентрации этих ионов. Шкала значений pH для водных растворов простирается от 0 до 14. При этом значение pH=0 соответствует однонормальному раствору сильной, например H_2SO_4 , кислоты, pH=7 — нейтральной воде, а pH=14 — однонормальной щелочи (NaOH).

В настоящее время наиболее наглядное представление об устойчивости системы металл — электролит можно получить из так называемых диаграмм Пурбэ [207], составленных на основании термодинамических данных. Такая диаграмма для системы железо — вода представлена на рис. 3.

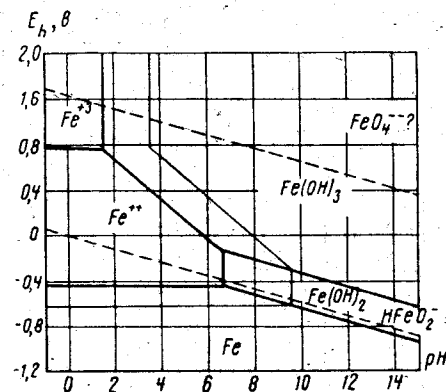


Рис. 3. Диаграмма полей устойчивости железа в координатах E_h — pH

Потенциал металла по отношению к нормальному водородному электроду сравнения определяется известной в электрохимии [114] формулой:

$$E_h = E_0 + \frac{RT}{zF} \ln \frac{[ox]}{[red]}, \quad (1)$$

где E_0 — стандартный потенциал данного металла при температуре 25°C, давлении 1 ат и равенстве окисленной [ox] и восстановленной [red] форм:

$$[\text{ox}] = [\text{red}] = 1;$$

R — газовая постоянная ($R = 8,314 \text{ Дж}$);

T — абсолютная температура ($T = 298^\circ \text{K}$);

z — заряд иона;

F — число Фарадея ($F = 96\,500 \text{ Кл/г экв}$).

Подставив указанные значения в формулу (1) и перейдя к десятичным логарифмам, получим

$$E_h = E_0 + \frac{0,059}{z} \lg \frac{[\text{ox}]}{[\text{red}]} \quad (2)$$

Если раствор не полностью ионизирован или если система окисления — восстановления не полностью диссоциирована, появляется дополнительная зависимость от pH и более общее уравнение:

$$E_h = E_0 + \frac{0,059}{z} \lg \frac{[\text{ox}]}{[\text{red}]} - 0,059 \text{ pH} \quad (3)$$

Это уравнение действительно при температуре 25°C и давлении 1 ат. Графически оно интерпретируется при помощи диаграмм Пурбэ, построенных в координатах pH — E_h , на основании термодинамических расчетов, определяющих устойчивость различных окисленных и восстановленных форм. Кроме линий, разделяющих поля устойчивости этих форм, на диаграмме нанесена сеть прямых гН, определяющих окислительно-восстановительное равновесие воды. Вода устойчива между значениями гН=0 и гН=

41,7. При гН=27,7 вода нейтральна, между 27,7 и 41,7 обладает окисляющими свойствами, между 27,7 и 0 — восстанавливающими. При гН<0 вода разлагается с выделением водорода, при гН>41,7 — с выделением кислорода (см. рис. 5).

На рис. 4 приведена упрощенная диа-

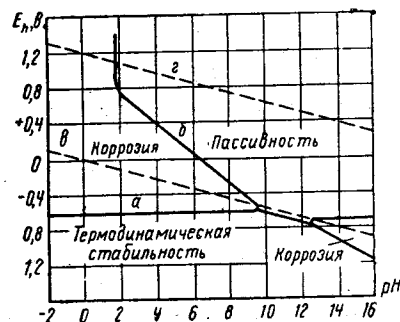
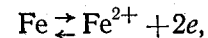


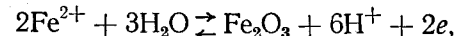
Рис. 4. Упрощенная диаграмма Пурбэ для железа (температура 25°C)

грамма Пурбэ для железа, дающая информацию относительно термодинамического равновесия между металлом, его ионами в растворе или нерастворимыми продуктами реакции в зависимости от pH электролита и электродного потенциала металла. Здесь сплошными линиями обозначены границы полей устойчивости. Так, горизонтальная линия a показывает потенциал для равновесия



которое осуществляется при концентрации (активности) Fe^{2+} , равной 10^{-6} н. Ниже этой линии находится область термодинамической стабильности железа в среде, содержащей не менее 10^{-6} н. ионов Fe^{2+} , выше — область коррозии.

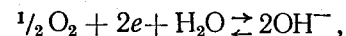
Наклонная линия b характеризует равновесие между ионами двухвалентного железа в растворе и твердой окисью железа:



т. е. отражает условия возникновения твердых нерастворимых продуктов коррозии (в равновесии с концентрацией Fe^{2+} в растворе, равной 10^{-6} н.).

Выше этой линии находится область пассивности, где металл термодинамически неустойчив, но коррозионный процесс не развивается благодаря образованию на его поверхности нерастворимых продуктов реакции (для железа концентрация Fe^{2+} ниже 10^{-6} н.).

Вторая область коррозии, располагающаяся справа, соответствует образованию ферритов железа (HFeO_2) в сильнощелочных растворах. Верхняя пунктирная наклонная прямая g характеризует равновесие воды в зоне окисления:



а нижняя $в$ — равновесие воды в зоне восстановления:

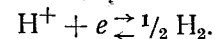
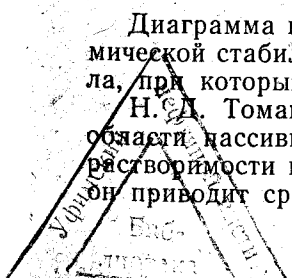


Диаграмма наглядно показывает области термодинамической стабильности стали и значения pH и потенциала, при которых она становится нестабильной.

Н.С.Д. Томашов [137] считает, что для определения области пассивности недостаточно одного признака нерастворимости продуктов коррозии. В качестве примера он приводит сравнительно быструю коррозию железа в

152551



нейтральных растворах, содержащих хлор-ионы, несмотря на весьма малую растворимость конечных продуктов реакции.

По Н. Д. Томашову, для возникновения электрохимической пассивности металла недостаточно только не растворимости продуктов коррозии; необходимо, чтобы они образовывались в результате прямого анодного процесса, т. е. непосредственно на реагирующей поверхности. Продукты коррозии, которые образуются в растворе вследствие вторичных процессов, не пассивируют сталь.

В работе Петрококкино [204] приводится детальная трактовка диаграммы Пурбэ для железа. При этом возникновение пассивности связывается со степенью окисляющего действия среды, характеризующейся значением rH (отрицательный логарифм парциального давления водорода — $\lg p_{H_2}$), т. е. ее аэрируемостью.

На рис. 5 приведена диаграмма Пурбэ в трактовке Петрококкино. В зоне А железо термодинамически устойчиво (возможная реакция — катодное восстановление

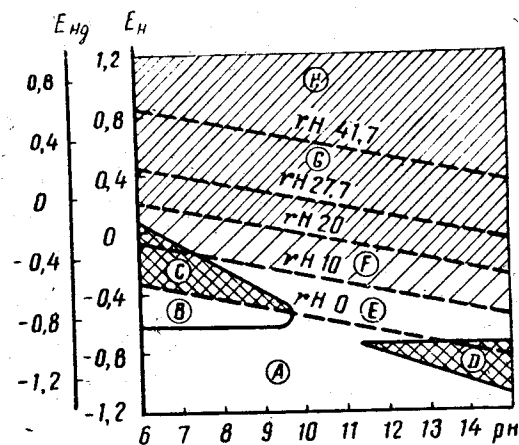


Рис. 5. Диаграмма условий пассивности железа с учетом аэрируемости среды

водорода), зона В характеризуется быстрым растворением железа без образования ржавчины, так как отсутствует кислород (зона расположена ниже линии $rH=0$). В зоне С железо также активно. Коррозия сопровождается образованием ржавчины при малых парциальных давлениях кислорода ($rH=0 \div 15$).

Зона D — область щелочной коррозии, в результате которой образуются ферриты. Зона E — область слабой

активности железа с возможным появлением ржавчины. В зоне F железо характеризуется неустойчивой пассивностью. В зависимости от pH среды возможна как коррозия с образованием ржавчины, так и пассивность. В зонах G и H железо в основном пассивно. Возможна активность в сильноокислой и окисляющей среде (при $rH > 50$).

§ 3. Механизм защитного действия бетона

Плотный бетон на портландцементе как среда для арматурной стали характеризуется значением pH поровой жидкости, равным 12—12,5. При этом пористая структура бетона в большинстве случаев обеспечивает поступление к поверхности арматуры атмосферного кислорода.

Известно также [134, 145], что в таком бетоне сталь становится пассивной и остается в этом состоянии до тех пор, пока сохраняется защитный слой бетона и зона, в которой протекают процессы взаимодействия бетона со средой, способствующие нарушению пассивности (карбонизация, диффузия хлорионов), не достигла поверхности арматуры.

По нашим данным [4], потенциал стали в бетоне на портландцементе в течение 60 суток сохранялся на уровне — 300 мВ (коррозии стали не наблюдалось), тогда как незащищенная сталь в 5%-ном растворе хлористого натрия имела потенциал выше — 400 мВ. По данным В. С. Артамонова [16], сталь под покрытием на основе портландцемента и пуццоланового портландцемента сохраняет незначительный положительный потенциал (около +50 мВ) при нахождении образцов в пресной воде около 3 лет (рис. 6). В 3%-ном растворе хлористого натрия к концу первого года наблюдалось резкое разблагораживание потенциала до — 280 мВ под влиянием проникающих к стали хлор-ионов.

По данным З. Ш. Караева [58], потенциал стали под покрытием из портландцемента за 1 месяц изменился от — 379 до — 268 мВ (при хранении в морской воде коррозии не наблюдалось).

Опыты, проведенные нами совместно с Н. К. Розенталем, показали, что значение потенциала стали в бетоне зависит также от ряда условий, в частности от влажности образца и, очевидно, от связанной с ней проницаемости бетона для кислорода.

Кривые на рис. 7 показывают изменение потенциалов стальных стержней в бетоне в течение 3 недель с момента изготовления образцов. Первые сутки образцы из цементно-песчаного раствора находились в фор-

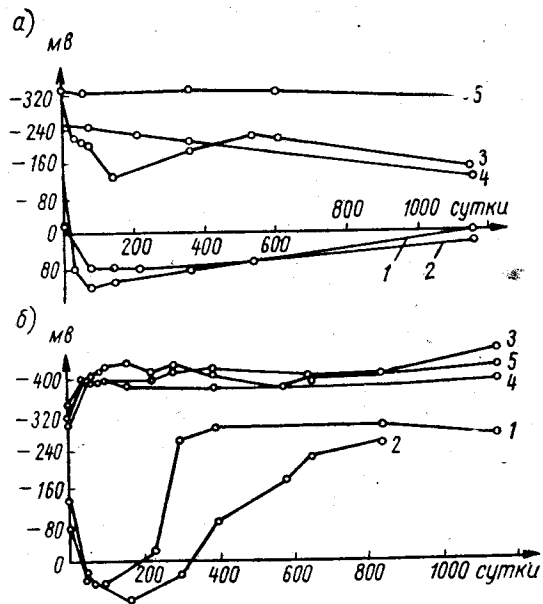


Рис. 6. Значение потенциала стали в различных средах

а — в пресной воде; б — в 3%-ном растворе NaCl; 1 — портланд-цемент; 2 — пуццолановый; 3 — глиноземистый; 4 — гипсоглиноземистый; 5 — расширяющийся

мах под влажными опилками; потенциал стали постепенно смещался в отрицательную сторону. После освобождения от форм часть образцов была погружена в воду, а другая — оставлена на воздухе. В первых потенциал продолжал смещаться в отрицательную сторону в течение 3 суток, затем началось медленное смещение к плюсу, продолжавшееся до 14 суток, после чего потенциал стабилизировался на уровне -370 мВ по НВЭ. За первые сутки воздушного хранения произошло резкое облагораживание потенциала, которое затем медленно продолжалось до 14 суток, а затем потенциал практически установился на уровне $+140$ мВ.

Указанные значения, равно как и все точки на кри-

вых, представляют средние результаты измерений на 6 параллельных образцах. Отклонения от средних значений достигают у образцов, хранившихся в воде, ± 100 мВ, а на воздухе ± 10 мВ.

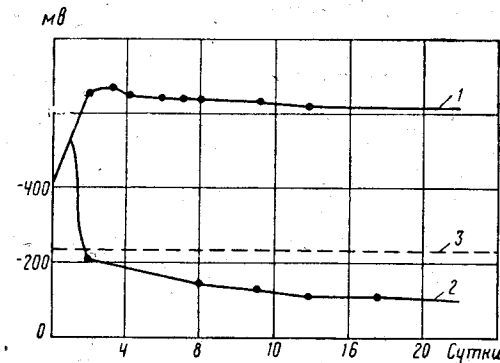


Рис. 7. Изменение потенциала стали в бетоне

1 — хранение в воде; 2 — хранение на воздухе; 3 — 0 нормального водородного электрода

Приведенные опытные значения потенциалов арматуры в бетоне на портландцементе располагаются в основном в зоне F на диаграмме Пурбэ — Петрококкино, где состояние стали может быть как активным, так и пассивным. Следовательно, данная диаграмма не дает однозначного ответа на вопрос о состоянии арматуры в бетоне. Необходимо, по-видимому, привлечение дополнительных данных.

Б. А. Пурин и Л. К. Лепинь [94] изучали электродные потенциалы и скорость коррозии железа в щелочных растворах. Из графиков на рис. 8 видно, что в растворах NaOH при $\text{pH} > 12$ потенциал железа длительно (35—40 ч) сдвигается к плюсу до стационарного значения в диапазоне от -25 до $+150$ мВ. Поверхность электрода находится в пассивном состоянии, анодный процесс резко замедляется.

В разбавленных растворах NaOH ($\text{pH} \leq 11,3$) потенциал железа в начальный период сдвигается к минусу до стационарного значения в диапазоне от -300 до -350 мВ. Коррозия имеет ярко выраженный местный характер.

В 0,1 н. K_2CO_3 ($\text{pH} = 10,2$) значения потенциалов неустойчивы и могут сдвигаться как к плюсу, так и к минусу. Аналогично в 0,01 н. NaOH ($\text{pH} = 11,8$) потенциал сначала сдвигается к плюсу, затем (через 20—30 ч)

возникает неустойчивое состояние, после чего — резкий сдвиг к минусу.

Устанавливаемое этими опытами критическое значение pH находится в пределах 11,3—11,8. Сталь не пассивируется в щелочных растворах, имеющих pH ниже указанной величины.

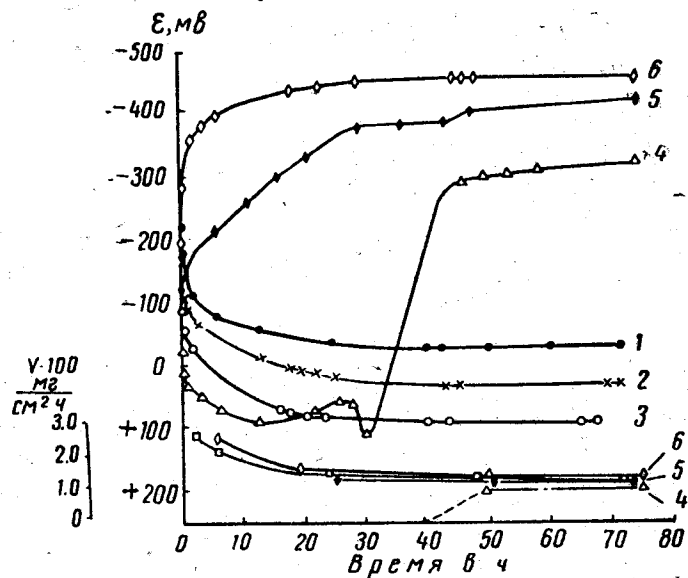


Рис. 8. Электродный потенциал и скорость коррозии железа в растворах NaOH различной нормальности

1 — 2n.; 2 — 1n.; pH=13,8; 3 — 0,1n., pH=12,8; 4 — 0,01n., pH=11,8; 5 — 0,002n., pH=11,3; 6 — 0,001n., pH=10,7

Прямые опыты на образцах стали в растворах $\text{Ca}(\text{OH})_2$ различной концентрации, проведенные Р. Шалон [225], подтверждают приведенные выше результаты электрохимических исследований. Данные табл. 1 показывают, что граница пассивирующего действия $\text{Ca}(\text{OH})_2$ проходит около pH=12 при свободном доступе воздуха и около pH=11,5 при весьма ограниченном доступе воздуха.

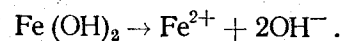
По термодинамическим расчетам В. И. Бабушкина [19], $\text{Fe}(\text{OH})_2$, образующая пассивную пленку на поверхности стали, оказывается неустойчивым соединением,

Таблица 1

Коррозионные потери стальных образцов в растворах $\text{Ca}(\text{OH})_2$

pH раствора	Потеря веса в % за 3 мес.	
	при ограниченном доступе воздуха	при аэрации раствора
10	0,74	2,46
10,5	0,81	2,2
11	0,3	2
11,5	0,1	1,8
12	0,02	0,02
12,65	0,02	0,01

легко окисляющимся в атмосферных условиях до $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Однако этот процесс зависит от pH среды и активности иона Fe^{2+} , поскольку обязательной стадией является растворение



Показано, что при pH ≤ 9,0 растворение неизбежно, при pH = 9 ÷ 11 условием нерастворимости гидролизис является наличие в растворе активной концентрации Fe^{2+} в пределах от $10^{-4,73}$ до $10^{-8,73}$ г · ионов/л, что не всегда выполнимо. При pH > 12 для предохранения гидролизиса железа от растворения достаточно, чтобы активность ионов двухвалентного железа в растворе была не ниже $10^{-10,73}$ г · ионов/л, что почти всегда обеспечивается. Изложенное показывает, что в среде бетона, поровая жидкость которого имеет pH ≥ 12, арматура находится в пассивном состоянии благодаря полному анодному торможению коррозионного процесса.

При нарушении по той или иной причине пассивного состояния стали в бетоне создаются условия для более или менее свободного протекания анодного процесса растворения металла. Контролирующим может оказаться катодный процесс восстановления кислорода, который, в свою очередь, будет лимитироваться диффузией кислорода через защитный слой бетона. При малой влажности бетона его ионная проводимость весьма мала, и решающее значение приобретает, очевидно, омический контроль коррозионного процесса. Опыт показывает, что коррозии арматуры в бетоне обычно не на-

блюдается до тех пор, пока цементный камень, находящийся в контакте с поверхностью стали, не карбонизируется. В полностью карбонизированном бетоне, когда вся гидроксильная поровая жидкость перешла в карбонат, последняя имеет pH 9.

Обычно карбонизацию бетона определяют пробой фенолфталеином, который уже при pH=10 не дает малинового окрашивания. Более точные определения, выполненные Дейлером [161], показали, что сталь теряет пассивность и начинает корродировать в бетоне при частичной карбонизации, когда значение pH поровой жидкости падает до 11 единиц. Нейтрализация щелочной влаги в бетоне происходит и при действии других кислых газов, например SO_2 . Пониженное значение pH в бетоне может быть также результатом применения некоторых вяжущих (например, глиноземистого цемента) или автоклавной обработки.

Кроме концентрации водородных ионов в поровой жидкости бетона на его защитное действие влияет ионный состав этой жидкости, который зависит от вида вяжущего, заполнителей и добавок в бетон, а также от среды. Характерно депассивирующее действие ионов хлора, способных разрушать пассивную пленку $\text{Fe}(\text{OH})_2$ на поверхности арматуры в бетоне. Подобное, хотя и более слабое действие, свойственно сульфат-ионам. Некоторые ионы (NO_2^- , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ и др.), наоборот, способствуют сохранению пассивных пленок.

Перечисленные факторы (pH, ионный состав) определяют термодинамическую возможность процесса коррозии. Для практики важно знать, как долго может сохраниться состояние пассивности стали в бетоне, а также как быстро будет развиваться ее коррозия в случае потери пассивности. Это уже вопросы кинетики.

Для длительной защиты арматуры необходима малая проницаемость бетона, т. е. плотная структура и достаточная толщина слоя бетона. Чем плотнее бетон, тем лучше он сопротивляется прониканию к арматуре агрессивных веществ. Огромное значение имеет влажность, поскольку она влияет на проницаемость бетона, от которой зависит диффузионный контроль катодного процесса, а при влажности ниже критической основным становится омический контроль.

Кроме деятельности микропар в процессе коррозии арматуры могут участвовать и макропары, когда в за-

щитном слое имеются дефекты в виде неплотностей и трещин, создающие эффект дифференциальной аэрации, или разная степень насыщенности водой, а также ионами OH^- и Cl^- .

В заключение необходимо подчеркнуть, что задача поддержания арматурной стали в пассивном состоянии в бетоне, очевидно, в большинстве случаев более простая, чем торможение коррозии, когда сталь активна. Это подтверждается многочисленными случаями коррозионных повреждений железобетонных конструкций [5]. Обобщение опыта восстановления таких конструкций показывает, что до сих пор нет надежных способов прекращения процесса коррозии (кроме облагораживания среды).

Из диаграммы Пурбэ (см. рис. 3—5) следует, что поляризуя сталь катодно от внешнего источника тока, можно привести ее в термодинамически стабильное состояние даже при pH среды значительно ниже 9. На этом явлении основан метод катодной защиты, который применяется в последнее время не только к стальным, но и к железобетонным подземным конструкциям и сооружениям [104, 222]. Есть попытки использовать этот метод и для защиты арматуры наземных конструкций из автоклавных силикатных бетонов [139], однако нам представляется, что практического значения это иметь не может.

Анодная поляризация арматуры от внешнего источника тока нарушает ее пассивность, так как при электролизе поровой воды в бетоне на аноде расходуются гидроксил-ионы и у поверхности анода понижается величина pH [193]. Пассивная пленка разрушается, и сталь начинает беспрепятственно растворяться.

Многочисленные исследования, обобщенные в работе И. А. Корнфельд [60], показывают, что блуждающие токи и токи утечки представляют большую опасность для арматуры железобетонных конструкций. Радикальным способом борьбы с этой опасностью является изоляция арматуры от непосредственного контакта с токонесущим оборудованием. Недавно появился другой способ защиты арматуры от электрокоррозии, заключающийся в том, что в бетон вводят в виде мелкого наполнителя углерод (графит, кокс), обладающий электронной проводимостью [146]. При этом ионная проводимость бетона, а с ней и явление электролиза почти пол-

ностью исчезают. Представляется, что этот способ должен найти применение для железобетонных конструкций в цехах электролиза, которые очень быстро разрушаются токами утечки.

Глава

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СОСТОЯНИЕ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ В БЕТОНЕ

§ 4. Влияние среды на защитные свойства бетона

Выше было показано, что основой защитного действия цементных бетонов на арматурную сталь является щелочной характер влаги в капиллярно-пористом теле бетона, способствующий сохранению пассивного состояния поверхности стали. Однако бетон находится в постоянном взаимодействии со средой, которая может либо способствовать его упрочнению и уплотнению, либо разрушать его структуру и понижать прочность, либо уменьшать его способность защищать арматуру.

Как показывают опыт и исследования, последнее может быть вызвано несколькими процессами, результатом которых является потеря бетоном способности поддерживать пассивное состояние стали вследствие понижения степени щелочности межфазной жидкости или проникания в нее ионов — стимуляторов коррозии. Первое обычно является результатом действия на бетон кислых газов и жидкостей, второе — сред, содержащих хлориды.

Наиболее распространенным из кислых газов является углекислый газ, среднее содержание которого в атмосфере сельской местности составляет 0,03%. В атмосфере промышленных районов и в воздухе цехов его концентрация может быть значительно более высокой. Углекислота активно поглощается пористым телом бетона, так как между фронтом карбонизации и поверхностью бетона создается постоянная разность парциальных давлений углекислого газа, поддерживающая его диффузию. Скорость карбонизации зависит от плотности бетона и его влажности, а также от концентрации углекислоты.

По Пауэрсу [209], лишь при относительной влажности воздуха выше 45% содержание воды в бетоне достаточно для карбонизации. Эти данные подтвержда-

Таблица 2

Степень карбонизации растворов

Состав	B/C	Содержание связанной углекислоты в % веса цемента за	
		3 мес.	6 мес.
1:2	0,3	4	7
	0,4	6,1	9
	0,5	8,5	14,6
1:3	0,3	10,1	19,3
	0,4	8,9	14,5
	0,5	13,4	16,5

ются Шиделером [226] и Фербеком [232]. Неоднократно установлено, что при влажности воздуха, близкой к полному насыщению, карбонизация плотных бетонов практически прекращается [50, 176].

Очевидно, наиболее интенсивно процесс карбонизации идет в случае, если пленка влаги на стенках пор в бетоне достаточна лишь для растворения в ней гидроокиси кальция и углекислоты и не закрывает пор целиком, оставляя свободным доступ последней в виде газа. Капиллярная конденсация в порах геля, имеющих поперечник $<10^{-5}$ см [209], способствует дополнительному уплотнению бетонов плотной структуры и препятствует их карбонизации даже при оптимальной для этого процесса относительной влажности (45—70%).

Ф. М. Иванов и Е. И. Черномордик [50] исследовали процессы карбонизации цементно-песчаных растворов в естественных условиях и под давлением. По их данным, наибольшая скорость карбонизации наблюдается при относительной влажности воздуха около 50%; при относительной влажности 25 и 100% карбонизации практически не происходит. В растворе 1:2 при $B/C=0,4$ содержание связанной углекислоты после карбонизации под давлением составляло: при твердении в течение 28 суток во влажных условиях и в воде 12,6%, на воздухе 18,9%, в условиях пропаривания 24%. Эти данные показывают, что режимы твердения, обуславливающие образование пористой структуры раствора, способствуют интенсивной карбонизации. Высокий процент связанной углекислоты в пропаренном растворе свидетельствует о том, что связана не только вся свободная известь, но и выделяющаяся при гидролизе двухкальциевого силиката клинкера.

Карбонизация растворов в слое толщиной 0,7 см в помещении лаборатории, как показывает табл. 2, позволяет судить о плотности составов. Для состава 1:2 на вольском песке наибольшая плотность получается при $B/C=0,3 \div 0,4$, а для состава 1:3 — при $B/C=0,4 \div 0,5$. Отмечается, что при содержании связанной углекислоты 16—20% веса цемента наблюдается полная карбонизация и потеря защитных свойств цементного раствора.

Для газонепроницаемости бетонов особенно важны условия твердения. В воде получают некарбонизирующиеся структуры, а при воздушном твердении и пропаривании — легкокарбонизирующиеся. Авторы пред-

лагают метод расчета длительности карбонизации защитного слоя бетона, исходя из логарифмического закона скорости карбонизации и предельного содержания CO_2 в цементном камне 20%. Расчет показывает, что раствор 1:2 при $B/C=0,4$ (см. табл. 2) в слое толщиной 0,7 см карбонизируется полностью за $4\frac{1}{2}$ года. Поскольку в умеренном климате карбонизация может идти лишь около 6 месяцев в году, то полученный расчетом срок надо удвоить. Выходит, что на карбонизацию слоя такого раствора толщиной 20 мм потребуется 27—30 лет.

Из данных Крона и Блекки [184] следует, что оптимальной для карбонизации раствора влажностью (рис. 9) является 2,5% его веса (или 12% веса сухого цемента в растворе).

В отчете Института доменных шлаков в Рейнхаузене [164] содержатся данные исследования при помощи индикаторов глубины карбонизации на 208 образцах из 127 старых зданий или конструкций со сроком службы до 55 лет. Представляют интерес данные о пробах, показавших глубину карбонизации менее 1 мм в течение длительного времени — от 6 до 23 лет (табл. 3). Таких проб оказалось 12, т. е. 19% общего числа. Из них половина относится к конструкциям со сроком эксплуатации свыше 20 лет. Лишь $\frac{1}{4}$ из них имела $B/C \geq 0,6$; $\frac{3}{4}$ проб имели $B/C \leq 0,55$ (из них больше половины 0,45 и менее).

В табл. 4 помещены данные о пробах с $B/C=0,50$, показавших значительную карбонизацию за 21—28 лет.

Таблица 4

Данные о бетонах, показавших значительную карбонизацию

Срок службы в годах	Условия службы ¹	Объемный вес в т/м³	Водопоглощение в %	Вид цемента	Состав Ц:З	В/Ц	Глубина карбонизации в мм	
							средняя	наибольшая
28	Н	2,22	14,6	EPZ	1:4,8	0,5	9	16
23	Д	2,32	11,7	HOZ	1:4,7	0,5	11	17
21	Н	2,21	13,7	»	1:4,7	0,5	4	8
22	Д	—	—	»	1:4,6	0,5	6	10
23	Д	2,24	14,3	»	1:4,3	0,5	5	10
23	Д	2,24	13,5	»	1:4,2	0,5	9	15

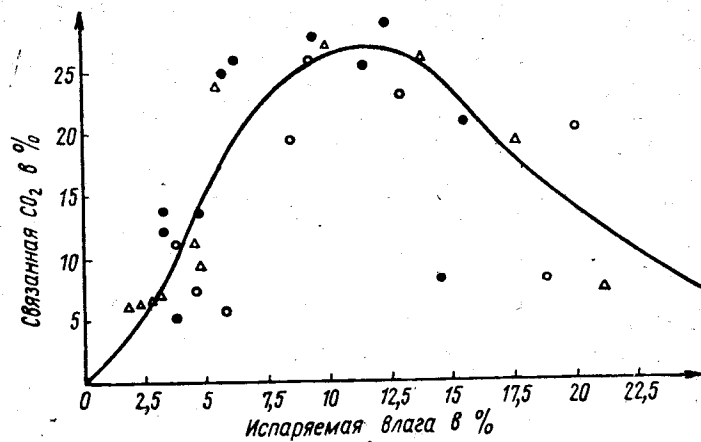
¹ См. табл. 3.

Рис. 9. Зависимость между испаряемой влагой и связанной углекислотой

Таблица 3

Данные о бетонах, показавших наименьшую карбонизацию

Срок службы в годах	Условия службы ¹	Объемный вес в т/м³	Водопоглощение в %	Вид цемента	Состав Ц:З	В/Ц	Глубина карбонизации в мм	
							средняя	наибольшая
8	Д	2,26	11,3	PZ325	—	0,45	<1	1
21	Д	2,11	16	PZ	1:4,5	0,55	<1	4
21	Д	2,18	15,1	»	1:4,6	0,55	<1	2
21	Д	2,06	18,8	»	—	0,60	<1	1
13	Д	2,17	12,2	EPZ225	1:3,3	0,45	<1	1
13	Д	2,07	14,7	»	—	<0,45	1	2
8	В	2,10	14,8	EPZ	—	<0,45	<1	1
25	Н	2,33	11,4	HOZ	—	<0,65	<1	1
8	Д	2,33	9,8	HOZ225	1:6,5	0,55	<1	1
22	Д	2,07	16,9	»	—	<0,75	1	2
23	Д	2,24	—	HOZ325	1:4,4	0,55	<1	1
6	Д	2,32	10,7	»	1:5,5	0,45	<1	1

¹ Д — конструкция, не защищенная от атмосферных осадков; Н — конструкция на открытом воздухе, но защищенная от осадков; В — конструкция внутри здания.

мента. Однако при плотном бетоне карбонизация может быть очень малой: порядка 1 мм за 20—40 лет.

Внутри здания главного вокзала в г. Эссене за 54 года глубина карбонизации бетона составила от 35 до 70 мм (бетон на портландцементе 1:3,9; $V/C \leq 0,6$; объемный вес 2,19; водопоглощение 13,1%). За 41—42 года службы вокзала в г. Оффенбахе на Майне средняя глубина карбонизации бетона наружных конструкций составила 5—10 мм, наибольшая — 8—20 мм (бетон на портландцементе марки 225; $V/C < 0,70$; объемный вес 2,13; водопоглощение 14,4).

За 38 лет эксплуатации цементного элеватора из бетона на доменном цементе 1:4,3 при $V/C = 0,50$ с объемным весом 2,18 и водопоглощением 15,3% карбонизация внутренних конструкций достигла глубины 30 мм. Последние данные показывают, что карбонизация бетона внутри помещений идет в несколько раз быстрее, чем снаружи, что связано, очевидно, как с концентрацией углекислого газа, так и с относительной влажностью воздуха.

Из другой группы данных следует, что при увлажнении наружных конструкций атмосферными осадками карбонизация идет медленнее, чем без непосредственного увлажнения. Кроме того, имеется зависимость от ориентации: с востока карбонизация глубже, чем с запада, что, по-видимому, связано с преобладающим направлением ветров при выпадении дождей.

В работе Клейншмидта [164] приводятся данные

Глубина карбонизации в мм

Тип цемента	Место экспозиции (см. выше)				
	а	б	в	г	д
Портландцемент PZ475	0—1	3—6	1	0—2	1—3
Портландцемент PZ375	0—1	4—6	1—5	3—6	2—3
Сульфатостойкий	2—4	2—5	3—6	3—8	3—6
Шлакопортландцемент EPZ	1—3	4—7	6—10	4—7	3—6
Шлакопортландцемент (50% шлака)	2—4	7—12	6—10	8—11	8—10
Шлакопортландцемент (80% шлака)	2—5	5—8	7—10	12—18	9—12

бетона на шлакопортландцементе и сульфатостойком цементе, наибольшая — на шлакопортландцементе с содержанием шлака 80 и 50%.

Исследование образцов показало также, что:

1) коррозия арматуры начинается, как только зона карбонизации распространится до поверхности арматуры;

2) поверхность арматурных стержней со стороны защитного слоя обычно поражена сильнее, чем противоположная;

3) даже там, где карбонизация отсутствовала или была незначительной, защитный слой толщиной 5—7 мм недостаточен, поскольку возникают локальные очаги поражения со значительными потерями металла в местах, где имеются сквозные капиллярные поры от поверхности бетона до стали;

4) от начальных очагов (поры или места глубокой карбонизации) коррозия распространяется как в глубь стали, так и по ее поверхности. Первое наблюдается чаще в медленно карбонизирующемся бетоне (особенно у капиллярных пор) и при агрессивных условиях, второе — обычно в быстрокарбонизирующемся бетоне.

Лобри де Бройн [158] получил следующую зависимость глубины карбонизации на открытом воздухе от плотности цементно-песчаного раствора:

состав раствора	1:2	1:2,5	1:5
относительная глубина карбонизации			
за 1½ года	1	2	7

обследований, свидетельствующие о том, что у весьма плотного и высокопрочного бетона (марки 450; $B/C = 0,425 \div 0,495$) на открытом воздухе за период 6—13 лет глубина карбонизации не превышает 2 мм. Более глубокая карбонизация наблюдается в местах контакта цементно-песчаного раствора с зернами крупного заполнителя. Бетон марки 225 при $B/C = 0,51 \div 0,63$ карбонизировался за 7 лет на 20 мм, а за 30 лет — на 30 мм. Применение различных цементов (портландцемент, шлакопортландцемент, сульфатостойкий портландцемент, трассовый и трехкомпонентный) не отразилось на глубине карбонизации на открытом воздухе. В камере при температуре 20°C и относительной влажности 65% бетон на портландцементе карбонизировался меньше. Отмечено замедление карбонизации при частом увлажнении. Из приводимых автором данных по 58 пробам бетона из обычных и предварительно напряженных конструкций со сроком эксплуатации от 4 до 13 лет 38 проб (66%) показали глубину карбонизации меньше 1 мм, 4 пробы — от 1 до 3 мм, 3 пробы — от 3 до 5, 6 проб — от 5 до 10 и 7 проб (12%) — от 10 до 20 мм.

Рем и Шнейдер [158] провели исследования на предварительно напряженных балках $10 \times 10 \times 150$ см, армированных высокопрочной термоупрочненной сталью «Сигма-20». Были использованы 6 видов цемента с расходом 300 кг/м^3 и $B/C = 0,56 \div 0,65$. Толщина защитного слоя 5, 10, 15 и 20 мм.

Балки были установлены в 5 различных местах: а) в центре промышленного города; б) в районе металлургического завода (Рур); в) вблизи берега Северного моря; г) в помещении с высокой влажностью воздуха и содержанием углекислого газа от 5 до 30%; д) в лабораторном помещении при относительной влажности воздуха 65% и температуре 20°C (контрольные кубики). Глубина карбонизации бетона после 4 лет хранения образцов приведена в табл. 5.

Из таблицы следует, что:

1) карбонизация идет наиболее быстро в сухом помещении. Во влажном помещении, несмотря на очень высокое содержание CO_2 , карбонизация в общем не превышает таковую в сухой комнате при нормальном содержании CO_2 ;

2) независимо от условий наименьшая глубина карбонизации у бетона на портландцементе, средняя — у

На открытом воздухе карбонизация проникает в глубь примерно в 5 раз медленнее, чем в сухом помещении. Однако в последнем случае карбонизация разрежена, т. е. не является полной, из-за малой влажности раствора. Плотные покраски почти полностью исключают проникание CO_2 .

Шалон и Рафаэль [225] приводят данные по карбонизации цилиндров диаметром 12 мм из цементно-песчаного раствора с $B/C=1,1$ в течение 6 недель (табл.6).

Таблица 6

Карбонизация в зависимости от температуры и относительной влажности воздуха

Температура в °C	Относительная влажность в %	Глубина карбонизации в мм	
		наибольшая	средняя
22	75	3,6	1,4
22	90	4	2,5
40	50	0	0
40	75	6*	6
40	95	6	6

* Полная карбонизация цилиндра диаметром 12 мм.

Данные таблицы показывают, что с повышением температуры карбонизация быстрее проникает в глубь материала, так же как и с повышением влажности. Последнее не согласуется с данными других авторов [150, 176, 184] и может быть объяснено преобладанием крупных пор в структуре тощего раствора с $B/C=1,1$, использованного в данной работе.

По данным Мейера [158], карбонизация образцов из цементно-песчаного раствора 1:3 при $B/C=0,4$ значительно увеличила их прочность (кроме образцов на шлакопортландцементе, содержащем 75% шлака, и сульфатно-шлаковом цементе). Скорость карбонизации увеличивается при переходе от портландцемента к шлакопортландцементу: при 50% шлака в 1,5 раза, при 75% в 2 раза, что примерно соответствует японским данным [202]. У растворных образцов влияние вида цемента выражено слабее, чем у бетонных. Различную скорость карбонизации бетонов на разных цементах следует объяснить неодинаковым запасом способных к карбонизации продуктов и прежде всего $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

В образцах на портландцементе наблюдалась почти линейная зависимость скорости карбонизации от B/C . При прочих равных условиях глубина карбонизации бетона с $B/C=0,5$ в 2 раза меньше, чем бетона с $B/C=0,8$. Для бетона на шлакопортландцементе эта зависимость менее отчетлива. При выдержке на воздухе глубина карбонизации пропорциональна корню квадратному из возраста бетона, т. е. глубина карбонизации в возрасте 10 лет к 50 годам удваивается. Под действием атмосферных осадков карбонизация бетона замедляется. Ее скорость зависит от соотношения продолжительности увлажнения и высушивания.

Карбонизация не увеличивает плотность бетона, о чем свидетельствует примерно одинаковая паропроницаемость образцов карбонизированного и некарбонизированного бетона из сооружений и лабораторных. Скорость высыхания после насыщения водой в первый период выше у карбонизированного бетона, что связано, по-видимому, с изменением структуры пористости цементного камня при карбонизации.

Таблица 7

Карбонизация бетона при разной подвижности бетонной смеси

B/C	Содержание цемента в кг/м^3	Расход воды в л/м^3	Толщина карбонизированного слоя в мм
0,5	360	180	2,8
0,6	350	210	6,2
0,7	345	241	8,9
0,5	320	160	5,8
0,6	310	186	6,7
0,7	300	210	10,1
0,5	290	145	6,6
0,6	285	171	8,7
0,7	280	196	13,1
0,5	260	130	7,4
0,6	260	156	10,2
0,7	255	178	17,4

Козака [183] приводит данные (табл. 7) по глубине карбонизации в течение 5 лет образцов обычных бетонов с разным расходом цемента при различных B/C и неодинаковой подвижности смеси. Данные показывают, что главное влияние оказывает водоцементное отноше-

ние, а при одинаковых B/C карбонизация зависит от расхода цемента.

Молль [196] приводит данные из отчета Мюнхенского центра по испытанию материалов (табл. 8). Образ-

Таблица 8

Карбонизация бетона при одинаковой подвижности бетонной смеси

B/C	Содержание цемента в $кг/м^3$	Срок хранения в годах	Толщина карбонизированного слоя в мм
0,45	350	$5\frac{3}{4}$	0
0,55	340	4	5
0,62	340	4	6
0,65	300	5	6
0,78	300	$6\frac{1}{2}$	7
0,83	250	$2\frac{1}{4}$	7
0,85	240	$3\frac{1}{4}$	16
0,92	250	3	12
0,92	250	6	16
1,33	150	$2\frac{1}{4}$	18

цы из бетонов на портландцементе хранились при нормальной температуре и относительной влажности воздуха 65% до $6\frac{1}{2}$ лет. В образцах с $B/C=0,45$ карбонизация практически отсутствовала, в остальных она была тем больше, чем ниже расход цемента и выше B/C .

По данным Молля [196], образцы бетона двух составов, твердевшие 14 суток при относительной влажности воздуха 98%, показали в 1,5 раза менее глубокую карбонизацию при дальнейшем воздушном хранении (относительная влажность воздуха 65%) в течение 28 месяцев, чем образцы тех же составов, помещенные на воздушное хранение сразу после формования.

Шредер и Смольчик [158] в своих опытах с образцами из цементно-песчаного раствора не обнаружили существенного влияния вида цемента на карбонизацию (табл. 9), но установили, что между глубиной карбонизации и прочностью существует обратная зависимость (призмы $4 \times 4 \times 16$ см в течение 12 месяцев хранились при $20^\circ C$ и 65% относительной влажности).

Хранение балок из бетона с $B/C=0,45$ в различных условиях в течение 25—28 месяцев также не выявило явного преимущества каких-либо цементов. Несколько большая глубина карбонизации была обнаружена в об-

разцах на низкомарочных шлакопортландцементе с высоким содержанием шлака. В среднем глубина карбонизации оказалась большей в комнатных условиях, меньшей в промышленной атмосфере и наименьшей в морской.

Таблица 9

Прочность и глубина карбонизации образцов

Вид, марка и характеристика цемента	$B/C=0,76$		$B/C=0,50$	
	R_{28} в $кг/см^2$	глубина карбонизации в мм	R_{28} в $кг/см^2$	глубина карбонизации в мм
Шлакопортландцемент 375 (43% шлака)	298	3	571	1,5
Портландцемент 375 (8% C_3A)	267	4	528	1
Шлакопортландцемент 375 (15% шлака)	252	4	567	1
Портландцемент 375 (13% C_3A)	247	4,5	489	1,5
Шлакопортландцемент: 375 (29% шлака)	240	4	547	1,5
275 (74% шлака)	225	4,5	443	2,5
275 (55% шлака)	149	5,5	417	2
Портландцемент 275 (<1% C_3A)	162	6	364	2
Портландцемент 275 (2% C_3A)	149	6	335	2

На рис. 10 приведены данные о карбонизации лабораторных образцов бетона после 12 и 23 лет пребывания на открытом воздухе. Они также не выявляют влияния вида цемента, но устанавливают довольно четкую связь карбонизации с прочностью бетона.

Значительные исследования по карбонизации проведены в Японии [202]. Кишитаи предложены формулы для определения скорости карбонизации бетона в естественных условиях. В об-

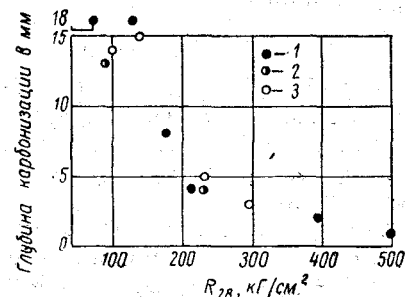


Рис. 10. Карбонизация в зависимости от марочной прочности бетона

Коэффициент карбонизации K

Цемент	Заполнитель								
	П и Г			П и ПГ			ПП и ПГ		
	Поверхностно-активные добавки								
	НЕТ	ВВ	Д	НЕТ	ВВ	Д	НЕТ	ВВ	Д
Обычный портландцемент	1	0,6	0,4	1,2	0,8	0,5	2	1,8	1,1
Быстротвердеющий портландцемент	0,6	0,4	0,2	0,7	0,4	0,3	0,8	1	0,7
Шлакопортландцемент (шлака 30—40%) . . .	1,4	0,8	0,6	1,7	1	0,7	4,1	2,4	1,6
Шлакопортландцемент (шлака около 60%) . .	2,2	1,3	0,9	2,6	1,6	1,1	6,4	3,8	2,6
Песчаный цемент	1,7	1	0,7	2	1,2	0,8	4,9	3	2
Зольный цемент (зола-уноса 20%)	1,9	1,1	0,8	2,3	1,4	0,9	5,5	3,3	2,2

Примечание. П — песок, Г — гравий, ПГ — пористый гравий, ПП — пористый песок, ВВ — воздухововлекающая добавка, Д — диспергирующая добавка.

пользование в тяжелом бетоне на портландцементе воздухововлекающей добавки позволяет уменьшить скорость карбонизации в 2,8 раза, а диспергирующей — в 6,3 раза. Замена в бетоне на портландцементе тяжелого гравия легким (пористым) увеличивает скорость карбонизации в 1½ раза. Если же при этом использовать легкий (пористый) песок, то скорость карбонизации увеличивается в 4 раза.

На рис. 11 приведена номограмма для выбора коэффициента A/K^2 для расчета длительности карбонизации тяжелого бетона без добавок. Получается, например, что для сохранения щелочности у поверхности арматуры при толщине защитного слоя бетона на портландцементе 1 см в течение 100 лет B/C должно быть не более 0,44, а при 2 см — 0,50. Защитный слой толщиной 1 см при $B/C=0,50$ прослужит лишь 25 лет.

Если сравнить теперь изложенный метод расчета скорости карбонизации бетона с приведенными выше результатами обследований и экспериментов [164], то прежде всего необходимо отметить, что он не учитывает условий эксплуатации конструкций. Как правило, формула дает завышенные значения глубины карбонизации (хотя иногда наблюдается удовлетворительное

щем виде, по Кишитани, зависимость выражается формулой

$$t = Ax^2, \quad (1)$$

где t — время в годах;

A — коэффициент пропорциональности;

x — глубина карбонизации в см.

Далее вводится понятие коэффициента карбонизации K , который для обычного бетона принимается равным 1, а для любого другого, для которого формула (1) может быть записана как:

$$t = A_r x_r^2,$$

$$K = \frac{x_r}{x} = \sqrt{\frac{A}{A_r}},$$

откуда $A_r = \frac{A}{K^2}$,

и формула (1) принимает вид

$$t = \frac{A}{K^2} x_r^2.$$

Или в общем виде

$$t = \frac{A}{K^2} x^2, \quad (2)$$

где t — время в годах;

A — функция от B/C ;

K — относительная глубина карбонизации.

Кишитани предложил эмпирические формулы для коэффициента A , подставляя которые в (1), получаем: при $B/C \geq 0,6$

$$t = \frac{0,3(1,15 + 3B/C)}{K^2(B/C - 0,25)^2} x^2, \quad (3)$$

при $B/C \leq 0,6$

$$t = \frac{7,2}{K^2(4,6B/C - 1,76)} x^2. \quad (4)$$

В табл. 10 приводятся определенные Кишитани эмпирические значения коэффициента K . Учитывая, что в расчетные формулы входит K^2 в знаменателе, получается, что кроме B/C существенно влияют на скорость карбонизации бетона вид цемента и заполнителей, а также добавки. Например, для обычного бетона без добавок замена нормального портландцемента на быстротвердеющий увеличивает время карбонизации в 2,8 раза, а замена шлакопортландцементом уменьшает в 2—5 раз (в зависимости от содержания шлака). Ис-

совпадение), реже — заниженные (в основном для конструкций внутри сухих помещений). Сравнение опытных данных Рема и Шнейдера [158] с расчетными показывает, что последние дают завышенные значения при всех условиях испытаний. Особенно велика разница для бетонов на портландцементе.

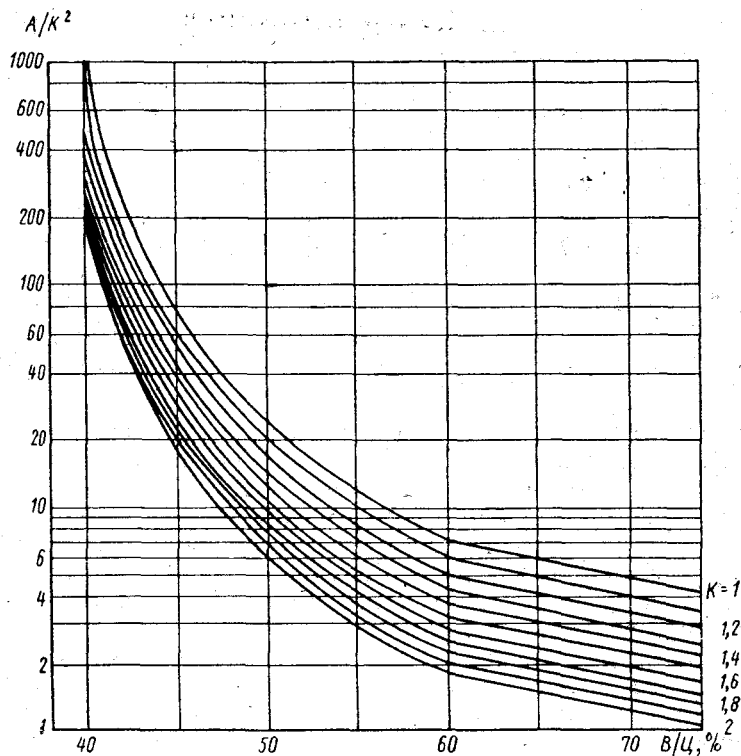


Рис. 11. Номограмма $\frac{A}{K^2}$ (по Кишитани)

Необходимо учесть, что сравнивать приходится бетоны на японских и немецких цементах. Что касается влияния вида цемента, то здесь в основном наблюдается одинаковая тенденция к увеличению скорости карбонизации при переходе от портландцемента к шлакопортландцементом. При этом с возрастанием количества шлака карбонизация увеличивается.

В целом расчет по Кишитани можно рассматривать как дающий результат со значительным запасом, который, вероятно, перекрывает возможные отклонения в сторону увеличения скорости карбонизации в результате нарушения технологии (недостаточное уплотнение, неблагоприятный режим твердения и пр.). Заслуживают внимания и проверки коэффициенты, предлагаемые Кишитани для учета влияния на скорость карбонизации добавок и легких заполнителей.

Рассмотрение вопроса о карбонизации бетона в естественных условиях службы конструкций позволяет сделать следующие основные выводы. Процесс карбонизации бетона зависит от его влажностного состояния, т. е. от условий эксплуатации конструкций. Карбонизация практически прекращается при относительной влажности воздуха ниже 45% и близкой к 100%. Внутри помещений карбонизация идет быстрее, чем снаружи, а при непосредственном периодическом увлажнении бетона осадками она еще более замедляется. Скорость проникания процесса карбонизации в глубь бетона при прочих равных условиях определяется степенью его плотности. Поэтому четко обнаруживается влияние на этот процесс водоцементного отношения (а через него и прочности бетона). При $V/C < 0,45$ и хорошем уплотнении бетонной смеси получают практически некарбонизирующиеся бетоны.

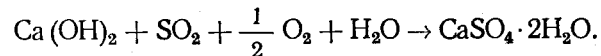
В связи с весьма существенным влиянием на структуру и проницаемость бетона режимов твердения оказывается, что при воздушном твердении и пропаривании получают легкокарбонизирующиеся бетоны в отличие от твердеющих в воде и влажном воздухе.

Данные о влиянии вида цемента противоречивы, однако большая часть их свидетельствует о более быстрой карбонизации бетонов на шлакопортландцементе по сравнению с бетонами на портландцементе. Карбонизация идет тем быстрее, чем больше шлака содержит цемент. Распространение процесса карбонизации внутрь бетона постепенно замедляется, по-видимому, вследствие происходящего при этом уплотнения его структуры. При выдержке на воздухе глубина карбонизации пропорциональна корню квадратному из возраста бетона в годах. Карбонизация бетона ускоряется при использовании пористых легких заполнителей.

Одним из наиболее распространенных, после углекислоты, кислых газов является сернистый газ, который

содержится в атмосфере городов и многих промышленных предприятий. Принципиально его действие на бетон ничем не отличается от действия CO_2 .

Продукты гидратации клинкера термодинамически не устойчивы к действию сернистого газа [19], причем наименее устойчив гидрат окиси кальция. Продуктом реакции является обычно двухводный гипс



Как известно, образование гипса сопровождается увеличением объема твердой фазы. Первоначально гипс, заполняя поры, уплотняет структуру бетона и вызывает некоторое увеличение прочности на сжатие. Затем под давлением растущих кристаллов гипса структура бетона разрушается, что наблюдается в виде шелушения его поверхности.

Взаимодействие SO_2 с плотным бетоном характеризуется наличием «фронта» продвижения зоны сульфатации от поверхности в глубь бетона, который можно обнаружить, как и при карбонизации, качественной реакцией индикатора — фенолфталеина или химическим анализом. Скорость сульфатации зависит от концентрации SO_2 , влажности воздуха, плотности бетона.

Действие хлористого водорода несколько отлично, вследствие того что с гидратом окиси кальция он образует аморфный гигроскопичный хлористый кальций. Происходит ярковыраженное послойное разрушение бетона.

За последние годы отмечено несколько случаев разрушения железобетонных дымовых и вентиляционных труб [138] под действием влажных кислых газов. Известен случай [84], когда в 120-й трубе магниевого завода при вполне удовлетворительной прочности и плотности бетона (водопоглощение за 7 суток было около 5%) арматура почти повсеместно корродировала, что привело к отслаиванию и обрушению крупных участков защитного слоя бетона толщиной 8—12 см. Внешний вид трубы после 8 лет эксплуатации показан на рис. 12.

Выбрасываемые газы через неплотности футеровки и из окружающей атмосферы проникают в бетон. При температуре 30—50°C газы содержат 0,017% SO_2 и 1,54% HCl . Содержание хлористого кальция в бетоне составляло от 0,56 до 1,84%, рН водной вытяжки — от 10,8 до 9,7. Интенсивному развитию коррозии армату-

ры могло способствовать то обстоятельство, что в момент бетонирования на ней был слой ржавчины, насыщенной адсорбированными газами, поскольку хранили и заготавливали арматуру на территории действующего завода.



Рис. 12. Железобетонная труба с разрушившимся защитным слоем

В нашей работе [15] проверялось действие различных агрессивных к металлу и отчасти к бетону газовых сред на призматические образцы 5×5×15 см из бетонов различной плотности с помещенными в них арматурными стержнями. Бетон готовили на речном песке и известняковом щебне с расходом Белгородского портландцемента 250, 350 и 500 кг на 1 м³ бетона (водоцементное отношение соответственно 0,736, 0,55 и 0,38). Толщина защитного слоя была 15 мм.

После трехмесячного нормального хранения образцы были установлены в различных газовых средах: воздушно-сухой (помещение лаборатории); воздушно-влажной (относительная влажность 80% при температуре 30°C с повышенным содержанием углекислоты и кислорода); воздушно-влажной переменной (относительная влажность 100% при температуре от 20 до 70°C); воздушно-влажной с хлористым водородом концентрации 10 и 100 мг/л; то же, с сернистым газом концентрации 100 и 500 мг/л.

Концентрации агрессивных газов создавались в замкнутом объеме над раствором соответствующей лету-

чей кислоты, который меняли 1 раз в месяц. Влажность газовых сред указана в табл. 11.

Образцы периодически осматривали, проверяя глубину нейтрализации бетона путем пробы фенолфталеином на свежем изломе и состояние арматуры. В воздушных средах бетон не претерпевает никаких внешних изменений. Карбонизация бетона развивается тем быстрее, чем меньше его плотность (рис. 13). Как в сухом, так и насыщенном влагой воздухе карбонизация идет медленнее, чем при относительной влажности 80%. Арматура за период испытания не подверглась

коррозии в воздушных средах, кроме среды с переменной температурой и высокой влажностью, где поражение арматуры отмечено в наименее плотном бетоне.

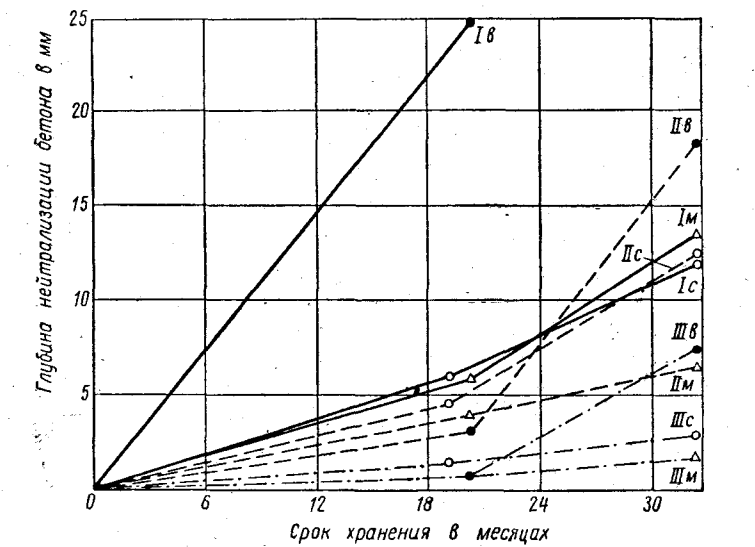


Рис. 13. Нейтрализация бетона в воздушно-влажной среде
I — расход цемента 250 кг/м³; II — 350 кг/м³; III — 500 кг/м³; c — сухая среда ($\varphi < 60\%$); v — влажная ($\varphi = 80\%$); m — мокрая ($\varphi = 100\%$)

Газовая среда с хлористым водородом сильно агрессивна к бетону. Этот газ энергично реагирует с основными компонентами цементного камня, превращая бетон в аморфную массу, которая покрывает образец мокрым слоем (образующийся хлористый кальций гигроскопичен и удерживает выделяющуюся при реакции воду, а также, возможно, отбирает ее из воздуха и бетона).

В силу неоднородности бетона процесс разрушения его от поверхности в глубь образцов идет неравномерно и тем быстрее, чем меньше его плотность. С величиной разрушения прямо связана степень коррозии арматуры, как это видно из табл. 12.

Таблица 12
Состояние образцов после хранения в среде с содержанием хлористого водорода 100 мг/л

Продолжительность хранения в месяцах	Расход цемента в кг/м³	Состояние бетона	Площадь поражения поверхности арматуры в %
10	250	Крошение	4
	350	»	2
	500	»	0
19	250	Полное разрушение	35
	350	Разрушение на 13,5 мм	40
	500	То же, 11 мм	10

Следовательно, процесс коррозии арматуры зависит от состояния бетона и активизируется с увеличением пористости бетона и степени его разрушения. С уменьшением концентрации агрессивного газа скорость разрушения бетона значительно снижается. Например, образцы с расходом портландцемента 250 кг/м³, находившиеся в среде HCl концентрации 10 мг/л, окончательно разрушились через 31 месяц испытаний, в то время как при концентрации 100 мг/л аналогичные образцы превратились в аморфную массу уже через 19 месяцев.

Интересен факт более интенсивного развития коррозии арматуры при меньшей концентрации HCl. По-видимому, это связано с равновесной влажностью воздуха, которая резко падает с увеличением концентрации хлористого водорода и при содержании его 100 мг/л составляет всего 21%. При этом, очевидно,

образующийся на поверхности бетона хлористый кальций оттягивает влагу из внутренних неразрушенных слоев, временно улучшая условия сохранности арматуры.

Действие SO_2 на бетон и арматуру значительно отличается от действия HCl . В течение первых 9 месяцев испытания идет непрерывное повышение динамического модуля упругости и только к 10-му месяцу наступают некоторые его снижение. Вес образцов систематически увеличивается в течение 20—24 месяцев, затем падает. Чем резче, чем выше концентрация SO_2 . Глубина нейтрализации бетона одинаковой плотности значительно меньше, чем при действии хлористого водорода (рис. 14).

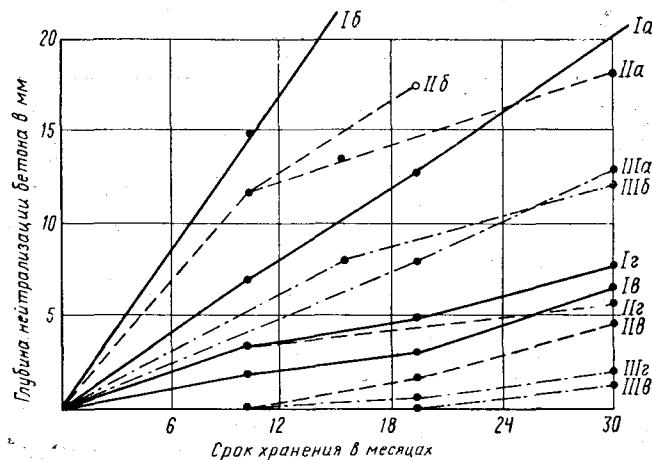


Рис. 14. Нейтрализация бетона в газовой среде

а — 10 мг/л HCl ; б — 100 мг/л HCl ; в — 100 мг/л SO_2 ; г — 500 мг/л SO_2 ; I, II, III — см. подпись к рис. 13

Как и в случае с хлористым водородом, повышение концентрации SO_2 от 100 до 500 мг/л приводит к увеличению глубины диффузии газа (рис. 14) и усилению коррозионного процесса арматуры. При одинаковой концентрации HCl и SO_2 (100 мг/л) более агрессивное действие оказывает первый.

Результаты экспериментов позволяют сделать следующие выводы.

В зависимости от характера агрессивности среды

процесс коррозии арматуры в бетоне проходит по-разному. Воздушная среда с обычным составом газов при достаточно плотном бетоне вызывает постепенную карбонизацию бетона, которая не сопровождается его разрушением, однако приводит к потере щелочности и при достаточной влажности воздуха арматура начинает корродировать. Периодическое увлажнение ускоряет процесс коррозии арматуры в бетоне.

Образующиеся в результате поглощения бетоном сернистого газа кристаллы гипса оказывают разрушающее действие на структуру бетона, хотя первоначально уплотняют и упрочняют ее. Нейтрализация сернистым газом гидроокиси кальция, содержащейся в бетоне, лишает его защитных свойств, и арматура при достаточной влажности воздуха начинает корродировать. Действие сернистого газа на бетон при равновесной (высокой) влажности воздуха сравнительно медленное. По-видимому, как и для углекислого газа, существует оптимальная влажность воздуха, при которой процесс взаимодействия газа с бетоном идет наиболее быстро.

Хлористый водород интенсивно разрушает бетон, образуя с гидроокисью кальция хлористый кальций. Разрушение идет с поверхности. При этом, как и при действии других кислых газов, наблюдается четкая граница между разрушенным и здоровым бетоном. Образующийся хлористый кальций вызывает интенсивную коррозию арматуры. Очаги коррозии возникают первоначально в местах полного разрушения защитного слоя, приуроченных к местным неплотностям бетона.

В условиях, способствующих возникновению и развитию коррозии арматуры, важна плотность бетона. Увеличив плотность бетона, можно существенно повысить его стойкость в агрессивной среде и соответственно обеспечить длительную сохранность арматуры железобетонных конструкций.

Из числа природных атмосферных факторов, отрицательно влияющих на состояние арматуры в бетоне, весьма существенным является влажный насыщенный слои воздуха морских побережий. В работе Леви и Копенгагена [187] это явление изучалось экспериментально. Кривые на рис. 15 показывают, что потенциал поверхности арматуры разлагается по мере уменьшения содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и увеличения concentra-

ии соли в бетоне образца, находившегося в морской воде.

В работе приводятся следующие рекомендации по защите арматуры от коррозии при воздействии соленых туманов на конструкцию:

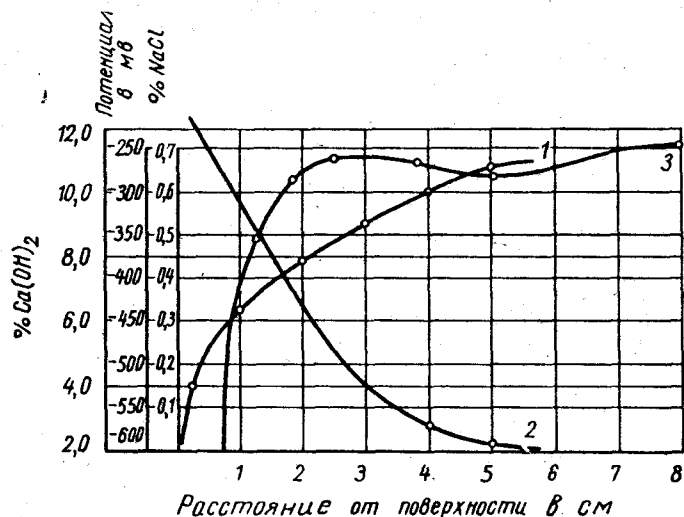


Рис. 15. Кривые изменения содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 1, соли 2, потенциала стали 3 в бетоне по мере удаления от поверхности. Сталь корродировала лишь в местах, соответствующих первым трем точкам слева на кривой 3

а) проектирование возможно более плотных составов бетона с минимальной проницаемостью;

б) уменьшение проницаемости бетона при помощи добавок;

в) изоляция поверхности железобетонных конструкций.

В другой статье [211] при проектировании сооружений рекомендуется располагать их так, чтобы избежать прямого воздействия преобладающих морских ветров или туманов. Со стороны, подвергающейся таким воздействиям, рекомендуется увеличивать защитный слой бетона у арматуры (как минимум до 2—3 дюймов). Раскрытие трещин должно быть минимальным. В конструкциях, где арматура необязательна, например в балюстрадах, ставить ее не следует.

Перечисляется также ряд требований к заполнителям, арматуре, воде затворения, составу бетона, технологии укладки и режиму твердения. В качестве дополнительных мер защиты рекомендуется поверхностная гидроизоляция конструкций жировыми или битумными эмульсиями, силиконами или силикатными красками.

Представляют интерес некоторые случаи коррозионных повреждений железобетонных мостов, расположенных в приморской зоне, под действием влажного соленого воздуха или брызг морской воды.

Зинон [227], описывая состояние трехпролетного арочного моста, расположенного в 200 м от берега моря, отмечает, что наибольшая степень коррозии арматуры обнаружена в растянутых элементах, а также в элементах, расположенных со стороны моря. Мост был построен из бетона с расходом 360 кг/м^3 цемента марки 500. Ремонт выполнен путем нанесения 4-см слоя торкрета после очистки арматуры от ржавчины.

В однопролетном арочном мосту, построенном на морском побережье при расходе 320 кг/м^3 портландцемента марки 500, продольные трещины, образовавшиеся вследствие коррозии арматуры в растянутой зоне бетона, наблюдались уже через 8 лет.

В лабораторных экспериментах было установлено, что при периодическом увлажнении искусственной морской водой изогнутых балочек арматура корродировала более интенсивно в растянутой зоне бетона. На разных расстояниях от берега были установлены опытные балки сечением $10 \times 15 \text{ см}$, симметрично армированные 4 стержнями диаметром 10 мм с хомутами диаметром 6 мм. Через 10 лет балки имели характерные повреждения (табл. 13), связанные с разным насыщением бетона хлоридами в зависимости от расстояния от моря.

В Сицилии на опорах ЛЭП через несколько лет эксплуатации наблюдались микротрещины: у опор, расположенных в 600 м от моря, — со стороны, обращенной к морю, а у опор вдали от моря — с северной стороны. Установлена разность потенциалов между стержнями, расположенными на противоположных сторонах конструкции.

Стретфул [230] исследовал причины интенсивной коррозии арматуры железобетонного моста Сан-Матео в Калифорнии, построенного в 1928—1929 гг. вблизи моря и частично над ним. Уже через 7 лет был произведен ремонт торкретированием. Бетон был изготовлен с небольшим содержанием портландцемента при сравнительно

Таблица 13

Коррозионные повреждения железобетонных балок

Расстояние от моря в м	Ширина трещин в мм	Диаметр ар- матуры в мм		Содержание хлор-ионов в %	Толщина за- щитного слоя в мм	Зона расположения тре- щин
		рабо- чей	хому- тов			
50—100	6,3	6,7	2,5	0,2	18	Растянутая и сжатая
100—200	5,2	7,6	3,1	0,14	21	То же
200—300	4	8	4	0,11	20	Растянутая
300—400	2,8	8,1	4,7	0,08	21	»
400—500	2	8,5	5	0,07	23	»
600—700	1,5	9,4	5,4	0,05	20	»

высоком водоцементном отношении, определившем пористость структуры. Защитный слой по проекту имел толщину 5 см, фактически во многих местах он был тоньше. Растрескивание бетона вдоль корродирующей арматуры особенно часто наблюдалось в балках под проезжей частью, расположенной высоко над уровнем воды.

Измерение потенциалов арматуры показало, что в разрушающихся зонах она была анодной по отношению к стали на неразрушающихся участках конструкции. В анодных зонах соответственно повышенными оказались пористость бетона и содержание в нем хлор-ионов. Разность потенциалов между анодными и катодными участками достигала 450—500 мВ. Омическое сопротивление бетона колебалось от 70 000 в катодных до 20 000 ом/см в анодных зонах, а содержание хлор-ионов — соответственно от 0,05—0,16 до 0,1—0,8%.

Участки с корродирующей арматурой и растрескивающимся защитным слоем бетона совпадают с анодными зонами. Очевидно, что разность потенциалов, возникшая вследствие проникания агрессивных веществ (CO_2 и хлор-ионов) в более пористые участки бетона, явилась причиной усиленной коррозии арматуры. Интересно, что после восстановления разрушенного защитного слоя торкретированием эти участки стали катодными по отношению к неразрушенным.

Анодные зоны арматуры в конструкциях могут возникнуть вследствие относительно большего увлажнения бетона, насыщения его солями или карбонизации. По мнению автора статьи, одним из средств предотвращения

коррозии в таких случаях может явиться катодная защита. При строительстве сооружений в подобных условиях необходимо проектировать увеличенный защитный слой бетона у арматуры и добиваться максимальной плотности бетона.

Деларю, Эспресати и Сибони [162] изучали причины интенсивной коррозии арматуры в бетоне моста вблизи атлантического побережья Северного Марокко. Результаты исследования бетона и потенциалов арматуры показали, что основной причиной коррозии явились макропары с анодными зонами на стали, где бетон более порист и насыщен солями. Соли могут переноситься туманами, которые весьма часты в этом районе.

Мост был построен в 1927—1928 гг. в 500 м от берега моря.

Бетон содержал 900 л гравия, 450 л песка и 400 кг цемента на 1 м³ смеси. Защитный слой имел толщину от 2 до 8 см. Проверка показала (по ASTM C-85-42) содержание цемента в бетоне от 350 до 450 кг/м³. Пористость бетона достигала 19% (средняя 15,6%). Среднее содержание сульфатов 0,04, хлоридов 0,35% веса бетона. Глубина карбонизации от 5 до 15 мм. Прочность бетона на сжатие 225 кг/см².

Результаты измерения потенциалов арматуры и омического сопротивления бетона свидетельствовали о том, что места образования трещин в защитном слое и коррозии арматуры совпадают с анодными зонами арматуры. Разность потенциалов достигала 400 мВ.

В статье, посвященной защите от коррозии арматуры железобетонных конструкций в морской атмосфере, Финлей [170] рекомендует для свай морских сооружений удобоукладываемые бетонные смеси с расходом цемента 420 кг/м³ (для предварительно напряженных 450 кг/м³) и В/Ц не более 0,44. Заполнители следует промывать чистой водой. Бетон необходимо тщательно уплотнять вибраторами и поливать не менее 14 дней. Части конструкций, не увлажняемые морскими волнами или брызгами, можно делать из бетона с расходом цемента 390 кг/м³. Для прекращения процесса коррозии арматуры в существующих сооружениях Финлей рекомендует изоляцию конструкций от проникания воздуха. Это может быть достигнуто сплошным покрытием поверхности бетона воздухонепроницаемой пленкой или же постоянным насыщением его водой. Последнее, разумеется, исключает

ся, если коррозия арматуры уже привела к растрескиванию защитного слоя бетона. Может быть также использована катодная защита конструкций.

§ 5. Влияние окружающей среды на процесс коррозии стали в бетоне

Влажность воздуха, играющая решающую роль в сохранении защитных свойств бетона, оказывает большое влияние и на развитие процесса коррозии арматуры в бетоне, если ее поверхность по той или иной причине перестает быть пассивной. Опыт эксплуатации железобетонных конструкций показывает, что при сухой воздушной среде в карбонизированном бетоне, как правило, коррозия арматуры не развивается. Не бывает обычно коррозии арматуры и в постоянно и полностью насыщенном водой бетоне, даже если это морская вода, содержащая хлориды.

Процесс поглощения бетоном различных веществ может быть обратимым и необратимым (в зависимости от формы их связей с составляющими цементного камня). Вода, например, по П. А. Ребиндеру [102], имеет 4 формы связи: химическую, адсорбционную (физико-химическую), капиллярную и осмотическую. Две последние являются физическими формами связи.

Вода, поглощаемая капиллярно-пористым телом бетона, может иметь в нем все 4 формы связи, причем при обычных температурах (до 100°C) химическая и физико-химическая связи необратимы. Вода связывается химически в процессе гидратации минералов клинкера, которая может длиться многие годы. Химическая связь воды в бетоне разрушается при температурах значительно выше 100°C. Адсорбционные связи воды в бетоне также весьма прочны и в пределах до 100°C не разрушаются.

Практически в сформировавшейся структуре бетона в широких пределах может меняться содержание капиллярной воды, которая в зависимости от парциального давления водяных паров в окружающей среде заполняет поры и капилляры разной величины — от мельчайших пор геля при малой относительной влажности воздуха до капилляров с радиусом $1 \cdot 10^{-5}$ см при высокой влажности. Несвязанная вода, механически заполняющая крупные поры, трещины и пустоты, также может появиться в бетоне, если он будет находиться под гидравлическим давлением либо если в теле бетона образуется

точка росы и происходит конденсация паров воды. Для капилляров с радиусом более $1 \cdot 10^{-5}$ см, которые обычно называют макрокапиллярами, давление насыщенного пара над мениском воды практически равно давлению пара над плоской поверхностью. Такие капилляры заполняются водой только при непосредственном соприкосновении с ней и отдают ее в атмосферу, насыщенную водяными парами.

При полной гидратации вода, не испаряющаяся до температуры 105°C, составляет около 25% веса цемента. Это вода, находящаяся в химической и физико-химической связи с цементным камнем, электролитически не проводящая. Поэтому она не влияет на процессы коррозии стали в бетоне.

Испаряющаяся вода заполняет капиллярные поры и поры геля. В порах геля, по Пауэрсу [209], может содержаться до 15% воды от веса цемента. Эта вода в отличие от воды, заполняющей капиллярные поры, испаряется при более низкой относительной влажности. Например при среднем расчетном диаметре пор геля 25Å вода испаряется только при относительной влажности ниже 65%.

Следовательно, если бетон не соприкасается с водой, капиллярная вода может полностью испариться, но при этом останется вода в порах геля. Ее количество будет зависеть от относительной влажности воздуха и величины пор геля.

Опыты в Управлении по испытанию материалов в Мюнхене [35] показали, что бетон при относительной влажности воздуха 65% содержит испаряющуюся воду в количестве около 15% веса цемента, или, в зависимости от содержания цемента в бетоне, 1—2% веса последнего.

Для стали в бетоне, так же как и для открытого металла, должна быть некоторая критическая влажность, ниже которой пленки влаги на ее поверхности не могут служить электрическим проводником для перемещения зарядов между анодными и катодными участками поверхности и, следовательно, наступит омическое торможение коррозионного процесса.

Практика и эксперименты показывают, что такое критическое значение относительной влажности воздуха находится в пределах 50—60%. На это указывал В. М. Москвин [76]. Наиболее интенсивно развивается

процесс коррозии при повышенной влажности, составляющей около 80%. При этом пленки адсорбционной влаги на поверхности арматуры и в прилегающих порах бетона обладают достаточной ионной проводимостью, и электрохимические реакции коррозии начинают протекать с диффузионным контролем катодного процесса ионизации кислорода. При насыщении бетона влагой диффузия кислорода к катодным участкам сильно замедляется. Поэтому процесс коррозии арматуры практически останавливается при влажности воздуха, близкой к 100%. Последнее справедливо лишь для плотного бетона. В недостаточно плотном бетоне многочисленные крупные сквозные поры не закрываются сорбционной влагой, кислород продолжает свободно поступать к поверхности арматуры, и процесс коррозии не замедляется.

Ю. А. Саввина [111] изучала газопроницаемость плотного бетона нормального твердения, изготовленного при $V/C=0,45$. Опыты, проводившиеся при перепаде давления от 2 до 9 атм, показали, что в самом начале проницаемость примерно на 2 порядка ниже, чем при установившемся потоке газа, когда из макрокапилляров бетона удаляется вся испаряющаяся вода. Коэффициенты фильтрации, определенные для образцов водного и нормального хранения, а также высушенных до постоянного веса при 110°C, относятся как 1 : 2 : 26.

Наши опыты [78] подтвердили данные В. М. Москвина в отношении коррозии арматуры в обычном бетоне. При постоянной температуре 30°C относительная влажность была 60, 80 и 95%. В термогигростатических камерах поддерживалась повышенная концентрация углекислоты и кислорода. Испытывали образцы из обыкновенного бетона нормального твердения; для ускорения испытаний бетон имел повышенную пористость благодаря применению крупного песка (фракция более 0,3 мм). Испытывали также образцы из пенобетона и пеносиликата с объемным весом 800 кг/м³. Толщина защитного слоя равнялась 1 см. Характеристика составов приведена в табл. 14.

Оценку состояния арматуры давали в баллах исходя из площади поверхности, свободной от коррозии; отсутствию коррозии отвечал балл 10, полному ржавлению — балл 0.

Результаты, приведенные на рис. 16, а, показывают, что в обычном бетоне наибольшее развитие коррозии

Таблица 14

Характеристика составов бетона

Материал	Состав бетона в кг/м³					В/Ц
	цемент	из-весть	песок речной	песок молотый	гравий	
Обычный бетон нормального твердения	320	—	1000	—	800	0,62
Пенобетон автоклавный	285	—	—	455	—	0,38
Пеносиликат	—	185	—	555	—	0,4

арматуры наблюдается при относительной влажности воздуха, равной 80%, меньшее — при 95%, самое малое — при 60%. Развитию коррозии в последнем случае, по-видимому, способствовала влажность самого бетона, поскольку до испытания образцы хранились во влажной камере. В ячеистых бетонах (рис. 16, б и в)

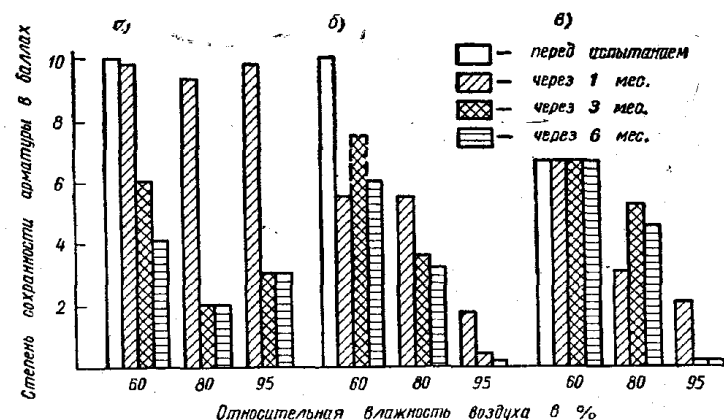


Рис. 16. Сохранность арматуры в зависимости от влажности воздуха (10 баллов — отсутствие коррозии, 0 баллов — 100%-ное поражение поверхности)

а — обычный бетон нормального твердения; б — автоклавный пенобетон; в — автоклавный пеносиликат

коррозия арматуры максимальна при относительной влажности воздуха 95%, меньше — при 80%, а минимальна — при 60%. Такое различие следует объяснить структурой ячеистых бетонов.

Аналогичные данные были получены нами при испытании образцов арматуры в автоклавном силикатном

Таблица 15

Результаты испытания на коррозию арматуры в автоклавном силикатном бетоне

Условия твердения бетона	Условия испытания	Срок испытания в месяцах	Процент коррозии в %	Глубина коррозии в мм	Потеря веса в г
Автоклавная обработка	В камере с относительной влажностью 95%	1	40	—	0,031
		6	100	360	0,3391
		12	100	451	0,4219
То же	В эксикаторе над водой	1	30	28	0,0381
		6	100	268	0,1632
		12	100	250	0,1722
»	В помещении лаборатории	1	3	23	0,0024
		6	13	73	0,0042
		12	13	85	—
Автоклавная обработка с последующей карбонизацией	В камере с относительной влажностью 95%	1	92	26	0,0244
		6	100	195	1,1763
То же	Во влажном цехе	6	100	219	0,3027
		12	100	322	0,4263

бетоне, состоявшем из 6% цемента, 6% извести, 33% молотого и 55% немолотого песка (табл. 15). Наименьшая скорость коррозии — в воздушно-сухих условиях: процесс затухает. Примерно в 80 раз большая скорость коррозии наблюдалась при относительной влажности 95% с повышенным содержанием углекислоты и кислорода. Здесь замедления процесса нет. Примерно такая же скорость коррозии в условиях влажного цеха. При хранении над водой в эксикаторе, исключающем карбонизацию бетона, скорость коррозии вдвое меньше. Наблюдается затухание процесса, по-видимому, за счет недостатка кислорода. Предварительная карбонизация бетона резко усиливает коррозию. Дальнейшее испытание до 1 года показало снижение скорости коррозии почти во всех условиях, что свидетельствует о затухающем характере процесса.

Нами были испытаны также образцы, изготовленные из пеннобетона объемным весом 800 кг/м^3 , состоявшего из 20% цемента, 42% молотой и 38% немолотой золы ТЭЦ при водовяжущем отношении 0,64. Результаты, приведенные в табл. 16, свидетельствуют о резком увеличении скорости коррозии арматуры при высокой (95%) относительной влажности воздуха. Затухания процесса не наблюдается. Даже при низкой относительной влажности (40%) коррозия арматуры в пеннобетоне продолжается.

Таблица 16

Состояние арматуры в автоклавном пеннобетоне

Относительная влажность воздуха в %	Срок испытания в месяцах	Площадь коррозии в %	Глубина коррозии в мм	Потеря веса в г
95	3	97	284	0,381
	12	100	443	1,827
80	3	96	94	0,08
	12	100	84	0,22
60	3	86	94	0,08
	12	85	80	0,154
40	3	60	90	0,083
	12	95	90	0,137
Перед испытанием	0	43	42	0,041

Данные о влиянии климата на коррозию арматуры в бетоне приводит И. А. Александров [2], который обследовал открытые железобетонные конструкции в Баку. Железобетонные колонны ограды из плотного бетона с примерным составом 1:2:4 на новороссийском портоландцементе при толщине защитного слоя бетона у арматуры около 3 см с хорошо оштукатуренной поверхностью спустя 30 лет после постройки имели продольные трещины в защитном слое, а у 40% колонн арматура была обнажена. Аналогичные явления наблюдались в колоннах и арке жилого дома, в водоразборной будке спустя 20 лет после постройки. Сильно разрушенными примерно в 10-летнем возрасте оказались ограда и моторные будки на нефтепромыслах, построенные из недо-

статочного плотного бетона, а также ряд других сооружений.

Автор находит прямую связь коррозии арматуры с карбонизацией бетона, прониканием солей к поверхности арматуры и влажным приморским климатом. Особенно опасным, по его мнению, является периодическое увлажнение конструкций. Рекомендуется в качестве основной меры предупреждения коррозии арматуры добиваться высокой плотности бетона. Железобетонные конструкции из бетона на пористом щебне и с недостаточным расходом цемента должны быть надежно защищены от действия переменной влажности и проникновения газов. Не рекомендуются литые бетонные смеси. Подчеркивается опасность использования для приготовления бетонных смесей засоленных гравия и песка. Предлагается наносить изолирующие покрытия на поверхность железобетонных конструкций и сооружений, используя растворимое стекло, битумные краски, а также уплотнять поверхность бетона флюатированием.

По данным Шалон и Рафаэль [225], с повышением температуры и относительной влажности воздуха коррозия арматуры в цементно-песчаном растворе ускоряется (рис. 17); значение pH, заметно тормозящее коррозию, возрастает с повышением температуры от 40 до 60°C (табл. 17).

Таблица 17

Потери веса в г/м² стальных образцов в растворах Ca(OH)₂ за 1 год

Значение pH	Температура в °C			
	20	30	40	60
9	26,77	43,10	36,59	84,24
10	27,69	45,96	57,88	100,28
11	4,23	2,01	4,96	72,32
12	1,09	0,51	0,62	1,10

Как видно из табл. 18, абсолютная влажность воздуха мало влияет на развитие коррозии стальных образцов под 3-мм слоем цементно-песчаного раствора состава 1:4.

Авторы приходят к следующим выводам:

в теплом влажном климате при понижении pH бето-

Таблица 18

Потери в весе стальных образцов в цементно-песчаном растворе за 90 суток

Абсолютная влажность в мм рт. ст.	Потери веса в г/м ² при относительной влажности			
	95%		55%	
	t = 20°C	t = 30°C	t = 30°C	t = 40°C
17	21±2,4	—	0+0,99	—
30	—	18,2±3,4	—	3,3±1

на у поверхности арматуры вследствие карбонизации до 11,5 создаются условия для коррозии арматуры;

критическая влажность воздуха, выше которой коррозия арматуры заметно развигается, составляет около 70% для температуры 20°C и около 60% для 40°C.

коррозийные потери растут с температурой, особенно при высокой относительной влажности воздуха;

основным фактором, влияющим на развитие коррозии арматуры в трещинах бетона, является относительная влажность воздуха;

во влажных и жарких, а также в приморских районах особое внимание следует обращать на качество бетона, увеличивать толщину защитного слоя и ограничивать расчетное раскрытие трещин.

Приведенные данные показывают, что климат морских побережий, где воздух кроме повышенной влажности содержит соли морской воды, является сильно агрессивной средой для арматуры железобетонных конструкций. Как показывают исследования [107], для незащищенного металла наибольшую опасность представляет зона прибрежья, где соленая вода попадает на конструкции в виде брызг.

Соль может попадать на поверхности конструкций и

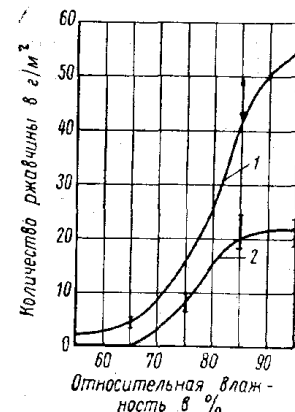


Рис. 17. Влияние относительной влажности и температуры на коррозию стали в бетоне

1 — 40°C; 2 — 20°C

вдали от моря: в виде пыли или растворенной в дождевой воде. Однако, например, на расстоянии около 50 км от берега моря количество попадающей на поверхности соли уменьшается примерно на 2 порядка по сравнению с береговой полосой. К тому же надо учитывать соответствующее снижение влажности воздуха по мере удаления от берега моря.

Основным средством предотвращения коррозии арматуры железобетонных конструкций в приморских районах должно быть повышение плотности бетона; также можно использовать и другие способы защиты конструкций от проникания солей в пористое тело бетона, например плотные лакокрасочные покрытия.

§ 6. Плотность бетона и толщина защитного слоя

Выше было показано влияние плотности бетона на длительность сохранения им защитных свойств по отношению к арматуре. Плотность структуры бетона является главным фактором, определяющим его проницаемость для депассивирующих сталь агентов (кислых газов, ионов хлора и пр.).

Чем менее плотен бетон и чем тоньше его слой у арматуры, тем быстрее он теряет первоначальную способность пассивировать поверхность стали. Очевидно также, что, раз начавшись, процесс коррозии ее будет протекать быстрее в более проницаемом для влаги и кислорода бетоне.

Повышенная проницаемость бетона может быть в известной степени компенсирована увеличенной толщиной защитного слоя. Как было показано выше, например, время распространения в глубь бетона процесса карбонизации пропорционально квадрату толщины его слоя. Сопротивление диффузии кислорода также возрастает с толщиной слоя бетона.

Очевидно, что наиболее желательным путем повышения защитных свойств бетона является снижение его проницаемости, которая определяется структурой, т. е. количеством, размерами и характером строения пор бетона. Выше было показано, что на проницаемость бетона влияет пористость легкого заполнителя. Для тяжелого бетона пористостью крупного заполнителя можно пренебречь. Тогда поры бетона можно разделить на поры цементного камня и поры между заполнителем и цемент-

ным камнем. В свою очередь, цементный камень имеет поры геля диаметром от 10 до 50 Å, практически непроницаемые, и более крупные капилляры диаметром 1—100 мк, которые появляются в результате усадки цементного геля и испарения избыточной воды.

Такого же рода усадочные поры возникают по контактам между цементным камнем и заполнителем, так как каркас из зерен заполнителя мешает равномерной усадке цементного камня. По Ф. Кампю [155], при относительной влажности воздуха 75% величина усадки цементного камня (из теста нормальной густоты) за год на 1 порядок выше усадки бетона с расходом цемента 350 кг/м³ и воды 158 л/м³.

Более крупные поры и неплотности Н. А. Мощанский [83] подразделяет на:

а) неплотности (0,01—0,1 мм) под относительно крупными зернами заполнителя и под арматурой, большей частью открытые, образующиеся в результате внутреннего расслоения раствора (отделения воды);

б) воздушные поры (0,1—5 мм) — результат воздухововлечения при перемешивании и укладке бетонной смеси, а также более мелкие (5—25 мк) при искусственном воздухововлечении или газообразовании, большей частью замкнутые;

в) крупные открытые каверны и пустоты, образующиеся при недостаточном уплотнении жестких и малопластичных смесей.

Поскольку капилляры с радиусом менее 10^{-5} см способны заполняться водой даже при небольшой влажности воздуха [208], проницаемость бетона определяется более крупными капиллярами и сообщающимися макропорами, а поры геля не оказывают на нее влияния.

Относительное распределение разных видов неплотностей в бетоне зависит от гранулометрического состава смеси заполнителей, количества цементного теста, водоцементного отношения, подвижности и способа уплотнения бетонной смеси, используемых добавок, режима твердения и пр.

Значение гранулометрического состава смеси заполнителей для плотности бетона широко известно и учитывается во всех современных способах подбора составов бетона. Для выдерживания заданного гранулометрического состава заполнителей на хорошо организованных стройках и заводах применяется разделение как круп-

Характеристика цементных бетонов повышенной плотности
по Н. А. Мощанскому [85]

Показатели	Усредненные значения для бетона			
	обычного	повышен- ной плотности	высокой плотности	особо плотного
Плотность	0,8	0,8—0,85	0,85—0,9	Больше 0,9
Водоцементное отношение .	0,6	0,6—0,5	0,5—0,4	Меньше 0,4
Средняя вероятная водопо- требность в л/м³	200	180	170	160
Средний вероятный расход цемента в кг/м³	280	320	360	400
Вероятная прочность в кг/см²	200	300	400	500
Марка по фильтрации . . .	Ф-5	Ф-6	Ф-7	Ф-8
Проницаемость в см·сек .	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸
	и более			
Проницаемость в ат	—	2—4	6—8	Больше 8

мость, поскольку образуют замкнутые мелкодисперсные поры.

Режим твердения бетона имеет исключительно важное значение для структуры цементного камня. Наиболее опасно пересушивание бетона в раннем возрасте. При этом вследствие интенсивного испарения воды в наружных слоях бетона образуется сеть крупных открытых капилляров; кроме того, за счет недостаточного связывания воды повышается пористость цементного камня. Жесткие режимы тепловой обработки также увеличивают проницаемость.

Большие исследования структуры цементного камня и бетона выполнены П. П. Ступаченко [117, 118] методами ртутной порометрии и адсорбции. Согласно его данным [117], в цементном камне (независимо от вида цемента) преобладают микро- и переходные поры с радиусом до 1000 Å. Длительное вызревание во влажной среде благоприятствует уплотнению структуры. Так, суммарная пористость цементного камня с $V/C=0,25$, твердевшего 6 месяцев во влажных условиях, уменьшилась по сравнению с пористостью его в 28-суточном возрасте на 35%, макропористость—на 42% и микропористость—на 65%. При твердении же в условиях недостаточной влажности (на воздухе в течение 28 суток) при той же,

ного заполнителя, так и песка на несколько фракций. Этим обеспечивается высокий коэффициент однородности бетона.

Водоцементное отношение является по существу решающим фактором в регулировании пористости бетона. Известно [83], что количество химически связанной воды цементами среднего минералогического состава к трехмесячному сроку достигает около 20%, а к годовому—25% веса цемента. Излишняя вода, вводимая в бетонную смесь для повышения удобоукладываемости, создает пористую структуру цементного камня. Несложный расчет показывает, что пористость цементного камня при водоцементном отношении 0,6 будет 38—43%, а бетон состава 1:2:4 (по весу) с таким V/C будет иметь пористость 11—12,5%. С учетом других видов неплотностей бетона общая пористость его будет несколько выше.

Н. А. Мощанский [85] предлагает для подсчета плотности бетона формулу, учитывающую два основных поробразующих фактора—испарение избыточной воды и вовлечение воздуха:

$$P = 1 - \alpha - 0,001 (B - \beta C),$$

где α —количество воздушных пор (для обычного бетона 0,02, для бетона с воздухововлекающими добавками 0,05);

B и C —расход воды и цемента в кг/м³;

β —количество прочно связываемой воды в долях от расхода цемента (0,1—0,25).

В табл. 19 представлена характеристика бетонов по плотности в возрасте 28 суток, предложенная Н. А. Мощанским.

Приведенные в табл. 19 значения плотности характерны для бетонов из пластичных смесей. Применением жестких и малопластичных смесей при соответствующем средствах уплотнения их можно существенно повысить плотность бетона. Однако при недостаточном уплотнении плотность бетона может оказаться даже ниже вследствие незаполнения межзерновых пустот цементным тестом. Образующаяся структура бетона с открытыми порами наименее благоприятна для сохранности арматуры.

Воздухововлекающие и газообразующие добавки, вводимые в бетон в умеренном количестве, повышают общую его пористость, но не увеличивают проницае-

примерно, общей пористости макропористость увеличилась на 18%.

После пропаривания цементного камня общая пористость возросла на 2,8%, переходная и макропористость — на 6,4%, а объем микропор и мельчайших переходных пор уменьшился на 44%.

При пропаривании бетона с $B/C=0,5$ и $0,6$ общая пористость растворной части увеличилась на 4,3—5,7%, микропористость возросла незначительно, но зато резко, в 1,5—2 раза, увеличились переходная и макропористость.

Интересные исследования структуры и проницаемости цементно-песчаных растворов проведены Ф. М. Ивановым и В. Л. Солнцевой [49]. Прессованием под давлением 400 кг/см^2 были изготовлены образцы, характеристика составов которых приведена в табл. 20.

Таблица 20

Характеристика составов образцов

№ состава	1	2	3	4
Цемент:				
песок (по весу)	1:3,5	1:1,8	1:1,28	1:1
B/C	0,46	0,28	0,23	0,2
Содержание цементного камня в %	37	47	53	58

На рис. 18 видно, что общая пористость определяет ся водоцементным отношением и влажностью среды твердения. По общей пористости состав I резко выделяется, так как в нем объем цементного камня меньше объема пустот в песке. Твердение в воде увеличивает плотность растворов на 10—20%. Рис. 19 иллюстрирует зависимость сквозной пористости (по электропроводности) и газопроницаемости от влажности среды.

Результаты показывают, что существенное снижение проницаемости достигается длительным твердением в среде повышенной влажности. В плотном растворе при $B/C=0,23 \div 0,2$ преобладают поры: при твердении на воздухе — от 0,35 до 0,05 мк, а в воде — менее 0,05 мк. Отмечено существенное увеличение доли тонких пор (менее 0,05 мк) с возрастом при незначительном изменении общей пористости.

По данным Чернина [160], водопроницаемость цементного камня при преждевременном высыхании увеличивается в 70 раз. Это связано с образованием сквозных макрокапилляров.

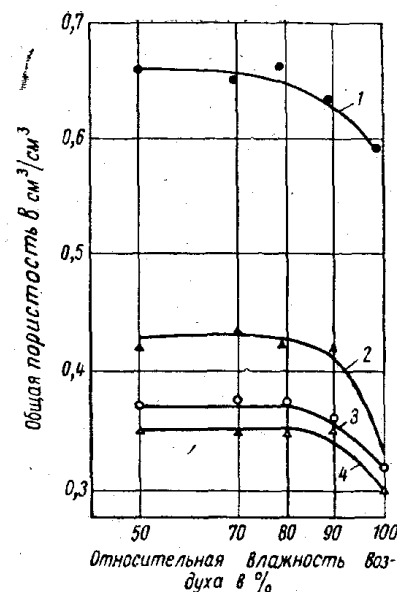


Рис. 18. Общая пористость цементно-песчаных растворов в зависимости от влажности среды твердения (обозначения кривых — по табл. 20)

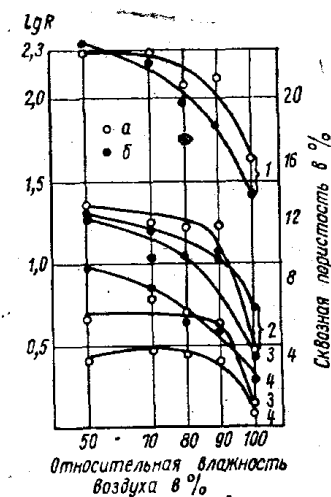


Рис. 19. Зависимость сквозной пористости и газопроницаемости от влажностных условий твердения цементно-песчаных растворов (обозначения кривых — по табл. 20)
а — сквозная пористость; б — газопроницаемость

Влияние структуры бетона и отдельных определяющих ее факторов на защитные свойства бетона по отношению к арматуре изучал ряд исследователей.

Р. Фридланд [171] приводит данные, согласно которым коррозия арматуры резко ускоряется в растворах при расходе цемента ниже 400 кг/м^3 и в бетонах при расходе цемента ниже 235 кг/м^3 . Результаты свидетельствуют о лучших защитных свойствах пластичных растворов смесей по сравнению с жесткими и литыми при ручном уплотнении. В более проницаемых литых растворах отмечено уменьшение площади распространения коррозии с увеличением толщины защитного слоя.

В работе Д. Плетта и др. [205] было установлено, что

жирные и пластичные бетонные смеси обеспечивают лучшую защиту арматуры, чем тощие и жесткие; для защиты арматуры от коррозии достаточен расход цемента 320 кг/м^3 в пластичной бетонной смеси при щебне крупностью от 6 до 10 мм.

В одной из публикаций сообщается [179], что железобетонные баржи постройки 1914—1918 гг. при осмотре в 1939 г. не имели следов коррозии арматуры при толщине защитного слоя не более 12 мм. Бетон характеризовался большим расходом цемента — и низким водоцементным отношением. Утверждается, что если тщательная укладка бетона исключает образование неплотностей под арматурными стержнями (особенно вблизи опалубки), то защитный слой плотного бетона толщиной 25 мм гарантирует от коррозии арматуры в самых неблагоприятных условиях.

В работе Брокера [152] сообщается об опытах с периодическим обрызгиванием образцов раствором поваренной соли. Было установлено заметное ухудшение защитных свойств бетона при повышении водоцементного отношения с 0,4 до 0,6. При аналогичном испытании Леви и Копенгаген [188] получили соответствующее усиление коррозии арматуры с повышением B/C от 0,45 до 0,95.

Наблюдавшееся в обеих работах положительное влияние расхода цемента связано, вероятно, с улучшением удобоукладываемости бетонной смеси, т. е. с улучшением ее уплотнения. При практически полном уплотнении расход цемента не должен влиять на проницаемость бетона.

Данные, приводимые в докладе Т. Ниши [202], показывают, что применение добавок, улучшающих удобоукладываемость бетонных смесей (пластифицирующих и воздухововлекающих), уменьшает газопроницаемость бетона.

В наших опытах по определению влияния на состояние арматуры плотности и толщины защитного слоя бетона испытывались образцы в виде цилиндров и призм с помещенными в них шлифованными стержнями из стали Ст.5, диаметром 8 и длиной 80 мм при толщине защитного слоя 15 и 25 мм. Различная плотность бетона получалась за счет расхода цемента 220, 270 и 320 кг/м^3 при $B/C=0,6$ и постоянной подвижности бетонной смеси. Была определена воздухопроницаемость бетонов на

образцах-плитках размером $10 \times 10 \times 3 \text{ см}$. Полученные коэффициенты проницаемости в ряду бетонов с расходом цемента 320, 270 и 220 кг/м^3 относятся как 0,84 : 1 : 2,7.

Результаты хранения при относительной влажности 80% и температуре 30°C в течение двух лет (табл. 21) показывают, что при толщине защитного слоя 15 мм полную защиту арматуры обеспечил лишь бетон с расходом цемента 320 кг/м^3 . Интересны результаты 32-месячных испытаний образцов (табл. 22) в условиях влажного цеха шелкоотделочной фабрики (относительная влажность 80—95% при температуре 30—35°). Добавка нитрита натрия не оказала защитного действия в недостаточно плотном бетоне. К концу испытания часть образцов имеет трещины в бетоне, вызванные развитием коррозии арматуры.

Таблица 21

Состояние арматуры в бетоне при относительной влажности воздуха 80%

Толщина защитного слоя в мм	Расход цемента в кг/м^3	Коэффициент воздухопроницаемости $\times 10^3$	Площадь коррозии в %	Глубина коррозии в мм	Потеря веса в г
15	220	0,0101	10	360	0,21
15	270	0,0037	1	80	0,0024
15	320	0,0032	0	0	0
25	220	0,0101	0	0	0

Более плотные составы при защитном слое 15 мм и малоплотные составы при защитном слое 25 мм в первые 6 месяцев обеспечили лучшую защиту арматуры, однако к концу испытания во всех образцах арматура имела язвенные поражения, включая бетон с добавкой нитрита натрия.

Нами совместно с Н. К. Розенталем были поставлены опыты, имевшие целью определить влияние плотности и толщины защитного слоя бетона на скорость развития коррозии арматуры. Чтобы процесс коррозии мог начаться сразу по изготовлении образцов, в бетон добавляли хлористый кальций в количестве 5% веса цемента, чем была достигнута депассивация поверхности стали. Характеристика составов бетона на портландцементе марки 400 Воскресенского завода при расходе

Таблица 22

Состояние арматуры и бетона на цементе Воскресенского завода
в атмосфере влажного цеха

Расход цемента на 1 м ³ бетона в кг	Толщина защитного слоя в мм	Срок испытания в месяцах	Площадь коррозии в %	Глубина коррозии в мм	Глубина карбониза- ции в мм	Характер коррозии после 32 месяцев ис- пытания	Наличие трещин
220	15	6 32	5 100	231 360	6—7 Пол- ная	Сплошная, глубо- кая	Продольная трещи- на на одном об- разце
220*	15	6 32	7 100	115 290	— Пол- ная	Сплошная, глубо- кая, разной ин- тенсивности	То же
270	15	6 32	1 60	82 390	— 10	Легкий налет с от- дельными, глубо- кими язвами	Трещин нет
320	15	6 32	0 28	0 290	— 8—10	Легкий налет с язвами	То же
220	25	6 32	0 76	0 480	— Пол- ная	Сплошная, местами глубокая	Косая трещина на одном образце

* Бетон с добавкой 2% нитрита натрия.

воды 180 л/м³ и удобоукладываемости около 35 сек при-
ведена в табл. 23.

Таблица 23

Характеристика составов бетона

В/Ц	Расход цемента в кг/м ³	Состав по весу
0,5	360	1:2,23:2,92
0,6	300	1:2,82:3,53
0,7	257	1:3,43:4,17

В призмы размером 7×7×14 см были забетонирова-
ны шлифованные стержни из арматурной стали марки
Ст.5. После 28-суточного нормального твердения образ-
цы были помещены в термогигростатические камеры, где
хранились при относительной влажности воздуха 80% и
температуре 30°C. Вскрытие образцов по истечении

6 месяцев показало, что степень коррозии стальных
стержней заметно возрастает с увеличением водоцемент-
ного отношения (табл. 24) и падает с повышением тол-
щины защитного слоя (табл. 25).

Таблица 24

Степень коррозии арматуры в зависимости от плотности
бетона при толщине защитного слоя 2 см

В/Ц	Водопо- глощение в %	Глубина кар- бонизации в мм	Коррозионные поражения		
			площадь в %	глубина (наибольшая) в мм	потеря веса в г
0,5	3,92	0—0,5	22	535	0,109
0,6	5,26	0,3—0,5	40	800	0,223
0,7	6,25	0,5—4	46	980	0,485

Таблица 25

Степень коррозии арматуры в зависимости от толщины
защитного слоя (при В/Ц = 0,6)

Толщина защит- ного слоя в см	Коррозионные поражения		
	площадь в %	глубина (наибольшая) в мм	потеря веса в г
1	72	900	0,387
2	53	890	0,355
3	22	700	0,189

Изложенное показывает, что проницаемость защит-
ного слоя, зависящая от его толщины и плотности бето-
на, определяет не только длительность сохранения им
защитных свойств по отношению к арматуре, но и, в слу-
чае возникновения коррозии, интенсивность ее развития.
Последнее подтверждает, что процесс коррозии армату-
ры в плотном бетоне протекает с диффузионным ограни-
чением.

При назначении толщины защитного слоя бетона не-
обходимо учитывать его неоднородность. Вследствие
того что часто условия твердения бетона бывают далеки
от идеально влажных, наружные слои его имеют повы-
шенную сквозную пористость, образующуюся в резуль-
тате преждевременного испарения воды. Поэтому чем
толще защитный слой, тем менее вероятно распростра-
нение сквозных пор до арматуры. Прерыванию сквозных

пор должно способствовать уменьшению крупности заполнителя.

Ф. Кампю [156] считает, что минимальная толщина защитного слоя должна по крайней мере в 1,5 раза превышать размер наибольшей по крупности фракции заполнителя. В отдельных случаях это требование может быть выполнено путем использования для образования защитного слоя специального мелкозернистого бетона.

Анализ приведенных данных позволяет сделать следующие рекомендации, выполнение которых обеспечит высокие защитные свойства бетона по отношению к арматуре железобетонных конструкций:

1) количество цементного теста должно быть достаточным для заполнения всех пустот между зернами заполнителя;

2) цементный камень должен иметь по-возможности малую сквозную пористость, что может быть обеспечено низким водоцементным отношением и достаточно длительным выдерживанием бетона во влажной среде в период твердения;

3) водоцементное отношение должно быть достаточным для получения такой подвижности бетонной смеси, которая позволила бы обеспечить хорошее уплотнение при укладке имеющимся оборудованием;

4) максимальная крупность зерен заполнителя не должна превышать $\frac{2}{3}$ толщины защитного слоя, а последнюю следует принимать по-возможности большей.

§ 7. Вид вяжущего и режим твердения бетона

Обычные бетоны на портландцементе, как уже говорилось, обладают способностью защищать стальную арматуру от коррозии благодаря избытку свободного гидрата окиси кальция, образующегося в процессе гидризации и гидратации минералов клинкера. Однако часто стремятся связать избыток извести либо для получения более коррозионностойкого бетона, либо для повышения его прочности. Некоторые вяжущие сами по себе не могут дать при гидратации избытка извести и в то же время содержат вещества, способные усиливать коррозию стали.

По виду вяжущего различают бетоны [32]:

а) цементные, приготовленные на клинкерных цементах и их производных, на гидравлической извести, а также на шлаковых бесклинкерных цементах;

б) известковые, в частности автоклавного твердения (силикатные), на основе извести в сочетании с силикатными и алюмосиликатными компонентами и заполнителями (например, известково-песчаный, известково-шлаковый, известково-золенный, известково-глинистый);

в) гипсовые, приготовленные на гипсовых вяжущих—строительном и высокопрочном гипсе, ангидритовом цементе, высокообжиговом гипсе.

Часто применяют бетоны на смешанных вяжущих: цементно-известковых, гипсоцементных. Кроме того, имеются специальные виды вяжущих для получения, например, кислотоупорного, жаростойкого и других бетонов.

В настоящее время наиболее распространены портландцемент, пуццолановый портландцемент и шлакопортландцемент. Реже применяется глиноземистый цемент.

З. Ш. Караев [58] установил, что в отличие от портландцемента гипсоглиноземистый расширяющийся цемент недостаточно защищает сталь от коррозии в зоне периодического смачивания морской водой и даже в воздушно-сухих условиях. Одновременно со значительным отрицательным потенциалом стали под этим покрытием было обнаружено, что рН водной выдержки из него равна 9, тогда как у тампонажного цемента рН=12,4.

Ц. Г. Гинзбург и О. В. Кунцевич [33] испытывали образцы бетона с расходом цемента 300 кг/м^3 при $B/C = 0,6$ на гипсоглиноземистом расширяющемся цементе с точеными стержнями из арматурной стали. Через 2 месяца была обнаружена коррозия арматуры при хранении образцов во влажных опилках, при периодическом увлажнении и в воде. Осмотр через 6 месяцев показал, что развитие коррозии продолжается. В контрольных образцах на портландцементе коррозии не было.

В наших опытах [79] коррозия арматуры в образцах на этом цементе наблюдалась при всех режимах испытания (табл. 26), тогда как в образцах на портландцементе коррозии не было.

В разное время были высказаны предположения о пониженных защитных свойствах по отношению к арматуре бетонов на пуццолановых портландцементах в результате связывания гидрата окиси кальция активным кремнеземом. Сода и Ямасаки [228] наблюдали несколько более быструю карбонизацию у бетона на пуццолановом портландцементе по сравнению с бетоном на

Таблица 26

Состояние арматуры в бетоне на гипсоглиноземистом цементе

Режим испытания	Интенсивность коррозии в $\text{г/м}^2 \cdot \text{ч}$	Глубина коррозии	Характер поражения
Замораживание и оттаивание — 45 циклов	0,04	180 мк	Равномерное
Увлажнение в пресной воде — 364 цикла	0,029	189 »	»
То же, в морской воде	0,144	До 1 мм	Язвенное
То же, в 5%-ном растворе сульфата натрия	0,004	120 мк	Равномерное

портландцементе. Разница заметно усиливалась при высоком V/C (около 0,9). По-видимому, в обычных условиях защитные свойства бетона на пуццолановом цементе достаточны, а при повышенной агрессивности окружающей среды могут быть ниже, чем у бетона на портландцементе.

Подобные опасения высказывались и в отношении шлакопортландцементов. М. М. Борок [22] изучал коррозию арматуры в бетонах на шлакопортландцементе. В приводимом им обзоре исследований указывается на работы Бурхарца и Бауэра [153], Гари [172], Крюгера [185], давших положительный ответ на вопрос о состоянии арматуры в бетоне на шлакопортландцементе. Работы Гейна и Бауэра привели к отрицательным результатам. Р. Залигер [219] не рекомендовал применение шлакопортландцемента для железобетона.

Позднее опыты в этом направлении были проведены Б. Г. Скрамтаевым [86] и И. Д. Чернявским [115]. Результаты получены противоречивые.

Обследования в 1933—1934 гг. в Днепропетровске позволили установить, что в конструкциях, защищенных от увлажнения, арматура сохраняется при достаточной плотности и толщине защитного слоя бетона. При непосредственном воздействии осадков отмечается коррозия арматуры [22].

М. М. Борок показал, что значение pH фильтрата из цементно-песчаного раствора 1 : 4 для образцов на шлакопортландцементе на 0,6—0,9 ниже, чем на портландцементе. Соответственно на 45% меньше количество связанной воды и на 10% выше пористость цементного

камня. Эти данные находятся в соответствии с теоретическими соображениями, поскольку шлакопортландцемент по сравнению с портландцементом содержит меньше трехкальциевых силиката и алюмината, которые в основном связывают воду при гидратации. Непосредственные испытания арматуры в растворах 1 : 3 и бетонах марок 90 и 110 показали, что бетоны и растворы на шлакопортландцементе при равной плотности уступают в защитной способности бетонам и растворам на портландцементе.

Автор утверждает, что при достаточной плотности (не менее 0,9) бетон на шлакопортландцементе обеспечивает надежную защиту арматуры, и для конструкций, не подвергающихся увлажнению, его можно применять без ограничений. В неблагоприятных условиях необходимо добиваться наибольшей плотности бетона, а в особо ответственных случаях защищать конструкции от увлажнения.

Исследование влияния шлаковых бесклнкерных цементов (цемент Будникова, цемент Орлова) на арматуру проводилось в 1930 г. [86]. В бетоне состава 1 : 2 : 4 и 1 : 2,5 : 5 на цементе, содержащем 90% доменного шлака, после периодического хранения в сухой и влажной средах в течение 8 месяцев коррозии арматуры не наблюдалось. В образцах из чистого цемента и раствора 1 : 3 после 28 суток хранения в тех же условиях на арматуре были пятна ржавчины. В образцах из раствора 1 : 2 и 1 : 4 при $V/C=0,5$ и 0,8, хранившихся на воздухе и в переменных условиях, через 5 месяцев арматура интенсивно корродировала. В плитках из бетона состава 1 : 2 : 4 арматура при защитном слое толщиной 1,5 и 2,5 см покрывалась пятнами ржавчины после хранения в течение 2 недель во влажных опилках и 2 месяцев на воздухе.

Г. В. Пухальский [96] обнаружил интенсивную коррозию арматуры в образцах бетона на цементе Криворожского завода, состоявшем из 85% гранулированного шлака и 15% извести, через 28 суток хранения на открытом воздухе и при периодическом увлажнении. Аналогичная картина наблюдалась в пропаренных образцах. Расход цемента составлял 275 кг/м^3 при $V/C=0,85$; толщина защитного слоя 2—2,4 см. При хранении образцов в воде коррозии арматуры не было, равно как и в бетонах с малыми V/C , уплотненных вибрированием.

Известно, что бетоны на жидком стекле характеризуются повышенной проницаемостью, которая способствует понижению щелочности находящейся в них влаги под действием углекислоты воздуха или вымывания водой. Но и первоначальный уровень щелочности не может быть признан достаточным для надежной пассивации стали. В кислотоупорных бетонах образовавшийся силикатный камень состоит в основном из геля кремнекислоты и остатков щелочных окислов, содержание которых все время закономерно уменьшается, не обеспечивая пассивности стали. Кроме того, способствует депассивации стали образующийся в результате реакции твердения фтористый натрий. Таким образом, состояние стальной арматуры в бетоне на жидком стекле с кремнефтористым натрием не может быть пассивным, и скорость коррозии ее будет зависеть от условий эксплуатации конструкции.

Относительно безопасно, по-видимому, применять армированные сталью конструкции из кислотоупорного бетона в воздушно-сухой среде. Однако в этом случае такие конструкции не имеют преимуществ перед конструкциями из бетона на клинкерных цементах. В более сложных условиях (при повышенной влажности, периодическом увлажнении, действии кислот и агрессивных газов) армированные конструкции из кислотоупорных бетонов должны применяться либо со специально защищенной стальной арматурой, либо с кислотостойкой, в частности стеклопластиковой, что требует экспериментальной проверки и специального расчета конструкции.

Проведенное нами измерение стационарного потенциала арматуры в бетоне одного состава на портландцементе при различных режимах твердения показало, что потенциалы изменяются различно лишь в первые дни [4]. Вначале наиболее положительный потенциал по отношению к водородному электроду имеет арматура в пропаренном и нормального твердения бетоне, а наименее положительный — в автоклавном. К пятым суткам пребывания образцов в 5%-ном растворе KCl потенциалы практически выравниваются, получая значение около — 270 мВ. К 30-суточному возрасту потенциалы достигают значения около 300 мВ, что указывает на вполне достаточную защиту арматуры. Испытания [78] показывают, что при относительной влажности воздуха 80% до 3 месяцев арматура не имеет следов коррозии как в бе-

тоне нормального твердения, так и в автоклавном. К 6 месяцам на арматуре в автоклавном бетоне появляются незначительные коррозионные поражения.

Данных о состоянии арматуры в железобетонных конструкциях, изготовленных при различных режимах твердения, не имеется. Однако, учитывая влияние ускоренных режимов твердения, с одной стороны, на реакции гидратации клинкера и связывание свободного гидрата окиси кальция, а с другой, на структурообразование бетона, можно утверждать, что вероятность возникновения и скорость развития коррозии арматуры как в пропаренном, так и особенно в автоклавном бетоне будет больше, чем при нормальном твердении.

Это подтверждается опытами С. А. Миронова [70], обнаружившего в образцах бетона на портландцементе коррозию арматуры через 1 месяц после запаривания. Через 5 месяцев хранения образцов-близнецов в нормальных условиях отмечен сплошной налет ржавчины с образованием отдельных каверн. При этом в бетоне с добавкой молотого песка (замена $\frac{1}{3}$ цемента) каверны на арматуре наблюдались в значительно большем количестве. В образцах бетона, твердевших в нормальных условиях, через 5 месяцев коррозии арматуры не было. Это указывает на влияние автоклавной обработки, при которой часть извести (особенно значительная при добавке молотого песка) связывается кремнеземом.

Последнее подтверждается данными Х. Х. Корровица [61]. В вытяжке из порошка портландцемента рН оказался равным 12,45, из порошка пропаренного цементного теста — 12,25, а из запаренного раствора 1 : 3 — 11,75. Все эти показатели находятся в зоне значений рН, обеспечивающих пассивацию стали. Однако необходимо учитывать, что при измельчении цементного камня вскрываются очаги непрогидратировавшего материала и рН водной вытяжки будет выше, чем рН водных пленок на поверхности пор в структуре цементного камня и на поверхности арматуры в бетоне. Поэтому, очевидно, автоклавный бетон и обладает пониженными защитными свойствами.

Опытами Ф. М. Иванова [50] показано, что худшие защитные свойства пропаренного бетона по сравнению с бетоном нормального твердения объясняются дефектами структуры, возникающими при тепловой обработке бетона. Последнее подтверждается также меньшей долго-

вечностью и, в частности, пониженной морозостойкостью пропаренных бетонов.

Нами изучалось влияние режимов твердения бетона с расходом цемента 300 кг/м^3 и $B/C=0,6$ на его защитные свойства. При температуре 30°C и относительной влажности воздуха 80% в течение 6 месяцев в образцах, подвергнутых пропариванию и автоклавной обработке, коррозии не было (табл. 28), тем не менее твердение как в автоклаве, так и при пропаривании приводит к снижению защитных свойств бетона: уменьшается содержание свободной окиси кальция и возрастает проницаемость бетона.

Таблица 28

Влияние режимов твердения бетона на его защитные свойства

Режимы твердения бетона	pH водной вытяжки	Содержание свободной CaO в %	Воздухопроницаемость бетона в $\text{кг/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot 10^4$	Потенциал арматуры в мВ	Скорость коррозии в $\text{г/м}^2 \cdot \text{ч}$
Нормальное хранение	11,73	1,6	0,0663	172	0
То же, с последующей карбонизацией	10,15	—	0,0568	578	0,0035
Автоклавная обработка	11,71	0,19	0,11	174	0
То же, с последующей карбонизацией	10,25	0,08	0,088	528	0,0003
Пропаривание	11,28	0,17	0,103	258	0
То же, с последующей карбонизацией	10,38	0,08	0,0758	575	—

Необоснованно жесткие режимы твердения и особенно пересушивание бетона, при котором приостанавливается нормальный процесс гидратации вяжущего и образуется структура с крупной, направленной пористостью, резко ухудшают защитные свойства бетона по отношению к арматуре.

В настоящее время автоклавная обработка обычных цементных бетонов осуществляется редко. В основном она применяется при изготовлении изделий из ячеистых (цементных и бесцементных), а также из известково-песчаных и других бесцементных бетонов. При этом происходит полное или почти полное связывание гидрата окиси кальция с кремнеземом в малорастворимые гидросиликаты кальция, и водородный показатель влаги, со-

державшийся в таком бетоне, резко снижается. Соответственно падает защитная способность бетона по отношению к арматуре. По данным И. Я. Ривлин [105], величина pH силикальцитной массы, равная до запаривания 12,87, после запаривания снизилась до 9,51 при активности массы $16\% \text{ CaO}$ и до 9,21 при $10\% \text{ CaO}$.

Аналогичные данные для силикатных бетонов были получены нами [78]. Водородный показатель водной вытяжки из измельченного бетона оказался равным 10,16. Стационарный потенциал арматуры в этом бетоне имел резко отрицательное значение (448 мВ по отношению к водородному электроду). Арматура интенсивно корродировала. В тех же условиях в образцах силикатного бетона, не подвергавшихся автоклавной обработке и защищенных от карбонизации, коррозии арматуры в течение 6 месяцев не было. Кроме того, что содержащаяся в автоклавных силикатных и ячеистых бетонах влага имеет пониженное значение pH, их структура облегчает миграцию воздуха и влаги.

В прибалтийских республиках СССР широкое применение находит вяжущее на основе золы от сжигания пылевидных сланцев, так называемый кукермит. О. А. Маддисон [68] приводит данные о состоянии арматуры и значениях pH в сланцезольных вяжущих и бетонах. Отмечается незначительное ($0,15\text{—}0,2\%$) содержание в сланцевой золе сульфидной серы. Однако в толстом слое ржавчины, образовавшемся на арматуре, обнаружены были лишь следы серы. Очевидно, решающую роль играет пониженное значение pH. Добавка цемента повышает pH и обеспечивает защиту арматуры.

По данным Х. Х. Корровица [61], после пропаривания раствора на молотой пылевидной золе величина pH снижается с 12,37 до 10,5, а после запаривания — до 8,73, тогда как в растворе на портландцементе соответствующие значения pH равны 12,45; 12,25 и 11,75.

Весьма интенсивна коррозия арматуры в сланцезольном бетоне, особенно ячеистом. По данным М. С. Сатина, покрытие цеха с сухим режимом пришло в негодность в течение 1 года из-за коррозии арматуры пенобетонных плит на сланцевом вяжущем. Влажность пенозолобетона находилась в пределах $7\text{—}9,8\%$, толщина защитного слоя — $1,8\text{—}2,5 \text{ см}$. Однако, по-видимому, при укладке плиты имели более высокую влажность. Одной из вероятных причин коррозионной активности

материала является наличие в сланцевой золе хлористых соединений. Значительной коррозионной активностью отличаются также бетоны, содержащие золу от пылевидного сжигания углей. Во всех перечисленных случаях необходимо либо применять армированные изделия из таких бетонов только в сухих условиях, либо принимать специальные меры для защиты арматуры.

* *
*

Вид вяжущего и режим твердения оказывают существенное влияние на защитные свойства бетона.

Цементы на основе клинкера (портландцемент, пуццолановый портландцемент, шлакопортландцемент) обеспечивают щелочность межфазной жидкости в бетоне, достаточную для пассивирования стали. Однако бетоны на последних двух цементах быстрее карбонизируются и раньше, чем бетон на портландцементе, теряют способность пассивировать арматуру.

Сульфатированные безусадочные и расширяющиеся цементы в бетоне вследствие пониженного значения pH поровой жидкости и большого содержания сульфатных ионов не пассивируют поверхность стали и поэтому не обеспечивают надежной защиты арматуры от коррозии.

Шлаковые бесклинкерные и малоклинкерные вяжущие не обладают способностью пассивировать сталь. В бетонах на этих цементах состояние арматуры зависит от влажности среды. В бетонах с заполнителем из гранулированного шлака сохранность арматуры зависит от плотности структуры, обеспечиваемой соответствующим расходом цемента и песка.

Кислотоупорные бетоны на жидком стекле с кремнефтористым натрием не обеспечивают пассивности стали. Арматура в этих бетонах обнаруживает следы коррозии даже в воздушно-сухих условиях, а при повышенной влажности и периодическом увлажнении интенсивно корродирует.

Ускоренное твердение бетона при тепловой обработке способствует более полному связыванию гидрата окиси кальция и понижению pH поровой жидкости в бетоне, что ухудшает его защитные свойства. Особенно заметно это при запаривании в автоклаве бетонов на силикатном вяжущем из извести с молотым песком, золой или шлаком. Кроме того, тепловая обработка способствует образованию сквозной пористости в бетоне, т. е. понижает

его способность противостоять действию агрессивных агентов окружающей среды.

§ 8. Добавки, вводимые в бетонную смесь

В современной технологии бетона широко используются различные добавки, вводимые в бетонную смесь. Наибольшее применение получил хлористый кальций в качестве ускорителя твердения, который, кроме того, пластифицирует бетонную смесь и позволяет несколько увеличить плотность бетона. Однако давно замечено, что хлористый кальций способствует возникновению и развитию коррозии арматуры в бетоне.

Многочисленные экспериментальные данные о коррозии арматуры в бетоне с добавкой CaCl_2 противоречивы. По-видимому, не всегда учитывались такие важные факторы, как плотность и толщина защитного слоя, а также состав вяжущего и режим влажности бетона.

Большинство исследователей считает, что при достаточно плотном бетоне введение хлористого кальция в количестве до 2% веса цемента не вызывает прогрессирующей коррозии арматуры. Так, В. М. Москвин [75] в образцах из пластичного бетона с расходом цемента 300—310 кг/м³ и $B/C=0,6$ при добавке CaCl_2 до 6% веса цемента не наблюдал коррозии арматуры. Образцы хранились 13 месяцев при периодическом увлажнении.

Г. В. Пухальский [97] отмечает, что первоначальная коррозия арматуры при добавке CaCl_2 возникала даже в плотном бетоне при толщине защитного слоя 6—7 см с битумной изоляцией поверхности образцов. Однако в дальнейшем существенного развития коррозии не было. Бетон с расходом цемента от 200 до 350 кг/м³ и добавкой CaCl_2 до 7% веса цемента твердел в нормальных условиях, пропарочной камере и автоклаве. После автоклавной обработки значительная коррозия арматуры возникла уже при 1%-ном содержании CaCl_2 .

Ньюмен [200] изучал коррозию арматуры из малоуглеродистой стали в бетонах составов 1:1,5:3; 1:2:4; 1:2,5:5 с добавками хлористого кальция в количестве 2% веса цемента. После 6 месяцев периодического увлажнения наблюдалась незначительная коррозия в образцах первых двух составов. При дальнейшем испытании до 1 года развития коррозии не было.

В работе Л. И. Панфиловой и Г. А. Козловой [88] для бетонных образцов были использованы три различ-

ных цемента и CaCl_2 в количестве 3% веса цемента. Расход цемента 300 кг/м^3 при $B/C=0,65$. Хранение образцов на воздухе и в воде в течение 1 месяца вызвало небольшую коррозию, которая к 1 году, как правило, увеличивалась. Двухпроцентная добавка практически не вызвала коррозии арматуры.

Возобновилось изучение влияния хлористого кальция в связи с широким применением предварительно напряженных конструкций.

А. И. Аваков, Г. И. Бердичевский и К. В. Михайлов [1] сообщают, что напряженная проволока из высокоуглеродистой стали в балках из бетона с 2% CaCl_2 в течение 8 месяцев потеряла около 15% временного сопротивления разрыву.

Р. И. Вейц [29] установил, что после 2,5 лет хранения в сухом помещении балки из бетона марки 400 с добавкой 2% CaCl_2 , армированные пружинной проволокой диаметром 2 мм, разрушались от незначительной нагрузки. Диаметр проволок местами уменьшился более чем вдвое.

По сообщению С. А. Дмитриева [42], добавка 2% CaCl_2 не вызвала коррозии высокопрочной проволоки диаметром 5 мм при хранении балок в сухих условиях в течение 1 года.

По данным Р. Эванса [167], площадь поражения коррозией напряженной арматурной проволоки диаметром 3,2 мм в бетоне с хлористым кальцием (2 и 4% веса цемента) увеличивается при хранении образцов в среде влажного пара. За 2 месяца потеря прочности проволоки составила около 10%. Р. Эванс указывает на ряд аварий из-за коррозии арматуры, вызванной добавкой в бетон CaCl_2 , и не рекомендует применять его при пропаривании железобетонных изделий. Отмечается также, что вследствие гигроскопичности хлористого кальция бетон медленно высыхает.

Б. А. Казаровицкая [57] установила, что равновесная влажность шлакопемзобетона возрастает с увеличением количества добавленного хлористого кальция. При добавке 0,4% CaCl_2 веса цемента весовая влажность бетона увеличивается в 1,5 раза по сравнению с влажностью бетона без добавки, а при 1,2% — в 1,8 раза. Повышение гигроскопичности также способствует коррозии арматуры в бетоне с CaCl_2 .

Мы наблюдали интенсивную коррозию арматуры

сборных железобетонных балок междуэтажного перекрытия в жилом здании. Спустя 5 лет с начала строительства на нижней плоскости многих балок были замечены продольные трещины, которые постепенно раскрывались, достигая в ширину 1—2 мм, а иногда 3—4 мм. В местах образования трещин под защитным слоем бетона толщиной 30—35 мм арматура покрыта слоем ржавчины толщиной до 3—4 мм. Бетон у арматуры пропитан бурой ржавчиной на глубину 2—4 мм. Бетон весьма порист (водопоглощение до 11,5%); содержание хлор-иона 0,5—0,64% веса растворной части, что составляет CaCl_2 3,5—4% веса цемента. Коррозии способствовали увлажнение балок атмосферными осадками (строительство продолжалось 2 года), а также повышенная влажность воздуха в помещении (зимой относительная влажность воздуха достигала 71% при температуре 16°C).

На одном из целлюлозно-бумажных комбинатов в 1955—1956 гг. было построено здание цеха варки целлюлозы. Каркас высотой до 40 м выполнен в монолитном железобетоне. В 1959 г. в ряде элементов рам, балок перекрытий и покрытий появились продольные трещины, в основном на нижней поверхности балок (рис. 20).

Обследование в 1961 г. установило, что, за исключением, конструкции не подвергаются воз-

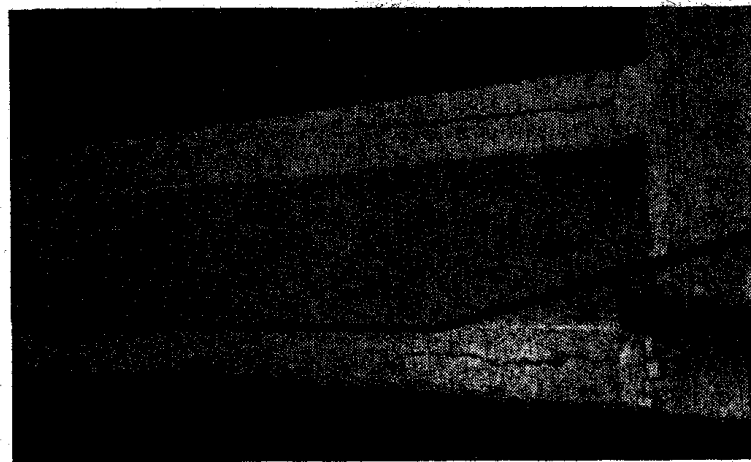


Рис. 20. Широкие трещины в монолитных балках перекрытия, вызванные коррозией арматуры

действию технологических растворов. Воздушная среда цеха сухая (относительная влажность около 40%) и неагрессивная. При вскрытии обнаружен слой ржавчины на рабочей арматуре, достигающий толщины 3—5 мм. Бетон в зоне разрушения отличается малой плотностью и карбонизирован на глубину 10—20 мм. Развитие коррозии арматуры вызвано присутствием в бетоне хлоридов. Среднее содержание хлор-иона 0,81% веса цементно-песчаного раствора при максимальном содержании 1,42% и минимальном 0,23%. Это составляет CaCl_2 соответственно около 6, 10 и 2% веса цемента.

Аналогичные разрушения наблюдались на сборных железобетонных ригелях и колоннах трехэтажного производственного корпуса при сухом режиме помещения и неагрессивной среде. Железобетонные элементы изготавливались на полигоне с пропариванием. В зимнее время допускалось применение хлористого кальция. Спустя 4 года с начала строительства, включая 1 год эксплуатации, в некоторых колоннах и ригелях были обнаружены постепенно раскрывающиеся продольные трещины. В штукатурке нижней поверхности некоторых ригелей можно было видеть по одной-две трещины шириной до 3—4 мм. После удаления штукатурки на поверхности бетона обнаружили трещины, более широко раскрытые и в большем количестве. По-видимому, к моменту оштукатуривания ригелей в бетоне уже имелись трещины, которые продолжали развиваться. Рабочие стержни арматуры в местах трещин покрыты слоем плотной ржавчины толщиной 2—4 мм. В ригелях без трещин арматура практически не имеет следов коррозии. Содержание хлор-иона в растворной части бетона 0,53%, что соответствует содержанию в бетоне CaCl_2 3,5% веса цемента. В сочетании с пропариванием и действием атмосферных осадков в период строительства такая добавка привела к интенсивному развитию коррозии арматуры.

Интересные данные о кинетике коррозии арматуры при добавках хлористого кальция приводит В. Б. Ратнов [100]. Опыты производились с пластинками и стержнями из стали Ст.3, помещаемыми в образцы из раствора 1:3. Раствор уплотняли вибрацией при $B/C=0,5$ и без вибрации при $B/C=0,7$. Толщина защитного слоя составляла 11 мм. Часть образцов твердела в нормальных условиях, остальные пропаривались. Полученные данные

показали резкое возрастание коррозии с увеличением количества CaCl_2 . Коррозия носит местный язвенный характер. Особенно значительная коррозия наблюдалась в пропаренных образцах (рис. 21), что, по-видимому,

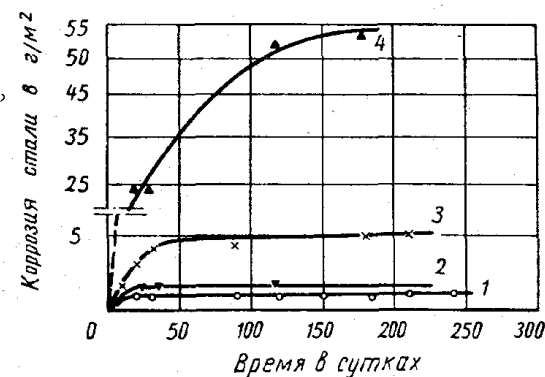


Рис. 21. Кинетика коррозии стали в образцах
1 — непропаренный; 2 — то же, с добавкой 2% CaCl_2 и 1% NaNO_2 ; 3 — то же, с добавкой 2% CaCl_2 ; 4 — пропаренный с добавкой 2% CaCl_2

происходит в результате раскрытия пор и микротрещин в бетоне при тепловой обработке и менее полного связывания свободного хлорида. Развитие коррозии со временем замедляется (рис. 21) и тем скорее, чем меньше хлористого кальция. При 2%-ной добавке без пропаривания коррозия резко замедляется примерно через месяц. Эффективно тормозится коррозия при введении одновременно с 2% хлористого кальция 1% нитрита натрия.

Рейнсдорф [97] испытывал образцы из цементно-песчаного раствора 1:4,5 и 1:2 при B/C соответственно 0,67 и 0,38 с добавкой CaCl_2 до 10% на портландцементе марки 225. Арматурные стержни имели защитный слой 1 и 2 см. Образцы с защитным слоем 2 см хранились до 2 лет в переменном режиме: 1 неделя во влажном песке и 3 недели на воздухе; затем до 5 лет во влажном песке. Образцы с защитным слоем 1 см — до 2 лет во влажной камере, затем во влажном песке.

Отмечается более интенсивная коррозия арматуры в более плотном растворе (1:2), несмотря на лучший гра-

нулометрический состав песка. Это можно объяснить только тем, что абсолютное количество хлористого кальция в составе с расходом цемента 700 кг/м^3 в 1,75 раза больше, чем в составе с расходом цемента 400 кг/м^3 . Автор предлагает определять допустимое содержание CaCl_2 не в процентах от веса вяжущего, а в зависимости от площади поверхности арматуры в 1 м^3 бетона.

При толщине защитного слоя 2 см и малых добавках хлористого кальция трещины в образцах не возникали, процесс коррозии был замедлен. В образцах на шлакопортландцементе коррозия при добавке 5% CaCl_2 была значительно интенсивнее. Поэтому автор считает, что добавка CaCl_2 в бетоны на шлакопортландцементе должна быть исключена, а в бетоны на портландцементе ограничена 1,5% при защитном слое из плотного бетона не менее 2 см.

Ионы хлора в межфазной жидкости бетона, соприкасающейся с арматурой, по Боймелю [150], разрушают пассивирующую пленку на поверхности стали, как правило, в отдельных точках. В результате образуются коррозионные гальванические пары с малым по площади анодом в активированной точке поверхности и значительно большим катодом, представленным поверхностью, оставшейся в пассивном состоянии.

Деятельность активных анодных участков на поверхности арматуры в бетоне с добавкой хлоридов может быть подавлена, если сместить потенциал ее в положительную сторону, т. е. уменьшить разность потенциалов анода и катода. Последнее может быть достигнуто введением добавок-пассиваторов (см. ниже), либо использованием катодной защиты при помощи внешнего источника тока или протекторной защиты путем присоединения протектора из более электроотрицательного сплава (например, на основе магния).

Электрохимические исследования [150] показали, что пассивность железа нарушается, если в насыщенном растворе гидрата окиси кальция содержится 0,0035% хлористого кальция. В бетоне мы имеем дело со значительно более высокими концентрациями CaCl_2 и тем не менее, как видно из цитированных выше источников, зачастую не наблюдаем коррозии стали. Опытами Боймеля и Кэше [234] установлено, что при добавке CaCl_2 в бетон в количестве до 0,9% веса цемента не возникает коррозии стали.

Объясняется такое расхождение тем, что в бетоне значительная часть хлористого кальция связывается с гидратирующимися алюминатами цементного клинкера. Образуются малорастворимые в щелочной среде комплексные соединения типа гидрохлоралюминатов кальция (соль Фриделя) $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, которые уводят частично CaCl_2 из раствора. Опытами Лобри де Бройна [190] показано, что при одинаковой добавке хлорида в высокоалюминатном цементе после твердения обнаруживается значительно меньше свободного хлорида, чем в малоалюминатном. Лобри де Бройн и Тейссинг [191] измеряли потенциалы стали в образцах из портландцемента с различным содержанием CaCl_2 сразу после затворения смеси и через 20—30 суток хранения в атмосфере без углекислого газа. Результаты приведены в табл. 29.

Таблица 29

Потенциалы стали в портландцементном растворе с добавками CaCl_2

CaCl_2 , в % к цементу	Потенциал в мв (по отношению к насыщенному каломельному электроду)	
	начальное значение	конечное значение
0	—210	От —130 до —150
0,5	—300	От —130 до —160
1	—380	От —170 до —190
2	—410	От —330 до —350
4	—460	От —500 до —530
8	—450	От —700 до —750

По мере увеличения количества CaCl_2 значения начального потенциала стали сначала резко, а затем в меньшей степени смещаются в отрицательную сторону. После 3—4 недель хранения в растворах без добавки и с добавкой 0,5 и 1% CaCl_2 потенциал смещается в положительную сторону, что указывает на постепенное уменьшение активности хлор-ионов за счет связывания части их. При добавке 2% CaCl_2 наблюдается лишь малое изменение потенциала, который остается в области промежуточных значений: очевидно, активизирующее и пассивирующее действия более или менее уравниваются. При добавке 4 и 8% CaCl_2 потенциал становится

резко отрицательным, первоначально в результате большой концентрации хлор-ионов, а затем также вследствие образования макрогальванических пар между активными и пассивными участками поверхности стали. При работе этих пар снижается содержание кислорода в слоях раствора, прилегающих к поверхности стали.

Опыты [192] показали, что в цементе с содержанием C_3A 8—10% активность ионов хлора в процессе твердения быстро падает. При отсутствии C_3A , наоборот, активность хлор-ионов возрастает в результате связывания воды в процессе схватывания. Наличие в цементе сульфатов также тормозит связывание ионов хлора, так как в первую очередь алюминаты расходуются на образование гидросульфата алюмината кальция.

В железобетонных конструкциях морских гидротехнических сооружений проникание хлоридов морской воды происходит в затвердевший бетон, когда C_3A уже связан. Использование сульфатостойкого цемента в морских конструкциях по этой причине не противопоказано, хотя для бетона с добавкой $CaCl_2$ этот цемент, конечно, нежелателен. Чем больше содержит цемент алюминатов, способных к гидратации, тем полнее извлекается $CaCl_2$ из раствора и тем меньше вероятность коррозии стали в бетоне на таком цементе. В ранних исследованиях эта особенность цементов не учитывалась, и поэтому часто получались противоречивые оценки влияния хлористого кальция на состояние арматуры. Кроме того, многие исследователи отмечали, что активирующее действие $CaCl_2$ ослаблялось в случае высокой плотности бетона или постоянного насыщения его водой. В этих случаях осуществлялось сильное катодное торможение процесса коррозии.

Однако, как указывает Ф. Гюнтер [40], частицы глинозема не всегда способны к полной гидратации (например, когда они связаны с окисью железа, как в сульфатостойком цементе). Добавка гипса вследствие образования $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4$ также уменьшает, согласно Боймелю и Энгелю [150], содержание способных к гидратации алюминатов.

То обстоятельство, что гидрохлоралюминаты кальция устойчивы лишь в щелочной среде и при снижении pH бетона могут разлагаться с выделением хлор-ионов, заставляет считаться с возможностью возникновения коррозии арматуры в бетоне даже после длительной экс-

плуатации конструкции. В жестких бетонных смесях нельзя рассчитывать на связывание хлоридов и уменьшение их активирующего действия, поскольку может не хватить воды на образование комплексной соли Фриделя.

В настоящее время нет надежных данных о количественной стороне явления. Реакция не идет до конца. Это следует из результатов ряда работ. Робертс [216], определяя свободный $CaCl_2$ в бетоне при различных температурах, установил, что, хотя в основном хлорид реагирует с гидратирующимся цементом при нормальной температуре, какая-то его часть всегда остается в растворе и вызывает ту или иную степень коррозии арматуры. Количество свободного хлорида зависит от состава цемента и возрастает с количеством добавки и повышением температуры твердения (рис. 22). Соответственно (табл. 30) коррозионное поражение арматуры в бетоне на сульфатостойком порландцементе больше, чем на обычном, так же как в пропаренных образцах по сравнению с твердевшими в нормальных условиях.

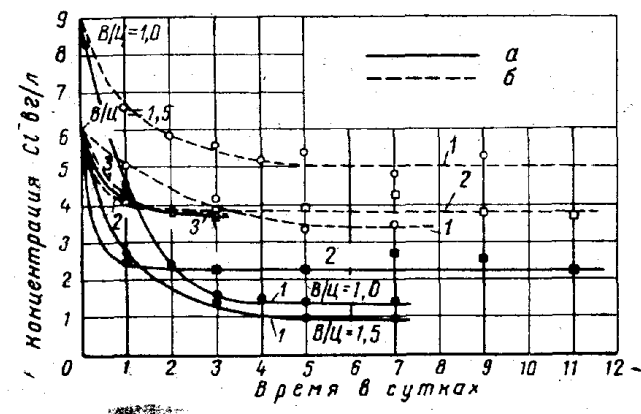


Рис. 22. Связывание хлор-ионов порландцементом
1 — 20°C; 2 — 50°C; 3 — 90°C; а — обычный порландцемент; б — сульфатостойкий порландцемент

Чем больше остается свободных хлор-ионов в жидкой фазе бетона, тем больше опасность коррозии. Относительно связывания хлор-ионов установлено следующее:

1) в бетоне не происходит полного связывания хлорида в нерастворимые соединения. При понижении ще-

Таблица 30

Влияние CaCl_2 на коррозию высокопрочной проволоки диаметром 2 мм в образцах бетона нормального твердения при хранении на открытом воздухе

Цемент	Содержание CaCl_2 , в %	Оценка язвенных поражений после								
		6 мес.			12 мес.			24 мес.		
		а	в	с	а	в	с	а	в	с
Обычный портланд-цемент	0	<25	—	—	25	—	—	25	25	—
	1,4	50	50	—	175	175	1	175	109	1
	3,5	500	375	9	975	725	6	1250	1200	10
Сульфатостойкий портландцемент	1,4	850	575	2	750	700	4	1000	800	7
	3,5	525	475	14	1150	1000	7(1)	1250	1075	9(3)

Примечание. а — максимальная глубина в мм; в — средняя глубина в мм из трех самых глубоких язв; с — среднее количество язв на 1 проволоку из 8, заложенных в каждый образец. В скобках — число обрывов проволок вследствие коррозии.

лочности межфазной жидкости хлорид возвращается в раствор из разлагающихся комплексов;

2) количество свободного хлорида в растворе возрастает с увеличением добавки хлористого кальция;

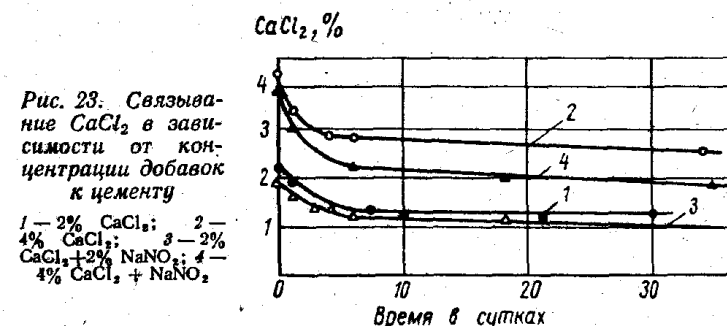
3) количество свободного хлорида в растворе зависит от состава цемента. В растворе останется тем больше хлорида, чем меньше в цементе окислов алюминия и железа, чем выше отношение Fe_2O_3 к Al_2O_3 , чем больше гипса и свободных щелочей (NaOH и KOH);

4) с повышением температуры и длительности прогрева бетона количество связанного хлорида уменьшается.

Степень коррозии арматуры в бетоне не определяется однозначно содержанием хлорида, а зависит также от плотности бетона и однородности его контакта с арматурой. Монфор и Фербек [197] установили, что наличие крупных пор у поверхности арматуры способствует коррозии. По их мнению, следует избегать добавки хлористого кальция в бетон на сульфатостойком портландцементе. По мнению Робертса, в плотном бетоне малые добавки хлористого кальция могут быть использованы даже при тепловой обработке.

В. Б. Ратинов [101] убедительно показал, что при гидратации цементов с добавками (ускорителями твердения) в первую очередь образуются гидросульфалою-

минат и гидросульфалоюферрит кальция. То есть пока не связан почти весь гипс, добавки практически не реагируют с алюминатами. Оказалось, что, будучи добавленным вместе с хлористым кальцием и в таком же количестве, нитрит натрия резко тормозит коррозию, способствуя уводу хлор-ионов в гидрохлоралюминат (рис. 23) и ускоряет твердение. Наоборот, хлор-ионы тормозят связывание нитрита натрия в гидронитриалюминат.



Гюнтер при ускоренных испытаниях термически упрочненной стали обнаружил, что в бетоне с повышенным содержанием хлористого кальция (2,5%) кроме поверхностной коррозии наблюдалось образование коррозионных трещин: в ненапряженной стали — глубиной до 0,1 мм, а в напряженной — до 0,3 мм (с разветвлением). В другой серии опытов напряженные образцы получили коррозионные трещины глубиной до 1 мм, в 70% случаев образующиеся у основания ребер (использовалась сталь периодического профиля St 140/160, с площадью поперечного сечения 35 мм²). На основании полученных данных Гюнтер рекомендует не только исключить добавку хлоридов в бетон для предварительно напряженных конструкций, но и ограничить их содержание: в цементе 0,05%, в заполнителях 0,01% и в воде затворения 0,01%. По его мнению, химические добавки следует считать непригодными, если за их счет в бетон попадает хлор-иона более 0,002% веса цемента.

В опытах Годфрай [174] наблюдалось корродирующее действие на высокопрочную предварительно напряженную прядевую арматуру добавки 2% CaCl_2 в бетонную смесь с расходом цемента 420 кг/м³ и $B/C=0,44$. При

толщине защитного слоя у арматуры 30 мм через 3 года хранения на крыше пряди корродировали по всей длине, в большей степени снизу. Были поражены как наружные, так и внутренние проволоки. Пряди потеряли около 5% прочности на разрыв и около 60% удлинения.

Рассмотренные данные о стимулирующем коррозию арматуры действии хлористого кальция, используемого в качестве ускорителя твердения бетона, позволяют заключить, что:

1) хлористый кальций в бетоне увеличивает вероятность возникновения и интенсивность развития коррозии арматуры, т. е. является стимулятором коррозии;

2) для предотвращения стимулирующего действия хлористого кальция необходимо ограничивать его количество, добиваясь наибольшей плотности и обеспечивать достаточную толщину защитного слоя бетона;

3) опасность коррозии арматуры при добавке хлористого кальция возрастает при использовании сульфатостойких и сульфатированных цементов, а также при тепловой обработке изделий;

4) нельзя применять хлористый кальций при автоклавной обработке железобетонных изделий;

5) нельзя использовать железобетонные конструкции, изготовленные с добавкой хлористого кальция, в помещениях с повышенной влажностью воздуха и там, где они могут подвергаться частому увлажнению;

6) нельзя добавлять хлористый кальций в бетон для предварительно напряженных железобетонных конструкций с проволоочной арматурой.

Все сказанное выше полностью относится и к таким ускорителям твердения бетона, как хлорное железо, а также соляная кислота, поскольку они сразу переходят в хлористый кальций.

Арбер и Вивинан [149], проверяя действие хлоридов различных металлов (кальция, олова, кобальта, меди, ртути, хрома) на ускорение твердения бетона и состояние арматуры, установили, что арматура не корродирует при добавке в бетон одновременно 2% хлористого кальция и 2% SnCl_2 . По данным Дютрон [58], введение в бетон хлористого олова в количестве 3,14% веса цемента вызвало более интенсивную коррозию арматуры, чем при эквивалентной по количеству хлор-ионов добавке 2% CaCl_2 .

В последние годы сравнительно большое применение

нашел бетон, твердеющий при пониженных и отрицательных температурах, так называемый «холодный». Указанный эффект достигается введением большого количества (до 20% веса цемента) хлористых солей. По вопросу сохранности арматуры в таком бетоне проведено значительное число исследований. Попытки применения холодного бетона для изготовления железобетонных конструкций дали отрицательные результаты. В практике треста Донбассэнергострой наблюдалось растрескивание и откалывание защитного слоя на ребрах балок междуэтажного перекрытия, которые были забетонированы зимой с применением поваренной соли в количестве 10% веса цемента.

Ф. М. Иванов [47] наблюдал интенсивную коррозию арматуры в образцах бетона с добавками NaCl и CaCl_2 в количестве 10—20% воды затворения в условиях периодического увлажнения образцов. В состоянии насыщения водой коррозии не наблюдалось, в воздухе нормальной влажности коррозия развивалась слабо.

Ф. М. Иванов и В. И. Овчаров [48] указывают, что наиболее интенсивно корродирует арматура в бетоне при добавке смеси хлористого натрия и хлористого кальция. За 15 месяцев в условиях капиллярного подсоса влаги глубина язв на арматуре достигла 1—2 мм.

Е. В. Лавринович [65] изучала влияние факторов, замедляющих коррозию арматуры в бетонах с добавкой CaCl_2 до 22% к воде затворения. Образцы из цементно-песчаного раствора хранили 3 месяца на воздухе и периодически поливали. Коррозионные поражения арматуры были тем меньше, чем плотнее и толще защитный слой бетона. Добавленные в недостаточно плотный бетон ингибиторы (алюминат, нитрит, бензоат и фосфат натрия; хромат и бихромат калия; хлористый аммоний) лишь замедляли коррозию, но не прекращали ее.

П. Е. Александров и О. В. Кунцевич [3] своими опытами установили, что упоминаемые некоторыми исследователями условия (использование портландцемента, $V/C=0,4 \div 0,6$, диаметр арматуры не менее 6 мм, толщина защитного слоя 2—3 см, толстостенность и малоармированность конструкций) не гарантируют сохранности арматуры в бетонах с большими добавками хлористых солей.

Образцы готовили из бетона с расходом 320 кг/м³ портландцемента марки 500 при $V/C=0,6$ и 0,545 и осад-

Однако в целом ряде случаев как упомянутые, так и другие добавки можно применять при изготовлении железобетонных конструкций лишь после всесторонней экспериментальной проверки, обязательно включающей изучение их действия на разные виды арматурной стали с учетом условий эксплуатации конструкций.

Близкое отношение к вопросу о влиянии добавок в бетон на коррозию арматуры имеет употребление минерализованной, в частности морской, воды для затворения бетона. Нормы различных стран подходят к этому по-разному. В ГДР для затворения бетона при изготовлении железобетонных конструкций для промышленного строительства [165] разрешается применять любую природную воду, если не используется глиноземистый цемент. В нормах для железных дорог ГДР [148] разрешено применять для этой цели воду, содержащую не более 3% хлористого натрия или магния. В США не запрещается употреблять морскую воду в бетоне, кроме бетона для предварительно напряженных конструкций [180]. В Англии [223] разрешается применять морскую воду для затворения и поливки бетона во всех случаях, когда могут быть допущены высолы на его поверхности.

Строительные нормы и правила [126], а также ГОСТ на гидротехнический бетон [35] разрешают применять для затворения бетонной смеси на портландцементе и поливки бетона морскую воду с содержанием солей не более 2% при бетонировании массивных неармированных конструкций в тех случаях, когда появление выцветов (высолов) на поверхности может быть допущено. Болотные и сточные воды, загрязненные вредными примесями (кислоты, соли, масла и т. д.), имеющие $pH < 7$ и содержащие сульфаты более 2,7 г/л (в расчете на SO_4), нельзя применять для затворения и поливки бетона. По ГОСТу на дорожный бетон [36] для его приготовления и поливки разрешается использовать пригодную для питья воду с общим содержанием солей не более 5 г/л.

Исследованиями Р. Шалон и М. Рафаэль [225] было установлено, что в присутствии солей морской воды в бетоне для торможения коррозии арматуры требуется более высокое значение pH . Для этого pH раствора $Ca(OH)_2$ должно быть равно 11,5 при ограниченном доступе кислорода и 12 при неограниченном, а pH вытяжки из бетона морской водой должно быть соответственно 12,6 и 12,75. В насыщенном растворе $Ca(OH)_2$ с

3% $NaCl$ при интенсивной аэрации не удалось достигнуть пассивности стали путем повышения pH .

По данным тех же авторов, щелочность бетона и раствора, затворенного на воде Средиземного моря, недостаточна для полного торможения коррозии арматуры на воздухе. Аналогичные условия создаются при проникании солей морской воды в затвердевший бетон.

Поэтому авторы рекомендуют вблизи моря изготавливать железобетонные конструкции из особо плотного бетона с утолщенным защитным слоем или же защищать их специальными покрытиями, а морскую воду применять для затворения бетона лишь при сооружении подводной части конструкций, обеспечивая при этом достаточную плотность бетона и толщину защитного слоя.

Очевидно, что вопрос о применении морской воды для затворения бетона должен решаться аналогично вопросу о добавке хлористого кальция в бетон. Учитывая, что хлориды составляют около 90% растворенных в морской воде солей, получается, например, что, затворяя океанской водой, имеющей соленость около 3,5‰, бетон с водоцементным отношением 0,6, мы вводим в него хлоридов, в основном хлористого натрия, около 1,8‰ веса цемента. Воды внутренних морей СССР имеют меньшую соленость (Черного — 1,86‰, Каспийского — 1,29‰). Поэтому с учетом количества хлоридов, фактически вводимых в бетон с водой затворения, следует распространить на нее ограничения, указанные выше для добавки хлористого кальция в бетон железобетонных конструкций и регламентируемые СНиП [129].

Мы уже касались защитного действия на арматуру некоторых добавок ингибиторов (замедлителей) коррозии. Остановимся на этом вопросе несколько подробнее. В технике известны и довольно широко применяются различные ингибиторы — замедлители разрушения металлов в агрессивных средах [95]. Из числа ингибиторов, применяемых для защиты металлов в нейтральных и щелочных средах, наибольшее распространение находят так называемые пассиваторы, образующие на поверхности металла защитные пленки (или способствующие их образованию). Типичными пассиваторами являются фосфаты, силикаты, нитриты, хроматы и некоторые другие соли, широко применяемые для защиты металлов в водных растворах.

При определенной концентрации пассиваторы прак-

тически прекращают процесс коррозии. Однако при малых концентрациях пассиваторы не образуют сплошной защитной пленки, что приводит к сосредоточению коррозии на ограниченных участках с интенсивным развитием ее в глубину. Поэтому пассиваторы называются «опасными замедлителями». Особенно это относится к пассиваторам-окислителям, таким как нитриты, хроматы и др. По И. Л. Розенфельду [106], опасные замедлители действуют преимущественно на анодный процесс. В присутствии 30—50 мг NaNO_2 в 1 л электролита, содержащего 0,03 г NaCl и 0,07 г Na_2SO_4 , глубина коррозии стальных образцов в 3—4 раза больше, чем в том же электролите без NaNO_2 .

Вводить пассиваторы в состав бетона или обрабатывать ими арматуру пытались многие исследователи. Некоторые работы уже упоминались. В наших опытах [77] показана эффективность введения нитрита натрия (2% веса цемента) в обычный, ячеистый и силикатный бетоны даже при условии службы конструкций в средах повышенной агрессивности.

Леви [186] сообщает, что добавка бензоата натрия в количестве 2% воды затворения применялась при бетонировании колонн ректификационной башни газового завода. Арматура после 5 лет оказалась в отличном состоянии. При такой добавке 28-суточная прочность бетона понижается на 14,5%. Влияние бензоата натрия на сроки схватывания смеси и усадку бетона не обнаружено.

Нами были испытаны различные пассиваторы [78] как путем предварительной обработки ими поверхности арматуры, так и при введении их в бетоны с водой затворения. Испытание проводилось на шлифованных стержнях из арматурной стали марки Ст.3, окруженных 1-см слоем трамбованной цементно-песчаной смеси состава 1:3,5 жесткой консистенции. Пористая структура раствора и жесткие условия испытания при относительной влажности воздуха 80% с повышенным содержанием углекислоты и кислорода привели к быстрому развитию коррозии стали в контрольных образцах без добавок. Результаты испытаний показаны на рис. 24. Полную защиту арматуры обеспечили 2%-ные (от веса цемента) добавки нитритов натрия и бария. Обработка поверхности стальных образцов в течение 10 мин в горячем водном растворе соды (5%) и бихромата калия (1,5%)

способствовала полной защите арматуры лишь в течение 6 недель.

В. К. Райдна [99] установил, что нитрит натрия, добавленный в известково-песчаный бетон и пеносиликат в

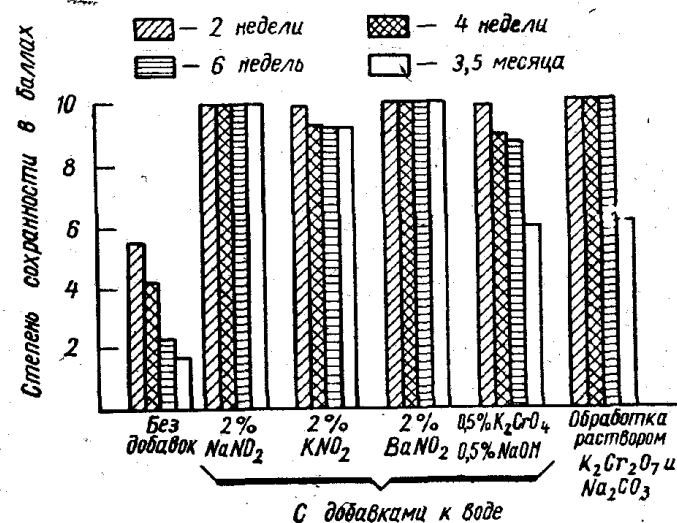


Рис. 24. Влияние пассивирования арматуры на сохранность ее в бетоне

количестве 0,5% воды затворения, предотвращает коррозию арматуры в воздушно-сухих условиях и замедляет ее при влажном или переменном режиме (рис. 25).

Х. Х. Корровиц [61] отмечает, что первоначальный эффект добавки 2% NaNO_2 к пылевидной сланцевой золе в сланцевом бетоне примерно такой же, как и при замене 50% золы портландцементом. Однако в дальнейшем коррозия стали в образцах с NaNO_2 продолжает медленно развиваться, тогда как в образцах с добавкой цемента затухает полностью. Е. С. Силаенков [113], проводя опыты с шлакопесчаными автоклавными бетонами, не обнаружил защитного действия на арматуру 2%-ной добавки NaNO_2 .

В работе О. И. Довжик, С. Г. Енишерловой и В. Б. Ратинова [45] сообщается о пятилетних атмосферных испытаниях образцов, армированных напряженной

высокопрочной проволокой, изготовленных из плотного бетона ($B/C=0,4$) с добавками $CaCl_2$ и $NaNO_2$.

Испытания показали, что в бетоне с добавкой $CaCl_2$ 2% веса цемента глубина коррозионных язв на арматуре достигла за 5 лет 0,65—1,3 мм, а разрывное усилие

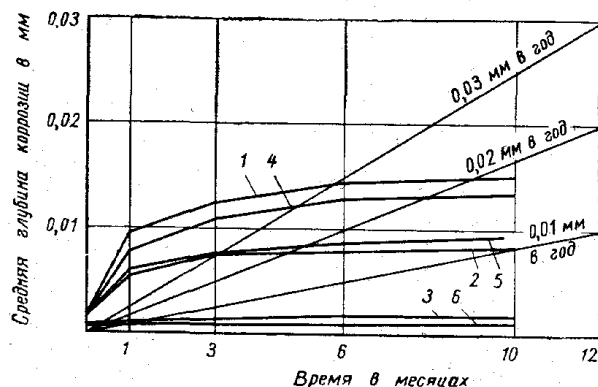


Рис. 25. Развитие коррозии арматуры в силикатных материалах в воздушно-сухих условиях

1 — литой силикат; 2 — пеносиликат на гашеной извести; 3 — литой силикат с $NaNO_2$; 4 — вибрированный силикат; 5 — пеносиликат на негашеной извести; 6 — то же, с $NaNO_2$.

упало с 1260 до 1000—635 кг на одну проволоку. При одновременном введении в бетонную смесь 2% нитрита натрия арматура полностью сохранилась и не снизила сопротивления разрыву, так же как и в контрольном составе бетона без добавок.

Анализ бетона показали, что за 5 лет содержание добавленных веществ в бетоне уменьшилось в отдельных случаях на 40%. Из оставшегося хлористого кальция 80% перешло в твердую фазу. Нитрит натрия оставался в основном в жидкой фазе (82%) и продолжал пассивировать сталь. Авторы считают, что нитрит натрия является безопасным замедлителем, и снижение его концентрации в бетоне не должно стимулировать коррозию арматуры.

Наши испытания образцов из ячеистых и автоклавных силикатных бетонов с добавками $NaNO_2$ показали, что их действие сохраняется в течение 1 года в среде с относительной влажностью 80%. При периодическом ув-

лаживании образцов путем ежесуточного погружения на 1 ч в пресную воду защитное действие добавки оказалось недостаточным (табл. 32).

Таблица 32

Состояние арматуры в автоклавных бетонах в условиях периодического увлажнения (на балансирующей установке)

Бетон	Характеристика бетона	Срок осмотра в месяцах	Площадь коррозии в %	Глубина коррозии в мм	Потери веса в %
Пеносиликат	Расход извести 175 кг/м ³ , объемный вес 800 кг/м ³	6 12	35 96	185 200	0,2274 0,2525
"	Состав тот же, но с добавкой нитрита натрия	6 12	10 80	56 88	0,0607 0,0867
Тяжелый силикат	Цемент 6%, известь 6%, песок молотый 33%, немолотый 55%	6 12	100 100	143 170	0,2321 0,2863
То же	Состав тот же, но с добавкой нитрита натрия	6 12	15 100	43 103	0,007 0,1199

Из таблицы следует, что введение замедлителей в состав бетонной смеси, как правило, сокращает площадь распространения коррозии по поверхности арматуры, уменьшает глубину поражений и весовые потери металла, однако замедляющее действие добавки нитрита натрия в этих условиях нельзя считать удовлетворительным.

Результаты дальнейших опытов с добавкой $NaNO_2$ в силикатный бетон свидетельствуют о малой эффективности этого способа защиты арматуры в данных условиях. Бетон состоял из 6% извести, 6% цемента, 33% молотого и 55% немолотого песка. К 32 месяцам хранения во влажном цехе на отдельных образцах появились характерные, ориентированные вдоль арматурных стержней трещины (рис. 26). Им соответствует сплошная коррозия арматуры, толстый слой ржавчины и язвы глубиной 400—500 мк. Нитрит натрия, введенный в смесь в количестве 2% веса вяжущего (извести и цемента), не только не оказал защитного действия, но и вызвал появление более глубоких язв.

В камере с относительной влажностью 95% в течение

первых 6 месяцев наблюдалось резкое замедление коррозии в образцах с нитритом натрия, но по истечении года замедляющий эффект добавки совершенно исчез.

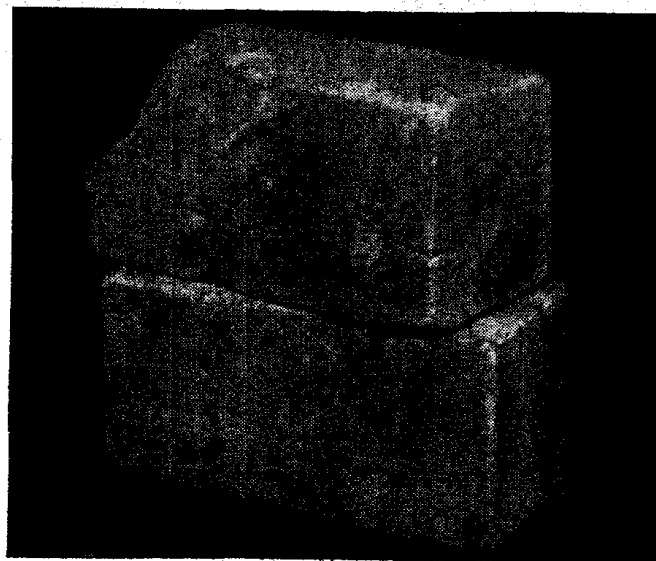


Рис. 26. Трещины в образцах из автоклавного силикатного бетона, образовавшиеся вследствие коррозии арматуры

В предварительно карбонизированном бетоне с нитритом натрия возникла очень интенсивная коррозия арматуры, сосредоточенная на небольшой площади. Это испытание, подтвердив в общем значительное тормозящее действие на коррозию арматуры нитрита натрия, добавленного в силикатный бетон, показало, что возможна интенсивная местная коррозия, в частности при глубокой карбонизации бетона.

Хранение образцов из бетона пластичной консистенции с расходом цемента 220 кг/м^3 при $B/C=0,6$ с защитным слоем толщиной 15 мм в условиях влажного красильного цеха показало недостаточную эффективность введения $2\% \text{ NaNO}_2$ (табл. 33).

Это испытание показывает, что в недостаточно плотном бетоне, находящемся в среде, способствующей развитию коррозии арматуры, нитрит натрия не оказывает длительного защитного действия.

Таблица 33

Влияние добавки нитрита натрия в обычный бетон на состояние арматуры при хранении образцов в атмосфере влажного цеха

Характеристика бетона	Срок испытания в месяцах	Площадь коррозии в %	Глубина коррозии в мм	Глубина карбонизации в мм	Характер коррозии
Без добавки	6 32	5 100	230 360	6—7 Полная	Отдельные пятна Сплошная, глубокая, в бетоне трещины
С добавкой 2% нитрита натрия	6 32	7 100	115 290	6—7 Полная	Отдельные пятна Сплошная, глубокая, в бетоне трещины

Анализируя приведенные выше данные о замедлении коррозии арматуры в различных бетонах при помощи добавок-пассиваторов, в частности нитрита натрия, можно сделать следующие выводы

Некоторые добавки-пассиваторы тормозят развитие коррозии стальной арматуры в различных бетонах. В бетонах пористых, отличающихся значительной проницаемостью, замедляющее действие этих добавок носит временный характер; длительность его зависит от степени агрессивного воздействия среды на железобетонную конструкцию. Для рекомендации тех или иных замедлителей коррозии необходимы длительные испытания, учитывающие конкретные особенности среды и бетона, а также изменения его свойств во времени. Рассмотрение вопроса о влиянии химических добавок, вводимых в бетонную смесь, на состояние арматуры позволяет сделать следующие выводы.

1. Хлористые соли, используемые в качестве ускорителей твердения, а так же как антиморозные средства, способны вызывать коррозию арматуры. Поэтому они могут применяться с известными ограничениями, которые предусмотрены действующими нормами [123, 129] и излагаются в § 16.

2. Добавки-замедлители коррозии, по-видимому, в определенных случаях целесообразно использовать для

повышения защитных свойств бетона. Однако их применение не может исключить использование основных средств защиты арматуры: высокой плотности и надлежащей толщины защитного слоя бетона, а в необходимых случаях и поверхностной защиты конструкций.

Эти добавки не следует применять при изготовлении конструкций, которые в процессе эксплуатации будут подвергаться периодическому увлажнению, а также конструкций из пористых легких ячеистых и автоклавных силикатных бетонов.

§ 9. Трещины в бетоне

Трещина, облегчая доступ агрессивных агентов внешней среды к поверхности стали, способствует возникновению и развитию ее коррозии. В подавляющем большинстве железобетонных конструкций при восприятии эксплуатационных нагрузок возникают трещины там, где бетон испытывает растягивающие усилия, превышающие временное сопротивление его растяжению.

В конструкциях и элементах без предварительного напряжения арматуры достичь полной трещиностойкости бетона можно лишь ценой примерно пятикратного увеличения расхода арматурной стали, что, кроме того, требует увеличения сечения конструкции, чтобы можно было разместить эту арматуру. Поэтому практически лишь в предварительно напряженных конструкциях и элементах можно обеспечить работу бетона без раскрытия поперечных трещин. Что касается конструкций с обычным армированием, то вопрос может стоять только о допустимом раскрытии трещин. Раскрытие трещин уменьшает жесткость железобетонных конструкций и ухудшает их эксплуатационные качества. Но, пожалуй, наиболее существенное влияние трещины оказывают на долговечность железобетонных конструкций.

Представляет интерес сводка рекомендаций различных авторов по допустимому раскрытию трещин, безопасных, по их мнению, для арматуры железобетонных конструкций (табл. 34)*. В информационном бюллетене Европейского комитета по бетону № 13 за 1959 г. [159] опубликованы результаты значительных по объему исследований железобетонных конструкций с трещинами. На основании статистической обработки данных изучения конструкций в возрасте свыше 15 лет, находившихся в различных условиях службы, рекомендуется в услови-

Таблица 34

Рекомендации по допустимому раскрытию трещин

Автор	Допустимая ширина раскрытия трещина в мм	Условия эксплуатации	Библиографическая ссылка и год
Пробст	0,3	—	[210], 1907
Граф	0,25	—	[175], 1935
Ренгерс	0,3	—	[215], 1935
Хонигман	{ 0,5 0,3	При временной нагрузке При постоянной нагрузке	[178], 1935
Шамбод	0,3	—	[157], 1949
Валет	0,5	—	[157], 1949
Люсье	{ 0,5—0,67 0,12—0,25	В нормальной атмосфере В агрессивной атмосфере	[157], 1949
Рос	0,33	—	[217], 1950
Залигер	0,2	—	[219], 1950
Вербецкий	0,5	В подводной зоне	[26], 1962
Артамонов	0,2	В нормальной атмосфере	[18], 1962
Абелес	0,1	В атмосфере с SO ₂	[147], 1963

ях нормированной толщины и плотности защитного слоя максимально допустимая ширина трещин при постоянной нагрузке: для наружных конструкций 0,2 мм, для внутренних — 0,3 мм. В благоприятных условиях (сухие, теплые помещения) допускается большее раскрытие трещин.

Количественная обработка результатов обследования состояла в построении диаграмм зависимости числа случаев, когда показатель коррозии был выше принятого критического балла, от ширины трещин. Фактическая толщина защитного слоя бетона, колебавшаяся от 0 до 6 см, во внимание не принималась. Степень коррозии устанавливалась на основании визуальной оценки. При ширине трещин 0,25—0,30 мм на наружных конструкциях число случаев, когда степень коррозии превышала критическую, сильно возрастает, а при ширине трещин 0,7—0,8 мм достигает 100%. В конструкциях внутри помещений коррозия в трещинах с раскрытием менее 0,3 мм была ниже критической.

Диапазон рекомендуемых значений допустимого раскрытия трещин (см. табл. 34) весьма велик, что можно объяснить, по-видимому, различными условиями опытов или наблюдений. Действительно, внутри отапливаемых помещений, где относительная влажность воздуха не

превышает 60%, нет оснований опасаться коррозии арматуры при любом раскрытии трещин в бетоне. Здесь величина раскрытия диктуется другими соображениями, вплоть до чисто эстетических.

С другой стороны, например в условиях современных химических предприятий, допустимое раскрытие трещин должно определяться с тщательным учетом конкретных агрессивных воздействий среды на конструкцию. При использовании высокопрочной проволочной арматуры опасность трещин в бетоне существенно возрастает вследствие высоких напряжений и малых сечений такой арматуры.

В 1963—1965 гг. проводились исследования с участием автора, целью которых было уточнение механизма и изучение кинетики коррозии арматуры в зоне трещин бетона в зависимости от ширины их раскрытия и особенностей воздействия среды. В основу исследований были положены изложенные выше теоретические разработки, касающиеся механизма защитного действия бетона.

Исследования позволили установить следующее. Образование трещин в растянутой зоне железобетонных конструкций связано с передачей на арматуру в зоне влияния трещины дополнительного растягивающего усилия, которое до образования трещины воспринималось бетоном. Зоной влияния трещины мы называем участок длины арматуры, на котором при образовании трещины теряется сцепление арматуры с бетоном. Очевидно, что зона влияния тем больше, чем шире раскрытие трещины, и тем меньше, чем сильнее сцепление арматуры с бетоном. По сравнению с гладкой арматурой периодического профиля имеет существенное преимущество, выражающееся в меньшем раскрытии трещин в одинаковых условиях, хотя число образующихся в бетоне трещин больше, чем при гладкой арматуре.

Итак, следствием образования трещин в растянутом бетоне являются: 1) частичная потеря сцепления, а следовательно, нарушение плотного контакта арматуры с бетоном и 2) возрастание напряжения в арматуре на участках с нарушенным сцеплением. Сохраняющееся на участках между трещинами сцепление арматуры с бетоном сообщает последнему как бы повышенную растяжимость в слоях, прилегающих к поверхности арматуры. Наблюдается так называемая депланация сечения бетона, следствием которой является клиновидная форма

трещины, т. е. у поверхности арматуры раскрытие трещины меньше, чем на поверхности бетона, до тех пор, пока арматура не потеряла полностью сцепления с бетоном.

По данным Ватштейна [233], отношение ширины трещин у поверхности арматуры периодического профиля и на поверхности бетона было равно:

0,5	при напряжении арматуры	1270 кг/см ²
0,39	»	2540 »
0,33	»	5700 »

Расчет ширины раскрытия трещин производится обычно на уровне оси арматуры и дает значения раскрытия на поверхности бетона. Измерить раскрытие трещины при современных средствах можно только на поверхности конструкции. Поэтому пока использовать наши представления о клиновидной форме трещин можно лишь качественно. Так, Г. П. Вербецкий [28] считает, что трещины раскрытием менее 50 мк обычно не доходят до поверхности арматуры, вернее у поверхности арматуры трещина разветвляется на множество микротрещин, вследствие чего в большинстве случаев в таких трещинах коррозии арматуры не возникает. Во всяком случае, клиновидность трещин может иметь существенное значение лишь при весьма малом их раскрытии.

Очевидно, что величина раскрытия и форма трещин определяют их проницаемость для влаги, кислорода и других агрессивных агентов. Известно, что газопроницаемость бетона находится в зависимости от его влажности, так как адсорбированная и капиллярная влага заполняет поры бетона, препятствуя диффузии газов. В результате адсорбции и капиллярной конденсации могут быть закрыты влагой капилляры и поры с радиусом менее 10^{-5} см. Макрокапилляры и трещины, следовательно, не могут быть заполнены влагой при капиллярной конденсации даже в насыщенном влагой воздухе.

Поэтому трещины рассматриваемого нами диапазона (0,05—0,5 мм и более) в атмосферных условиях могут заполняться водой лишь при непосредственном увлажнении, например атмосферными осадками. При этом влага интенсивно отсасывается из трещины более мелкими капиллярами. Следовательно, в атмосферных условиях трещина постоянно или периодически заполнена воздухом и парами воды. При стационарных условиях капиллярного подсоса трещины могут быть заполнены

водой на высоту, зависящую от их раскрытия, а при постоянном нахождении ниже уровня воды последняя заполняет трещины целиком.

При этом необходимо также учитывать проницаемость бетона и трещин в нем для различных газов. По отношению к бетону кислород практически нейтральный газ, поэтому, проникая к поверхности корродирующей арматуры, он не поглощается бетоном. Наоборот, углекислый газ по мере проникания внутрь пористой структуры бетона поглощается им (см. выше). Связанное с карбонизацией нарушение пассивности стали в бетоне, естественно, происходит значительно скорее в местах образования трещин, которые, хотя и поглощают углекислоту своими стенками, тем не менее способствуют ее прониканию в зону контакта бетона с арматурой. Другие кислые газы и хлор-ионы, проникающие в трещину из воздуха или вместе с водой, также активируют поверхность арматуры.

Потеря пассивности происходит тем быстрее, чем шире трещина, что подтверждается результатами длительных измерений потенциала стальных стержней в образцах бетона при периодическом их увлажнении пресной водой (рис. 27). Непосредственное определение показателя

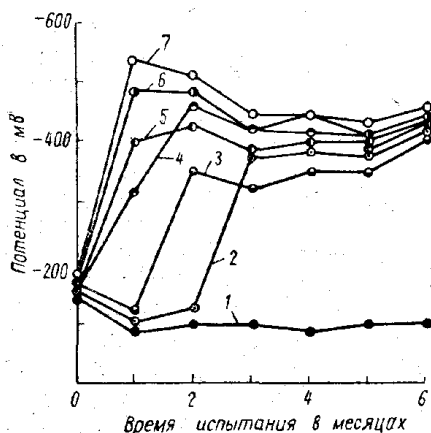


Рис. 27. Изменение потенциала стали в бетоне при периодическом увлажнении

1 — без трещин; 2 — трещины шириной 0,05 мм; 3 — то же, 0,1 мм; 4 — то же, 0,2 мм; 5 — то же, 0,4 мм; 6 — то же, 0,5 мм; 7 — то же, 0,7 мм

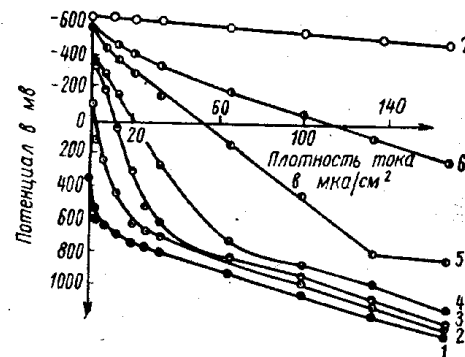
ло, что процесс коррозии начинается при смещении потенциала на 200—300 мВ в отрицательную сторону.

Исследование влияния трещин в бетоне на анодную поляризацию стальных электродов позволило устано-

вить, что при наличии в электролите активирующих ионов пассивность нарушается быстрее. Это видно по обратному ходу анодных поляризационных кривых (рис. 28), снятых с образцов, которые сразу после обра-

Рис. 28. Обратный ход анодных поляризационных кривых стали в бетоне в 0,1 н. NaCl

1 — без трещин; 2 — трещины шириной 0,1 мм; 3 — то же, 0,2 мм; 4 — то же, 0,4 мм; 5 — то же, 0,6 мм; 6 — то же, 1 мм; 7 — открытая сталь



зования трещин были погружены в 0,1 н. раствор NaCl и спустя 1 сутки подверглись поляризации. При этом прямой ход поляризационных кривых в образцах с трещинами до 0,6 мм почти не отличался от хода кривой в образце без трещин. Более пологий ход кривых с увеличением раскрытия трещин свидетельствует об облегчении анодного процесса.

При анодной поляризации образцов с трещинами в растворе сульфата натрия было обнаружено значительно более слабое активирующее действие сульфат-иона: активизации не наблюдалось при ширине раскрытия трещин до 0,5 мм, что вполне согласуется с данными по поляризации стальных образцов в водных вытяжках из цемента с активирующими ионами [80].

Итак, на поверхности арматуры в зоне трещины в бетоне, и тем скорее, чем она шире, образуется активный участок и становится возможным образование гальванических коррозионных пар. Поскольку электропроводность влажного бетона сравнительно велика, наряду с многочисленными коррозионными микропарами может начать функционировать макрогальваническая пара, анодом которой служит активированная поверхность в зоне трещины A_2 (рис. 29), а катодом K_2 — пассивная поверхность арматуры, сохранившей плотный контакт с бетоном. Площадь анода этой пары зависит от ширины

раскрытия трещины, диаметра арматуры и имеет тенденцию к увеличению во времени за счет распространения процесса активирования поверхности от трещины вдоль арматуры. По нашим наблюдениям и данным Г. П. Вербецкого [26, 80], в зоне трещины протяженность участка арматуры, способного быть анодом макропары, может достигать нескольких сантиметров.

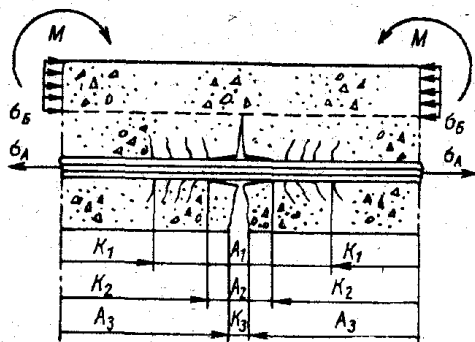


Рис. 29. Расположение электродных участков на арматуре в зоне трещины

$K_1-A_1-K_1$ — пара градиента напряжения; $K_2-A_2-K_2$ — концентрационная пара; $A_3-K_3-A_3$ — пара дифференциальной аэрации

Образование трещины в бетоне сопровождается выключением его из работы на растяжение на некотором участке, который мы назвали зоной влияния трещины. В этой зоне A_1 напряжения в арматуре выше, чем на соседних участках K_1 , где часть растягивающих усилий воспринимает бетон. За счет различия напряжений в зоне трещины тоже могут возникать макропары. Эффективность такой пары, однако, должна быть значительно меньше, чем первой, так как смещение потенциала, вызываемое различием напряжений, весьма невелико, а протяженность анодного участка большая. Поэтому вторая макропара может лишь несколько усилить действие первой.

В месте нахождения трещины в бетоне K_3 резко увеличивается аэрация поверхности арматуры, что создает условия для образования макропары дифференциальной аэрации. Эта пара должна иметь полярность, противоположную двум предыдущим парам, поскольку, как из-

вестно, анодом становится менее аэрируемый участок — в данном случае металл под бетоном по обе стороны от трещины, т. е. участок A_3 .

Чаще всего наиболее глубокое поражение арматуры наблюдается в месте пересечения ее трещиной. Менее глубокие язвы распространяются иногда по обе стороны от трещины на расстояние не более 5—10 мм. Далее, по мере удаления от трещины, коррозия резко затухает и проявляется в виде налета, распространение которого зависит от ширины раскрытия трещин.

Как известно из теории электрохимической коррозии металлов, протекание коррозии контролируется наиболее медленным из нескольких элементарных процессов: ионизацией металла (анодный процесс), ассимиляцией электронов деполяризатором (катодный процесс) или перемещением ионов в электролите. Соответственно работа коррозионных макро- и микропар может происходить с анодным, катодным или омическим контролем. Установление характера контроля процесса коррозии раскрывает его механизм и помогает, в частности, обосновать допустимое раскрытие трещин. Первая макропара, усиливаемая второй, может эффективно работать при таком влажностном состоянии бетона, когда он обладает достаточными электропроводностью и проницаемостью для кислорода, т. е. если конструкция находится в воздушно-влажной среде либо испытывает периодическое увлажнение. В этом случае, очевидно, будет иметь место омический контроль коррозионного процесса. Преобладание катодного контроля может наступить, когда вследствие насыщения пористой структуры бетона водой резко замедлится диффузия кислорода к катодным участкам поверхности арматуры. Это может наблюдаться в конструкциях, постоянно находящихся в среде насыщенного водяного пара или в воде.

Резкое увеличение омического сопротивления бетона в воздушно-сухом состоянии исключает возможность функционирования макропар A_1K_1 и A_2K_2 . Макропара A_3K_3 дифференциальной аэрации, очевидно, может функционировать, когда влага достигает поверхности арматуры в трещине, но не на участках, где бетон не имеет трещин. В этом случае омическое сопротивление бетона в зоне трещины понижено, чему способствует проникание в трещину веществ, увеличивающих местную проводимость бетона и пленки влаги на стали. Характер конт-

роля работы макропары дифференциальной аэрации зависит от ширины трещины и степени ее заполнения влагой. При достаточном доступе кислорода в трещину преобладает анодный контроль. Роль последнего усиливается по мере накопления в трещине продуктов коррозии, замедляющих ионизацию металла на анодных участках.

Если учесть еще влияние одновременно функционирующих коррозионных микропар, а также возникающих макропар дифференциальной аэрации с анодами в образующихся коррозионных язвах, то следует признать, что

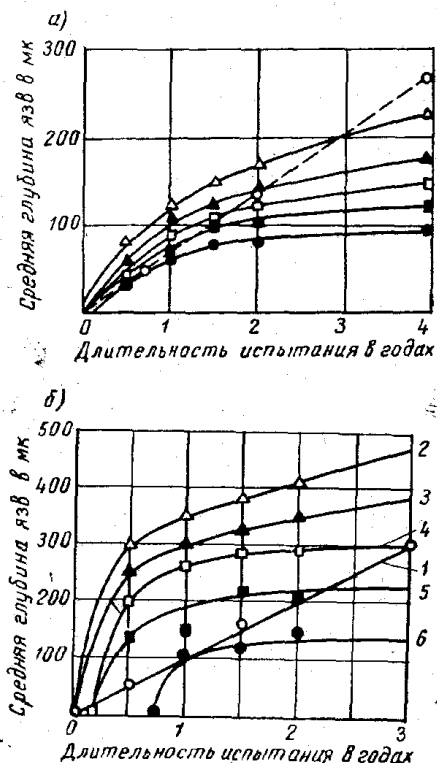


Рис. 30. Кинетика коррозии арматуры в зоне трещины

а — в атмосферных условиях Москвы; б — при периодическом увлажнении; 1 — открытый стержень; 2, 3, 4, 5, 6 — ширина трещин 0,7; 0,4 0,3, 0,2 и 0,1 мм

проведенных исследований пока недостаточно для глубокого анализа процессов при разнообразных сочетаниях влияющих факторов.

В таких условиях решающее значение приобретает изучение кинетики коррозионного процесса. Исследования показали, что коррозия стали под бетоном с трещиной идет вначале быстрее, чем на открытой поверхности. С течением времени в узких трещинах и при не особенно сильно агрессивной среде скорость коррозии замедляется (рис. 30). В широких трещинах и в сильно агрессивной среде это затухание может иметь временный характер, так как под давлением продуктов коррозии защитный слой бетона может разрушиться.

Четкие границы допустимого раскрытия трещин установить трудно из-за многообразия условий эксплуатации. Наши исследования показали, что увеличение раскрытия трещин свыше 0,3 мм значительно ускоряет процесс коррозии в агрессивных условиях (рис. 31).

Итак, вероятность возникновения коррозионного процесса на арматуре в зоне трещин в бетоне тем выше, чем больше их раскрытие. Скорость развития коррозии находится в такой же зависимости от ширины трещин, как показали исследования Р. Шалон [225], Г. П. Вербецкого [27] и наши [81].

Нами было установлено [82], что при периодическом увлажнении напряженных образцов коррозионные поражения арматуры растут с увеличением раскрытия трещин. Многочисленные испытания образцов с трещинами, проведенные при нашем участии В. И. Новгородским в различных режимах хранения, позволили как оценить сравнительную их агрессивность, так и установить общий затухающий характер развития коррозии арматуры в трещинах. Это подтверждается графиками на рис. 30.

Из графиков на рис. 30, а следует, что в первый период скорость коррозии арматуры в атмосферных услови-

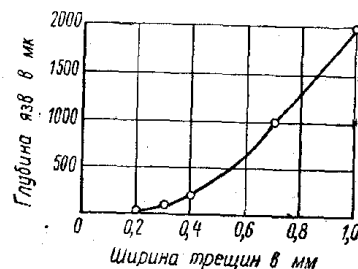


Рис. 31. Коррозия арматуры в зависимости от ширины трещин при капиллярном поднятии электролита (0,1 н. NaCl+0,1 н. Na₂SO₄) в трещинах

ях промышленного города при ширине раскрытия трещин более 0,1 мм выше, чем скорость коррозии открытой стали без защиты ее бетоном, и тем выше, чем шире трещина. Затем коррозия постепенно замедляется и к трем годам даже в трещине с раскрытием 0,7 мм глубина язв меньше, чем на открытой стали. При ширине раскрытия 0,1 мм за период с 1,5 до 4 лет не происходит заметного углубления язв.

На рис. 32 показано влияние трещин на коррозию арматуры при разных режимах. При воздушно-влажных режимах заметно резкое ослабление влияния ширины раскрытия трещин сверх 0,4—0,6 мм. Этого нельзя сказать о режимах хранения при наличии агрессивных газов. При периодическом увлажнении образцов пресной водой (рис. 33) раскрытие трещин более резко влияет на скорость коррозии, чем в атмосферных условиях. Особенно это за-

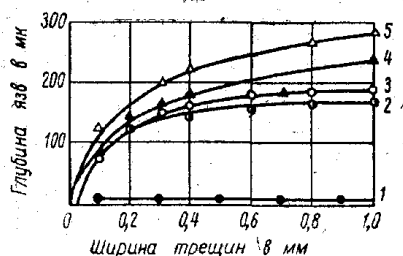


Рис. 32. Влияние ширины трещин на степень коррозии арматуры

1 — 12 мес. при $\phi = 60\%$; 2 — 12 мес. при $\phi = 80\%$; 3 — 12 мес. при $\phi = 95\%$; 4 — 3 мес. в парах брома; 5 — 5 мес. в парах HCl

метно для трещин с раскрытием свыше 0,2 мм и в первое полугодие. Затем наблюдается резкое снижение скорости

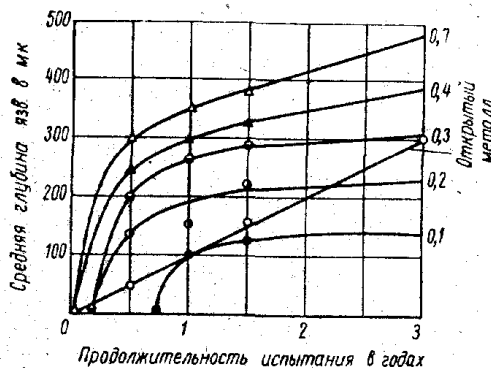


Рис. 33. Зависимость скорости коррозии арматуры от ширины трещин при периодическом увлажнении пресной водой

коррозии, однако безусловное затухание происходит лишь в трещинах с раскрытием до 0,3 мм.

Длительные испытания, проведенные Г. П. Вербским [141], также показали затухающий характер развития коррозии арматуры в трещинах (рис. 34).

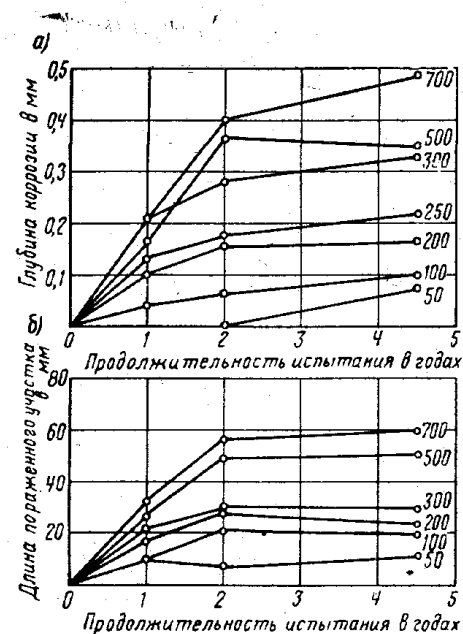


Рис. 34. Развитие коррозии арматуры в трещинах бетона

а — в глубь металла и б — вдоль арматуры при периодическом увлажнении с частотой 100 циклов в год (цифрами обозначена ширина раскрытия трещин в мкм)

Практические рекомендации по допустимому раскрытию трещин должны учитывать кинетику коррозии, условия работы конструкций и вид арматуры. Очевидно, что для проволочной арматуры трещины более опасны, чем для стержневой. У конструкций, подвергающихся часто повторяющимся нагрузкам, необходимо учитывать возможность разрушения арматуры от коррозионной усталости. По-видимому, периодическое увеличение раскрытия трещин затруднит их закупоривание продуктами коррозии.

Эти вопросы нуждаются в дальнейшем систематическом исследовании.

ВИДЫ РАЗРУШЕНИЯ АРМАТУРЫ В БЕТОНЕ ВСЛЕДСТВИЕ КОРРОЗИИ

§ 10. Уменьшение сечения элементов вследствие коррозионных потерь

Наиболее типичным разрушением, которое может происходить при коррозии арматуры в бетоне, является постепенное уменьшение ее рабочего сечения за счет перехода наружных слоев металла в продукты коррозии. Вследствие того что железо в процессе электрохимической коррозии растворяется только на анодах коррозионных пар, должно было бы наблюдаться неравномерное уменьшение сечения. Практически характер коррозионного поражения может быть разным: от почти равномерного уменьшения сечения по всей поверхности до резко выраженного язвенного поражения.

Равномерное уменьшение сечения происходит тогда, когда коррозионный процесс является результатом деятельности микропар, имеющих небольшие по площади, по сравнению с анодными, катодные участки. Это может быть в карбонизованном или другом непассивирующем бетоне (например, автоклавном силикатном). Если площадь катодных участков велика, по сравнению с анодными, то коррозионные поражения развиваются обычно на отдельных участках поверхности металла в виде пятен, язв или штигга.

Поскольку в бетоне процесс коррозии арматуры, полностью или частично депассивированной, контролируется обычно процессом диффузии кислорода к катодным участкам поверхности, потери на локализованных анодных участках будут тем больше, чем меньше их площадь.

Неравномерная язвенная коррозия характерна для арматуры в бетоне, содержащем хлориды, которые могут полностью или частично разрушить пассивную пленку на поверхности стали. При этом, если хлор-ионов мало или они распределены в бетоне неравномерно (например, при миграции их в бетон из окружающей среды), создаются условия для развития локальных язвен-

ных поражений. При большом и равномерном содержании хлор-ионов в бетоне у поверхности арматуры происходит полное нарушение пассивности и относительно равномерное уменьшение сечения ее элементов.

Локальные язвенные поражения арматуры представляют значительно большую опасность для железобетонных конструкций, чем равномерная коррозия, по двум основным причинам. Во-первых, при язвенной коррозии местное уменьшение сечения корродирующей арматуры происходит значительно быстрее, чем при равномерной. Во-вторых, опасная степень поражения конструкции может наступить без достаточно заметных внешних признаков в виде растрескивания и откалывания защитного слоя (которые наблюдаются обычно при относительно равномерной общей коррозии), поскольку при малых по площади язвенных поражениях продукты коррозии, как правило, не могут оказать давления, достаточного для разрыва защитного слоя бетона.

Особенно опасна язвенная форма коррозии для высокопрочной проволочной арматуры предварительно напряженных железобетонных конструкций. В связи с малыми поперечными сечениями отдельных проволок, высокой степенью напряжения и пониженной деформативностью высокопрочных сталей при образовании язвенных поражений могут происходить внезапные обрывы.

Так, спустя 5 лет после сдачи в эксплуатацию завода железобетонных шпал обрушилась предварительно напряженная составная стропильная балка пролетом 21 м [8]. Вертикальные стыки элементов балки были выполнены на цементно-песчаном растворе с добавкой хлористого кальция в количестве до 5% веса цемента. Вследствие влажного режима воздуха в цехе пучковая арматура в некачественно заанодированных каналах нижнего пояса балки подверглась интенсивной коррозии. Развитие язвенной коррозии высокопрочной проволоки способствовало прониканию в каналы хлор-ионов из бетона балки и раствора замоноличивания вертикальных стыков. В цементном растворе и бетоне у места излома балки обнаружено соответственно 0,20 и 0,28% хлор-ионов; 70% проволок потеряли более 40% прочности, а их относительное удлинение снизилось в среднем на 80%. Обрыв всех проволок хрупкий, без образования шейки. Такие обрывы неоднократно наблюдались и описаны в литературе [167, 174, 197, 201]. Аварии происходили глав-

ным образом при больших добавках в бетон хлористых солей, особенно в сочетании с малой толщиной защитного слоя. Язвы чаще возникают с нижней стороны, что связано с возможным нарушением плотного контакта поверхности стали и бетона в результате осадки бетона до момента схватывания. По данным Буковидки [158], более подвержена язвенному поражению высокопрочная арматурная проволока при волочении без смазки и охлаждения в процессе напряженной навивки на сердечники труб, резервуары, и прочие конструкции.

В одних странах при использовании в качестве арматуры высокопрочной проволоки применение добавок хлористых солей запрещено [177, 195], в других — ограничено.

§ 11. Хрупкое растрескивание под напряжением

С применением предварительно напряженных железобетонных конструкций стало известно об особом виде коррозии высокопрочной арматуры, который классифицируется как «коррозия под напряжением» и проявляется в виде трещин, развивающихся вплоть до разрыва перпендикулярно направлению главных растягивающих напряжений, т. е. поперек арматурного элемента. Характерно, что образование трещин не связано с развитием общей равномерной или язвенной коррозии и обычно происходит при незначительных поверхностных поражениях либо без них. Этот вид поражений представляет особую опасность, так как может привести к внезапному разрушению арматуры без каких-либо предварительных сигналов.

Прежде чем подробно охарактеризовать этот вид коррозии, необходимо отметить, что хрупкие обрывы арматуры наблюдались не только в бетоне, но и до бетонирования вследствие воздействия на напряженную сталь атмосферной коррозии. Оказалось, что опасные напряжения возникают в краевых волокнах проволоки, смонтированной в бухты [31]. Чтобы уменьшить эти напряжения, высокопрочную арматурную проволоку поставляют в бухтах большого диаметра.

Нередки также случаи хрупких обрывов высокопрочной арматуры при натяжении ее на открытых стендах. В нормах ГДР [169] по этой причине время пребывания в напряженном и незабетонированном состоянии арматуры на стендах ограничивается двумя неделями.

Наибольшую склонность к такого вида разрушениям проявляет термически упрочненная арматура, тогда как исходная горячекатаная сталь не подвержена коррозионному растрескиванию. Это свидетельствует о решающем значении структуры и внутренних напряжений, возникающих в процессе упрочнения.

Известно [8, 135], что действие статических напряжений иногда ускоряет общую коррозию металла. В кислых средах, когда электрохимический процесс коррозии идет с выделением водорода, наблюдается линейная зависимость скорости коррозии от величины напряжения. В нейтральных и щелочных электролитах напряжения не влияют на скорость коррозии или же влияют незначительно. Эванс [145] объясняет это тем, что процесс коррозии в таких средах контролируется диффузией кислорода к катодным участкам поверхности металла. Та же закономерность наблюдается при атмосферной коррозии, где возможно даже снижение скорости коррозии напряженного металла вследствие более тонкого, по данным С. Г. Веденкина [25], слоя продуктов коррозии на нем.

Испытания высокопрочной проволоочной арматуры различных видов показали [5, 17], что статические растягивающие напряжения не вызывают заметного уменьшения разрывного усилия образцов под действием атмосферной коррозии по сравнению с разрывным усилием образцов, корродировавших в ненапряженном состоянии. Имеются сведения [72] о значительном снижении в результате атмосферной коррозии напряженной высокопрочной проволоки ее деформативных характеристик (сопротивление кручению и перегибам, удлинение при разрыве), т. е. об уменьшении пластичности.

Значительно больший интерес представляет малоизученное до сих пор и тем более опасное явление растрескивания высокопрочных арматурных сталей при одновременном действии статических напряжений и коррозионноактивной среды (мы не рассматриваем здесь специфических явлений коррозионной усталости, проявляющейся при пульсирующих нагрузках).

В. В. Романов [108] характеризует коррозионное растрескивание как сложный процесс, происходящий в условиях одновременного воздействия на металл статических растягивающих напряжений и электрохимического коррозионного процесса. При коррозионном растрескивании механические напряжения и коррозионная среда,

действуя одновременно, вызывают несравненно большую потерю прочности металла, чем в случае, когда они действуют раздельно.

Процесс коррозионного растрескивания напряженной высокопрочной арматуры в настоящее время представляют в виде двух стадий:

первая — локализованная электрохимическая коррозия;

вторая — развитие трещины.

Концентраторы напряжений в виде механических дефектов поверхности стали или коррозионных язв с наибольшей вероятностью становятся локальными анодами при частичном повреждении пассивной пленки на поверхности арматуры, например хлор-ионами.

Напряжения на дне таких концентраторов, имеющих радиус кривизны порядка атомных размеров, могут быть очень большими. Из-за малой деформативности высокопрочных сталей местные пики напряжений на дне концентраторов не могут быть сняты пластическими деформациями. В результате на участке малой микропрочности образуется зародышевая микротрещина, которая в дальнейшем может расширяться под действием коррозионного электрохимического процесса. По-видимому, дно этой зародышевой трещины играет роль анода, а стенки и края являются катодами.

По Леонгарду [189], возможность коррозионного растрескивания предварительно напряженной арматуры определяется совокупностью следующих основных факторов: наличием значительных напряжений растяжения в элементах арматуры, локальными участками коррозии на ее поверхности и малой деформативностью высокопрочных сталей.

Известно, что быстрое хрупкое коррозионное разрушение напряженных сталей вызывается специфическими коррозионными агентами (это не исключает, конечно, что нам пока не известны агенты, вызывающие замедленное, растянутое на десятилетия развитие коррозионных трещин).

С начала 50-х гг. в зарубежной литературе начали появляться сообщения о случаях обрушений и аварий, вызванных внезапным обрывом напряженной высокопрочной арматурной стали. Однако подробный разбор указанных случаев [167, 218] показывает, что часто коррози-

онное разрушение связано с наличием механических дефектов стали в виде надрывов, трещин и т.п.

В 1951 г. в Голландии на различных объектах наблюдались хрупкие обрывы стальной проволоки уже при разматывании мотков или вскоре после натяжения. Оказалось, что термически упрочненная проволока, намотанная на барабан диаметром 90 см (что вызвало напряжение в крайних волокнах 110—120 кг/мм²), или складировалась в агрессивной, зараженной сульфатами и цианидами атмосфере, или же находилась в условиях воздействия грунтовой воды, которая содержала в большом количестве хлор- и нитрат-ионы.

В 1952 г. при строительстве моста в Ферарберге (ФРГ) произошел обрыв упрочненных проволок через несколько часов после натяжения. В изломе проволоки отчетливо видна темноокрашенная лунка, которая указывает, что уже во время складирования проволоки в мотках вследствие коррозии под напряжением образовались трещины глубиной до 1/3 диаметра. Под влиянием этого ослабления при натяжении в вершинах трещин возникли значительные концентрации напряжений, которые привели через несколько часов к хрупкому разрушению.

Подобный случай произошел в Египте с патентированной проволокой. Несколько сот проволок (около 1% общего числа) порвались через несколько часов после натяжения. Исследование выявило на поверхности проволоки микротрещины, вызванные, очевидно, отсутствием достаточной смазки при ее волочении. В этих трещинах откладывались окислы, которые адсорбировали влагу приморской атмосферы.

Трубы, применявшиеся во Франции, имели сердечник из бетона на высокопрочном портландцементе. Спиральная напряженная арматура из стальной проволоки имела защитный слой из мелкозернистого литого вакуумбетона на шлакопортландцементе. Предполагается, что разрывы арматуры являются следствием совместного действия напряжений и электрохимической коррозии, вызванной контактом арматуры с двумя различными цементами.

Неоднократно описан случай коррозионного повреждения труб водопровода в г. Риджайне (Канада). Сердечники труб обматывались патентированной проволокой диаметром 3,8 мм с предварительным напряжением, которое создавалось путем волочения без смазки через

фильеры с уменьшением от диаметра 4,1 до 3,8 мм. Затем был нанесен торкретированием защитный слой раствора на сульфатостойком цементе; 84 трубы было изготовлено без хлористого кальция, а 4400 — с добавкой его в количестве от 1,5 до 3% веса цемента. При опробовании трубопровода давлением было установлено, что отдельные трубы в возрасте 4,5 месяца имели сотни обрывов проволоки. Из 84 труб, изготовленных без CaCl_2 , осмотрено 29 и ни одна не имела следов коррозии. Проволочная арматура всех 58 осмотренных труб с CaCl_2 имела серьезные поражения. Так как вытяжка проволок производилась без охлаждения и без смазки, то вследствие большого выделения тепла при трении образовались микротрещины. Коррозионное растрескивание патентованной высокопрочной проволоки и в данном случае явилось следствием совместного действия напряжений и электрохимической коррозии.

Протяжка высокопрочной арматурной проволоки через фильеры без смазки и охлаждения с последующей электрохимической коррозией, вызываемой высокоагрессивными жидкостями, послужила причиной ряда случаев обрушений предварительно напряженных железобетонных резервуаров в США, Канаде и Алжире.

К. В. Михайлов [72] описывает случай коррозии напряженной проволочной арматуры в каналах балок пролетного строения моста в Югославии. Применялась гладкая высокопрочная проволока диаметром 5 мм австрийского производства. В одной балке 100 арматурных пучков после предварительного напряжения не были заинъецированы в связи с наступившими осенними холодами. Через 5—6 месяцев после натяжения произошло 40 случаев самопроизвольного обрыва проволок. Обрывы происходили в каналах опорных участков балки на расстоянии около 1 м от выхода.

В 1961 г. при строительстве железобетонных резервуаров для хранения нефтепродуктов в Татарии были обнаружены случаи хрупкого обрыва напряженной высокопрочной проволоки (ГОСТ 7348—55) диаметром 5 мм. Причина обрыва — коррозионное растрескивание.

При строительстве оболочки крытого рынка в Москве в результате несвоевременного обетонирования напряженных арматурных пучков произошел обрыв значительного количества проволок, ослабленных атмосферной

коррозией, что вызвало необходимость установки дополнительной стержневой арматуры.

Общепринятым испытанием на склонность сталей к коррозионному растрескиванию является выдерживание напряженных образцов в горячих нитратных растворах [109]. Наиболее часто используется при таких испытаниях раствор, состоящий из 600 в. ч. нитрата кальция, 50 в. ч. нитрата аммония и 350 в. ч. воды при температуре 100—120°С.

Как показывают работы ряда исследователей [7], наибольшую склонность к коррозионному растрескиванию при таком испытании показывают термически упрочненные стали.

По голландским данным, термически упрочненная (закаленная в масле) напряженная сталь диаметром 5—7 мм имеет при таких испытаниях жизнеспособность (время до растрескивания) только 1—2 ч, диаметром более 12 мм — от 6 до 24 ч, патентованная холоднотянутая проволока диаметром 1—3 мм — более 72 ч.

Американские опыты показали, что жизнеспособность закаленной в масле проволоки при напряжении краевых волокон до 110—140 кг/мм² немногим более 1 ч, в то время как патентованная холоднотянутая проволока после 1000 ч испытаний была еще цела.

По данным Ф. Швиера [222], закаленная в масле проволока при напряжении, равном 55% предела прочности, выдерживает 70—160 мин; при напряжении, равном 73% предела прочности, — 42—80 мин. Патентованная холоднотянутая проволока при обеих степенях напряжения через 7000 мин испытания не разорвалась.

По данным Эверлинга [168], закаленная в масле проволока из высокоуглеродистой стали в горячем растворе нитрата аммония оказалась более склонной к образованию коррозионных трещин, чем холоднотянутая. В Швейцарии был поставлен эксперимент, показывающий, что и в условиях, близких к естественным, закаленная в масле проволока имеет большую склонность к коррозии под напряжением.

В этих и других работах кроме склонности к коррозионному растрескиванию разных сталей изучалось влияние степени напряжения, температуры и других факторов. Установлено [174, 206], что растрескивание в нитратных растворах происходит и при комнатной температуре, но в течение весьма продолжительного времени.

В. В. Романов [108] указывает, что кроме нитратов растрескивание сталей способны вызывать и некоторые другие агенты: хлористые соли, щелочи, сероводород.

Буковицки [158] сообщает, что не было установлено фактов растрескивания в растворах хлоридов, нитритов, фосфатов и разбавленных растворах различных кислот и щелочей. По Мак-Глассону [194], при испытании в кипящем нитратном растворе хлориды действуют как ингибитор. Однако Боймель и Энтель [150] наблюдали растрескивание в насыщенном растворе хлористого кальция при наложении анодного тока. Противоречивость данных о влиянии хлоридов указывает на недостаточную исследованность вопроса.

Выяснение влияния различных агрессивных сред на коррозионное растрескивание термически упрочненных арматурных сталей является очень важным для решения вопроса о возможности применения конструкций с этой арматурой в тех или иных условиях.

Нами совместно с Э. А. Гуревичем [8] были проведены испытания по определению склонности к коррозионному растрескиванию наиболее распространенных в практике строительства высокопрочных арматурных сталей. В кипящем нитратном растворе состава 600 в. ч. $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ и 50 в. ч. NH_4NO_3 на 350 в. ч. воды были испытаны высокопрочная проволока диаметром 5 мм, гладкая и периодического профиля, омедненная и без омеднения, отпущенная и без отпуска, стержневая арматура диаметром 12 мм из стали марок Ст. 5 и 35ГС, термически упрочненная до класса Ат-IV, а также термически упрочненная катанка.

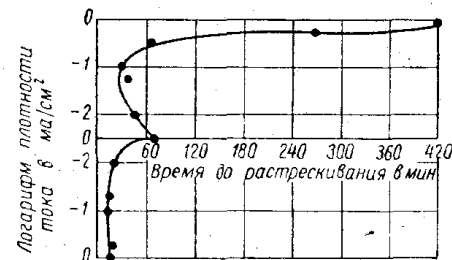
Напряжения в образцах составляли 65—70% предела прочности на растяжение. Результаты испытаний показали разную склонность к растрескиванию. «Жизнеспособность» термически упрочненной катанки Ø 6 мм составляла 2—4 ч, термически упрочненной стержневой арматуры Ø 12 мм — 5—7 ч. Все виды высокопрочной проволоки в течение 600 ч испытаний растрескиванию не подверглись.

Эти данные достаточно четко коррелируются с результатами экспериментов швейцарских, американских и немецких исследователей.

Электрохимическая природа коррозионного растрескивания термически упрочненной арматуры экспериментально подтверждается полученными нами кривыми

влияния катодной и анодной поляризации на скорость растрескивания. Как видно из рис. 35, при малой плотности катодного тока наблюдалось некоторое ускорение растрескивания. По мере увеличения плотности катодного тока время до растрескивания растет.

Рис. 35. Влияние катодной и анодной поляризации на стойкость к растрескиванию термоупрочненной стали марки Ст. 5 в горячем нитратном растворе



Ускоряющий эффект малой плотности катодного тока объясняется следующим. Наложенный ток расходится на погашение силы тока коррозионных пар, образуемых катодными участками, расположенными на поверхности металла, и анодными в зоне дна концентраторов напряжений и дна развивающихся коррозионных трещин. Однако при малой плотности тока защищается лишь часть трещин или других концентраторов напряжений, и поэтому ускоряется развитие незащищенных или недостаточно защищенных трещин. Дальнейшее повышение плотности катодного тока ведет к полному погашению работы коррозионных пар на поверхности металла и в зоне трещин. Для прекращения коррозионного растрескивания необходимо заполяризовать металл до потенциала анодных участков в районе дна коррозионных трещин.

Анодная поляризация уже при малой плотности тока значительно ускорила растрескивание; увеличение плотности тока практически не приводило к дальнейшему ускорению растрескивания. Ускорение растрескивания при анодной поляризации объясняется возрастанием коррозионного тока в районе дна коррозионных трещин вследствие смещения общего потенциала металла в положительную сторону. Таким образом была установлена электрохимическая природа коррозионного растрескивания термически упрочненных арматурных сталей, что дает возможность привлечь для объяснения механизма этого

процесса существующие теории коррозионного растрескивания металлов [62].

При эксплуатации в агрессивных средах предварительно напряженных железобетонных конструкций, армированных высокопрочными сталями, склонными к коррозионному растрескиванию, особую важность, по нашему мнению, приобретает индукционный период — начальная стадия медленного развития трещин, предшествующая появлению видимых трещин. Изменение прочностных и деформативных характеристик арматуры в этот период будет существенно влиять на надежность работы конструкции в целом.

Для определения величины этих изменений нами были испытаны в кипящем растворе нитратов образцы термически упрочненной катанки $\varnothing 6$ мм и высокопрочной проволоки $\varnothing 5$ мм. Напряжение в образцах создавалось путем изгиба их в скобу вокруг оправки диаметром 300 мм с последующей затяжкой концов. Величина максимальных краевых напряжений составляла около 60% предела прочности на растяжение. Всего испытывалось по 24 образца каждого вида арматуры.

На протяжении 6 ч испытаний треснули 14 образцов катанки; высокопрочная проволока трещин не имела. Нетреснувшие образцы катанки извлекались из раствора каждые 2 ч и испытывались на разрывной машине. Результаты испытаний представлены на рис. 36. Харак-

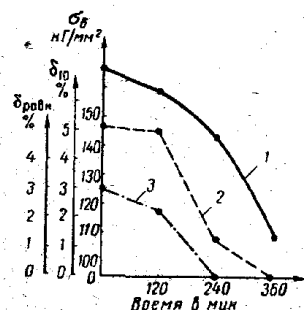


Рис. 36. Изменение предела прочности (1), относительного (2) и равномерного (3) удлинений термически упрочненной катанки $\varnothing 6$ мм при коррозии под напряжением в горячем нитратном растворе

терно, что во всех образцах склонной к растрескиванию катанки при испытании на растяжение обрыв хрупкий, без образования шейки. На поверхности разрыва образцов отчетливо видна темноокрашенная лунка (рис. 37), свидетельствующая о том, что в этом сечении непосред-

ственно перед обрывом существовала зародышевая микротрещина.

Дальнейшие испытания термически упрочненной стали велись в условиях, более близких к возможным условиям их эксплуатации. Термически упрочненные стержни

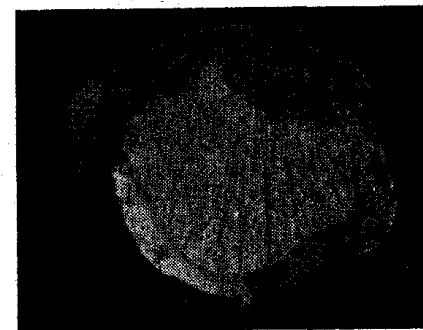


Рис. 37. Излом арматурного стержня в результате коррозионного растрескивания (темная лунка — след коррозионной трещины)

диаметром 12 мм из стали марки Ст. 5, натянутые до 75% предела прочности на специальных рамах, помещались в ванне с песком, увлажненным 3%-ным раствором хлористого натрия, уровень которого не достигал арматуры, увлажнявшейся капиллярной влагой, что облегчало условия аэрации. Между седьмым и десятым месяцами испытания произошел хрупкий обрыв 7 образцов из 12, что свидетельствует о реальной возможности коррозионного растрескивания такой стали и в хлоридной среде.

Рем и Рауэн [212] указывают, что с опасностью коррозионного растрескивания чувствительных к такого рода повреждению арматурных сталей практически можно не считать лишь при безукоризненном качестве бетона и когда исключено воздействие таких известных коррозионных агентов, как нитраты и т. п. Однако приведенные выше данные об имевших место авариях подтверждают реальную опасность коррозионного растрескивания термически упрочненной арматуры железобетонных конструкций. В лабораторных условиях при кратковременных ускоренных испытаниях нами наблюдалось коррозионное растрескивание напряженных образцов термически упрочненной проволоки диаметром 3 мм из стали, близкой по химическому составу к стали марки Ст. 5. В первом случае инициатором растрескивания явилась добавка в бетон на портландцементе марки 200 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ в

количестве 5% веса цемента. Эта добавка в последнее время рекомендуется в качестве ускорителя твердения бетона, не вызывающего коррозии арматуры, однако, как видно из вышеизложенного, используется при экспрессных испытаниях на коррозионное растрескивание. Из 6 образцов первый растрескался после одного цикла пропаривания при температуре 80°С, второй — после двух, а 5 остальных — после пяти-шести циклов. Следовательно, применение этой добавки в бетон при использовании термически упрочненной арматуры опасно и не может быть допущено. Напряженный образец из той же проволоки в автоклавном газобетоне объемным весом 700 кг/м³ на портландцементе марки 500 Воскресенского завода растрескался после 3 месяцев периодического увлажнения пресной водой. Под действием наложенного анодного тока при потенциале +500 мВ по насыщенному каломельному электроду в течение 48 суток произошло растрескивание всех напряженных образцов из той же проволоки в плотном бетоне марки 200. Это указывает на опасность такого рода разрушений термически упрочненной арматуры в бетоне при попадании на нее блуждающих токов или токов утечки.

Очевидно, что до основательной проверки способности многих агрессивных сред вызывать коррозионное растрескивание следует ограничивать применение конструкций с арматурой, склонной к растрескиванию, условиями, в которых последнее заведомо исключено, т.е. рекомендуется применять их лишь в неагрессивных средах.

§ 12. Водородное охрупчивание

Внешне одинаково с коррозионным растрескиванием (рис. 38) проявляется водородное охрупчивание высокопрочных сталей: также образуются поперечные трещины и происходят хрупкие, без образования шейки, обрывы напряженных элементов. Однако механизм разрушения здесь иной. Он связан с образованием при некоторых неопасных самих по себе коррозионных процессах на поверхности атомарного водорода, который, диффундируя в сталь и рекомбинируясь в молекулы, теряет способность растворяться в стали и создает большие внутренние давления (водородное охрупчивание металлов может происходить также вследствие выделения водорода на катоде при работе гальванических пар и при катодной

защите). Возникающие при этом значительные местные напряжения в сочетании с малой деформативностью высокопрочных сталей и большими растягивающими напряжениями в арматурных элементах вызывают быстрое развитие трещин, заканчивающееся хрупким обрывом.

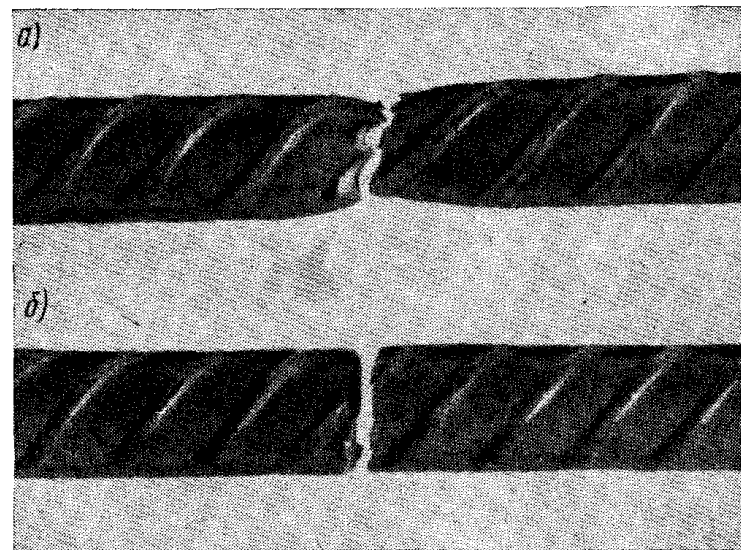


Рис. 38. Характер обрыва термоупрочненной арматуры

а — от продольной нагрузки без агрессивной среды; б — от действия агрессивной среды при напряжении 0,7 от предела прочности

В обычных случаях образующийся атомарный водород рекомбинируется в молекулярный за весьма короткое время, если этот процесс не тормозится так называемыми катализаторными ядами. Одним из известных катализаторных ядов является сероводород, который может образоваться, например, в результате реакции между сульфидом кальция, содержащимся в цементах, и углекислым газом ($\text{CaS} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{S}$), либо проникать к арматуре из окружающей среды через неплотности и трещины бетона. Сероводород

часто встречается в различных технологических процессах. Он выделяется, например, в атмосферу прядильных цехов предприятий искусственного волокна, образуется в канализационных трубах, резервуарах и пр.

В ФРГ проблема водородной хрупкости арматурной стали изучалась в связи с авариями предварительно напряженных железобетонных плит покрытий, изготовленных на плавном глиноземистом цементе [199, 220]. Часть плит была армирована холоднотянутой, часть — термически упрочненной проволокой. В 1961—1962 гг. в г. Бауэрне обрушились перекрытия шести животноводческих помещений. Балки перекрытий из бетона на глиноземистом цементе были армированы термически упрочненной напряженной проволокой. Исследования показали, что в немецком глиноземистом цементе содержание сульфидов превышает норму на 1,3%. Конструкции находились во влажной среде, насыщенной CO_2 . Защитный слой местами составлял лишь несколько миллиметров. Вследствие карбонизации произошла частичная потеря пассивности арматуры, а коррозия в присутствии сероводорода вызвала хрупкое разрушение стали. На проволоке были обнаружены многочисленные трещины при незначительной поверхностной коррозии у мест их образования.

Г. Рем [213] объясняет появление трещин в арматуре водородным охрупчиванием, связанным с образованием сероводорода по приведенной выше реакции. Глиноземистый цемент из-за недостатка в нем окиси кальция образует цементный камень со слабощелочной реакцией (рН около 9). При таких значениях рН и значительном количестве сульфида кальция может образоваться сероводород, при взаимодействии которого с железом выделяется атомарный водород, вызывающий охрупчивание:



Эта реакция идет на катодных участках, где, согласно И. Л. Розенфельду [107], поверхностно-активные ионы HS^- , адсорбируясь на поверхности металла, смещают в отрицательную сторону потенциал и уменьшают перенапряжение водорода. По данным некоторых исследователей [163, 229], в водном растворе сероводорода очень быстро растрескивается термически упрочненная проволока. Холоднотянутая проволока также рвется до-

вольно быстро. Такое же действие оказывает наложенный на образец катодный ток в слабом растворе серной кислоты.

По результатам наших испытаний [8], в насыщенном водном растворе сероводорода, а также в растворе роданистого аммония при комнатной температуре напряженная термически упрочненная арматура подвергалась быстрому хрупкому разрушению. Высокопрочная холоднотянутая проволока оказалась значительно более стойкой. Разрушение напряженных образцов в растворе сероводорода происходило значительно быстрее при наложении катодного тока, что характерно для водородного охрупчивания.

Г. Рем указывает на возможность развития водородной хрупкости арматуры в предварительно напряженных конструкциях, если высокопрочная сталь будет контактировать с оцинкованными деталями, образуя макрогальваническую пару, в которой на стальном катоде будет выделяться водород. В бетоне с низким значением рН, в частности при использовании глиноземистого цемента, где к тому же образуется катализаторный яд — сероводород, этот процесс особенно опасен.

Т. Кахилл [154] указывает на опасность водородного охрупчивания высокопрочной проволоки, имеющей защитное цинковое покрытие, и не рекомендует защищать оцинковкой высокопрочную сталь, работающую при высоких напряжениях. В лабораторных экспериментах обрывы напряженной проволоки в присутствии цинка и соленой воды происходят очень быстро, если на проволоке есть трещина или надрез. Такая же напряженная проволока, обрызгиваемая соленой водой в отсутствие цинка, не разрывается в течение более 10 000 ч.

На опасность водородного охрупчивания оцинкованной арматуры указывают и некоторые другие исследователи [158]. Во Франции запрещено использовать добавки алюминиевой пудры в раствор для инъектирования каналов с предварительно напряженной арматурой, чтобы избежать насыщения ее водородом. Однако эти опасения нуждаются в тщательной проверке.

По-видимому, реальная опасность водородного охрупчивания высокопрочной арматуры существует при использовании конструкций в промышленных зданиях, где в процессе производства выделяется сероводород,

или используются растворы роданистого аммония, как это имеет место на предприятиях искусственного волокна, коксохимических заводах и пр.

§ 13. Меры предупреждения хрупкого коррозионного разрушения

Важным направлением в борьбе с опасностью коррозионного растрескивания термически упрочненных арматурных сталей является снижение склонности их к растрескиванию путем изменения химического состава и структуры сталей, которая в значительной степени определяется режимом упрочнения. На возможность снижения склонности к растрескиванию путем легирования алюминием и хромом указывают некоторые авторы [198, 203].

По сообщению В. Енихе [181], западногерманская фирма «Рейнхаузен» в результате больших исследований сумела уменьшить склонность термически упрочненной стали к растрескиванию. При испытании в кипящем нитратном растворе время до растрескивания новой стали составило 1000—2000 ч против нескольких часов для обычной термически упрочненной стали. Результаты испытаний на водородное охрупчивание в растворе роданистого аммония приведены на рис. 39. Слева показано изменение во времени хрупкости ненапряженных образцов по значениям относительного удлинения и сужения, справа — время до растрескивания изогнутых образцов.

Ф. Дюма [166] сообщает о новой термически упрочненной стали с резко пониженной склонностью к коррозионному растрескиванию под напряжением. По его данным, это достигнуто путем уменьшения примерно наполовину содержания углерода и марганца с одновременным повышением в 3 раза содержания кремния и добавлением хрома в количестве, примерно равном содержанию углерода. При закалке сталь охлаждается в масляной ванне от 900 до 50°С. Отпуск осуществляется в свинцовой ванне с температурой, назначаемой в соответствии с химическим составом каждой плавки (обычно около 500°). Испытания такой стали показали, что ее стойкость против растрескивания в горячем нитрат-

ном растворе не уступает стойкости холоднотянутой проволоки и превосходит последнюю по стойкости в насыщенный раствор сероводорода.

Исследования, проведенные во Франции [158], показали, что момент хрупкого разрушения высокопрочной проволоки может быть значительно отдален, если удалить поверхностные дефекты и обезуглеродить поверхность стали. Обработанная пескоструйным аппаратом или электрополированная проволока при катодной поляризации в 0,1 н. растворе серной кислоты обрывалась через 20—30 ч, тогда как исходная с необработанной поверхностью — через 1 мин после начала опыта. Очень благоприятное действие оказало фосфатирование.

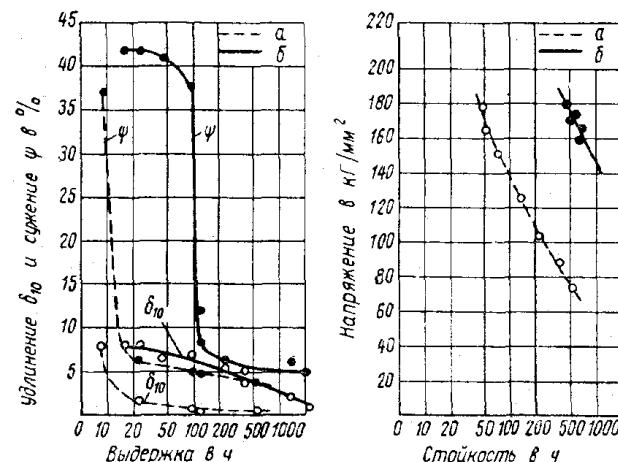


Рис. 39. Водородное охрупчивание термически упрочненной напряженной стали в растворе роданистого аммония. Сигма-сталь 145/160, толщиной 5,5 мм: а — старая, б — новая

Для уменьшения опасности коррозии под напряжением Ф. Дюма рекомендует строго отбраковывать арматуру, исключая применение хрупких сталей, ограничивая допуски в размерах и разброс физико-механических свойств. Он приводит данные о критическом напряжении, при котором возникает опасность коррозионного

растрескивания. По некоторым данным оно соответствует пределу выносливости, по другим составляет 40—50% предела прочности. Наклеп полезен только при волочении. Все другие виды наклепа вредны.

Придавая большое значение качеству исполнения конструкций, в частности тщательному инъецированию каналов как главному средству, обеспечивающему длительную сохранность арматуры, Ф. Дюма предлагает также использовать специальную защиту высокопрочной проволоки полимерными пленками на основе эпоксидных смол (в частности, смолы «эпикот»). Проведенные им испытания свидетельствуют об отличной адгезии пленки к стали и бетону, высокой трещиностойкости, прочности, обеспечивающей неповреждаемость при перевозке. Испытание образцов балок на изгиб показало увеличение сцепления гладкой арматуры с защитной пленкой на 100% и арматуры периодического профиля на 50%.

В заключение необходимо подчеркнуть, что из-за недостаточного знания коррозионного поведения высокопрочных арматурных сталей, с одной стороны, и неразработанности количественных характеристик защитных свойств бетонов, с другой, задерживается развитие и ограничивается применение предварительно напряженных конструкций с проволочной и прядевой арматурой, а также с термически упрочненными стержнями и катанкой.

При сочетании ряда благоприятных обстоятельств, т. е. если полностью исключить использование арматуры, имеющей коррозионные поражения, не добавлять в бетон хлористых солей и не допускать раскрытия трещин в конструкциях, при качественном изготовлении, уплотнении и выдерживании бетона казалось бы нет оснований опасаться развития коррозии арматуры, если среда не вызывает разрушения защитного слоя бетона.

Однако при проектировании конструкций необходимо считаться с возможностью образования при их изготовлении местных дефектов в бетоне защитного слоя, включая неполный контакт поверхности арматуры с бетоном (седиментационные полости под арматурой, воздушные зазоры, остающиеся при защите торкретированием арматуры, натягиваемой на конструкцию, не заполняемые цементным тестом места соприкосновения отдельных проволок в пряди). Особенно внимательно

следует относиться к применению конструкций, армированных высокопрочной проволокой, прядями и канатами, из-за опасности быстрого коррозионного разрушения тонких проволок в агрессивной среде.

Высказанные соображения относятся к наиболее часто встречающейся общей равномерной или язвенной коррозии. Специфическая коррозия в виде растрескивания под напряжением и водородного охрупчивания представляет принципиально большую опасность. По имеющимся экспериментальным данным она может проявляться в весьма ограниченном числе случаев. Но это не должно успокаивать, так как явления еще недостаточно изучены, не имеют единой теории и поэтому пока не могут быть надежно прогнозированы.

Учитывая многообразие видов современных бетонов и условий эксплуатации конструкций, нельзя считать, например, что опасность специфических видов коррозии высокопрочных арматурных сталей существует лишь в бетонах на некоторых глиноземистых цементах. По-видимому, эта опасность может проявляться и при использовании в бетоне доменных шлаков, сульфидные соединения которых способны к превращениям с образованием сероводорода, и при применении конструкций из обычного бетона в производственных зданиях, где технологический процесс сопровождается выделением сероводорода.

Повышенная опасность внезапного разрушения предварительно напряженных железобетонных конструкций в случае коррозии арматуры из высокопрочной проволоки, термически упрочненных стержней и катанки заставляет четко определить условия, при которых конструкции с такой арматурой могут применяться в агрессивных средах.

Очевидно, что конструкции с такой арматурой могут применяться в средах малой агрессивности при особо тщательной защите.

Необходимо глубокое изучение механизма коррозионного растрескивания арматурных сталей под напряжением с тем, чтобы можно было предвидеть способность той или иной среды вызывать такое разрушение.

ЗАЩИТА АРМАТУРЫ ОБЫЧНЫХ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

§ 14. Выбор видов конструкций и армирования, назначение толщины защитного слоя и плотности бетона

В процессе проектирования железобетонных конструкций в отличие от металлических нельзя использовать такой способ учета коррозионного воздействия, как увеличение сечения арматуры на коррозию. При оценке результатов экспериментов по коррозии арматуры в бетоне грубой ошибкой является использование известной шкалы коррозионной стойкости металлов [34].

Проектируя металлоконструкции, иногда допускают такой способ учета коррозионного воздействия среды, как увеличение сечений на коррозию в течение расчетного срока службы по имеющимся в литературе данным о скорости коррозии данного металла в той или иной среде [23]. Другой особенностью металлоконструкций в отличие от железобетонных является возможность неоднократного за время их службы возобновления защитных покрытий в зависимости от их фактического состояния, которое может быть установлено в любой момент благодаря легкости осмотра. Судить же о состоянии арматуры железобетонных конструкций можно лишь по косвенным признакам. Если она корродирует в бетоне, то до определенной стадии развития коррозии это происходит без внешних признаков. Обычно коррозия становится заметной, когда под давлением толстого слоя ржавчины образуются трещины в бетоне. Естественно, что какой бы ни был запас в сечении арматуры из расчета на ту или иную скорость коррозии ее в бетоне, такой способ учета агрессивности среды по отношению к железобетонной конструкции непригоден, так как в результате коррозии арматуры не просто уменьшается ее сечение, а нарушается монолитность конструкции и изменяется ее расчетная схема. При этом необходимо помнить, что ремонт железобетонных конструкций, пострадавших от коррозии

арматуры, сложен и редко достигает цели. Для получения длительного эффекта ремонтных мероприятий (прекращения процесса коррозии арматуры) необходимо полное удаление продуктов коррозии с поверхности арматуры и обволакивание ее свежим бетоном, что, очевидно, не всегда возможно даже при самом тщательном выполнении работ.

Железобетонные конструкции должны проектироваться и выполняться с расчетом на их длительную работу в течение всего срока службы сооружения. Предусматривать возможность какой бы то ни было степени коррозии арматуры недопустимо.

Одной из основных задач проектировщика является снижение степени агрессивности среды путем уменьшения вредных выделений газов, паров и аэрозолей в атмосферу цеха, а также попадания технологических растворов на конструкции. С этой целью должна быть обеспечена возможно более полная герметизация оборудования, аппаратуры и коммуникаций, эффективная система местного отсоса и общей приточно-вытяжной вентиляции.

Специально разработанных норм допустимого содержания вредных агентов в атмосфере с точки зрения их воздействия на строительные конструкции не существует. Имеются санитарные нормы проектирования промышленных предприятий [120], регламентирующие содержание таких агентов с точки зрения их влияния на здоровье человека. Однако необходимо помнить, что санитарные нормы определяют допустимое содержание вредных веществ лишь в рабочей зоне, там, где находятся люди в процессе обслуживания оборудования. Фактически же конструкции вне рабочей зоны могут подвергаться воздействию во много раз более высоких концентраций агрессивных веществ. Другим важным обстоятельством является то, что санитарные нормы не регламентируют влажности воздуха, поскольку повышенная влажность (до известных пределов) не вредит здоровью людей. На конструкции же, как мы видим из многочисленных примеров, повышенная влажность влияет резко отрицательно как сама по себе, так и вследствие интенсификации действия газов во влажной среде (сухие газы, как правило, значительно менее опасны для конструкций). Особенно опасна влага для ограждающих конструкций, где она может накапливаться в результате миграции под действием потенциалов переноса вещества в капиллярно-пористых

телах. Поэтому особое внимание при проектировании (а также и при эксплуатации зданий) следует обращать на снижение влажности воздуха.

Очень трудно, конечно, учесть, но необходимо при проектировании иметь в виду возможность повышения степени агрессивности среды в результате интенсификации производственных процессов.

Таким образом, первой задачей проектировщика является правильная оценка агрессивных воздействий, которыми будут подвергаться конструкции.

Следующей задачей является выбор наиболее подходящего в данных условиях типа конструкции, конструктивных форм и деталей, от которых может зависеть ее долговечность. Одним из основных принципов должно быть стремление к сокращению поверхности конструкций. С этой точки зрения сплошные несущие конструкции имеют преимущество перед решетчатыми. Следует отдавать предпочтение конструкциям более простых форм и сечений без консолей, выступов и полок, на которых обычно скапливается агрессивная пыль. Такие конструкции, кроме того, легче и надежнее защитить от воздействия агрессивной среды различного рода покрытиями. В перекрытиях влажных цехов, в верхних строениях причальных гидротехнических и тому подобных сооружений безбалочные конструкции имеют явные преимущества перед ребристыми, так как в последних создаются застойные, трудно проветриваемые зоны, где могут скапливаться агрессивные газы и пары. Применяемые в мостовых конструкциях балки коробчатого сечения должны иметь устройства для проветривания.

Если это допускается условиями эксплуатации, конструкция зданий должна обеспечивать защиту железобетона от периодических увлажнений, а также допускать возможность осмотра и ремонта ее отдельных элементов, возобновления защитных покрытий без остановки производственных процессов.

При решении вопроса о применении предварительно напряженных конструкций в агрессивной среде необходимо учитывать, что вследствие большой трещиностойкости эти конструкции должны быть более коррозионностойкими. Однако при использовании для их армирования тонкой высокопрочной проволоки в случае возникновения коррозии значительно возрастает степень опасности разрушения конструкции из-за сильно развитой по-

верхности арматуры. Подобным образом коррозионно-опасны конструкции с термически упрочненной стержневой арматурой и катанкой, поскольку последние имеют склонность к коррозионному растрескиванию под напряжением, т. е. могут внезапно подвергаться хрупкому обрыву в результате действия агрессивных веществ, содержащихся в окружающей среде либо в бетоне.

Ограничение применения высокопрочной проволоочной арматуры, прядей и канатов [133] должно распространяться и на термически упрочненную стержневую арматуру и катанку. Поэтому в агрессивных средах необходимо отдавать предпочтение предварительно напряженным конструкциям со стержневой горячекатаной арматурой возможно больших сечений, натягиваемой на упоры или формы. Не следует применять составные предварительно напряженные конструкции с арматурой из пучков высокопрочной проволоки, размещаемой в инъецируемых каналах.

Указаниями [123] предусматривается расчет железобетонных конструкций по первой и второй категориям трещиностойкости в случае армирования их термически упрочненными стержнями и катанкой, а также арматурой из высокопрочной проволоки (в виде струн, прядей, пучков и канатов) независимо от степени агрессивности среды. Конструкции, армированные термически упрочненными стержнями и катанкой, в сильноагрессивных средах применять не разрешается [125]. При армировании стержневой горячекатаной арматурой категория расчета и допускаемое раскрытие трещин назначаются в зависимости от влажности и агрессивности среды (табл. 35).

Не допускается применение арматурной проволоки диаметром менее 4 мм для ненапрягаемой арматуры железобетонных элементов и в предварительно напряженных конструкциях, рассчитываемых по третьей категории трещиностойкости, находящихся под действием агрессивных сред. В арматурных прядях и канатах нельзя применять высокопрочную проволоку диаметром менее 2,5 мм.

Согласно Указаниям [123], в случае применения в железобетонных конструкциях проволоочной, прядевой и канатной арматуры с натяжением на бетон в проекте должно быть указано предельное время пребывания такой арматуры в напряженном состоянии без защиты бетоном

Таблица 35

Требования к расчету и конструированию железобетонных конструкций в зависимости от влажности и агрессивности среды

Характеристика среды		Категория трещиностойкости или раскрытие трещин в мм при стержневой горячекатаной арматуре		Толщина защитного слоя бетона у арматуры в мм для конструкций и их элементов		Максимально допустимое водоцементное отношение***
влажность в %	агрессивность газов	ненапрягаемой	напрягаемой	плиты, полки, ребристых плит, стенки балок, стеновые панели	балки, фермы, колонны, ребра плит, стойки и др.	
>75	Нет	0,2	0,2	15	20**	0,60
61—75	Слабая	0,2	0,2	15	20	0,60 (0,54)
>75	»	0,2	0,1	15	20**	0,54
<60	Средняя	0,2	0,2	10*	20	0,60 (0,54)
61—75	»	0,2	0,1	15	20**	0,54
>75	»	II категория		20	25	0,54 (0,45)
<60	Сильная	0,2	0,1	15	20	0,54
61—75	»	II категория		20	25	0,54 (0,45)
>75	»	То же		20	25	0,45

* При применении в плитах арматуры из высокопрочной проволоки толщина защитного слоя принимается не менее 15 мм.

** При использовании арматуры из высокопрочной проволоки, термически упрочненной стержневой арматуры и катанки толщина защитного слоя бетона у арматуры должна быть не менее 25 мм; допускается снижение толщины защитного слоя до 20 мм при условии повышения плотности бетона на одну ступень, т. е., например, при снижении V/C с 0,6 до 0,54.

*** В скобках приведены значения водоцементного отношения для конструкций с арматурой из высокопрочной проволоки, а также с термически упрочненной стержневой арматурой и катанкой.

или раствором (не более 1 месяца) либо средства временной защиты ее до инъецирования каналов (просушивание каналов сухим воздухом; создание в них атмосферы, насыщенной летучими ингибиторами, и др.).

В состав растворов, применяемых для инъецирования и замоноличивания швов сборно-монолитных конструкций с напрягаемой арматурой, нельзя вводить хлористые соли и добавки, выделяющие водород.

В соответствии с Указаниями [123] термически упрочненная стержневая арматура класса Ат-IV и выше, термически упрочненная катанка, а также другие виды арматурной стали, проявляющие склонность к коррозионному растрескиванию под напряжением, не должны применяться в предварительно напряженных железобетонных конструкциях, работающих в газовых средах, содержащих хлористый водород, сероводород, пыль хло-

ристых солей, а также при возможности воздействия на них жидких сред, содержащих азотнокислые и роданистые соли, ионы хлора и различные кислоты.

В зависимости от влажности и агрессивности среды назначается минимальная толщина защитного слоя бетона у арматуры в соответствии с табл. 35. При этом для монолитных конструкций необходимо увеличивать защитный слой на 5—10 мм против табличных значений. При больших диаметрах и специальных профилях арматуры толщина защитного слоя назначается в соответствии со СНиП II-B. 1-62.

Для несущих конструкций из конструктивных легких бетонов марки 200 и выше толщина защитного слоя бетона у арматуры принимается: при использовании их в неагрессивной среде как для конструкций из тяжелого бетона, а в слабоагрессивной увеличивается на 10 мм. В средне- и сильноагрессивной среде требуется специально разработанная защита этих конструкций. При любой степени агрессивности среды в таких конструкциях нельзя применять арматуру из высокопрочной проволоки, термически упрочненных стержней и катанки.

В стеновых панелях из легкого бетона величина защитного слоя бетона у арматуры должна быть не менее 20 мм, а для конструкций из ячеистого бетона — не менее 25 мм.

Толщина защитного слоя бетона у арматуры специальных конструкций назначается в соответствии с требованиями специальных норм. Например, для конструкций в зоне переменного уровня моря толщина защитного слоя назначается не менее 5 см [133], а при диаметре арматуры более 24 мм — не менее 2,5 диаметра.

В связи со все возрастающим применением сборного железобетона и типовых конструкций в промышленном и гражданском строительстве возникает необходимость использования других способов усиления защиты арматуры при применении этих конструкций в агрессивных условиях.

В самом деле, мы должны исходя из требования увеличения толщины защитного слоя либо изменять конструкцию типовых элементов, сохраняя их наружные габариты, либо переделывать всю технологическую оснастку, чтобы иметь возможность изменить их наружные размеры. И то и другое нежелательно. Очевидно, что для увеличения толщины защитного слоя в монолитных и не-

типовых сборных конструкциях не может быть серьезных препятствий. Однако и в этом случае увеличение толщины слоя не является единственным и лучшим способом защиты арматуры.

Как было показано выше (см. § 6), увеличивая толщину защитного слоя в случае недостаточно плотного бетона, можно понизить его проницаемость и соответственно улучшить защитное действие лишь в 1,5—2 раза (т.е. пропорционально толщине), так как увеличивать толщину защитного слоя в несколько раз явно нецелесообразно из расчетных и конструктивных соображений: это приведет к излишнему утяжелению конструкций и увеличению раскрытия трещин.

Как показывают исследования, проведенные Ф. М. Ивановым [50], а также нами, значительно более эффективным мероприятием является повышение плотности бетона. Это следует как из многочисленных наблюдений за железобетонными конструкциями, так и из лабораторных опытов.

Нами были проведены опыты по ускоренной карбонизации образцов, изготовленных из цементно-песчаных растворов различного состава. Образцы в виде призм $4 \times 4 \times 16$ см изготавливали на белгородском портландцементе марки 400 и речном песке. Раствор уплотняли в металлических формах на лабораторной виброплощадке. После 28 суток нормального влажного хранения образцы выдерживались от 14 до 28 суток в сухом помещении лабораторной комнаты. Карбонизация производилась в герметическом сосуде, в который загружали образцы и подавали из баллонов углекислый газ под давлением до 3 ат. Продолжительность карбонизации определяли по контрольным образцам состава 1:3 путем ежедневной пробы фенолфталеином в свежем изломе. По достижении полной карбонизации контрольных образцов процесс карбонизации, занимавший 6—8 суток, прекращался; после этого определяли глубину ее во всех образцах данной партии.

Результаты опытов, представленные на рис. 40, дают возможность судить о влиянии состава или водоцементного отношения цементно-песчаного раствора на скорость его карбонизации.

Аналогичные опыты производились Ф. М. Ивановым, который для конкретных материалов и составов получил оптимальные значения водоцементного отношения, обес-

печивающие наибольшую плотность цементно-песчаных растворов. Для раствора состава 1:2 оптимальное $B/C = 0,35 \div 0,4$, для раствора 1:3 $B/C = 0,4 \div 0,45$.

Как избыток, так и недостаток воды при определенном способе уплотнения смесей приводят к увеличению пористости раствора. Для бетонных смесей также существуют оптимальные значения водоцементного отношения, дающие наиболее плотную структуру, однако с учетом возможностей уплотнения при укладке они, очевидно, должны быть несколько выше указанных.

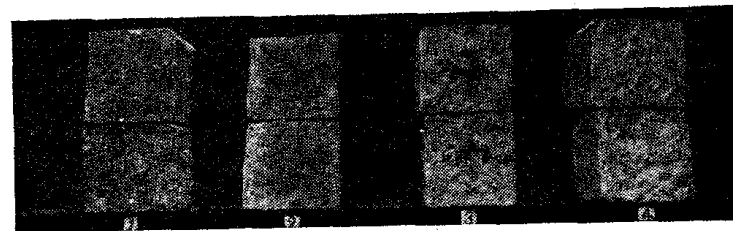


Рис. 40. Карбонизация призм из раствора разного состава
1—1:1; 2—1:2; 3—1:3; 4—1:4

Итак, в первом приближении плотность бетона определяется величиной водоцементного отношения (хотя нельзя забывать, что, как это было показано выше, она зависит от многих технологических факторов). Указания [123] предусматривают максимальные значения B/C в зависимости от условий эксплуатации конструкций и вида арматуры. Для конструкций со стержневой порячкатаной арматурой значения B/C приведены в табл. 35, для конструкций с термически упрочненной стержневой арматурой и катанкой, а также с арматурой из высокопрочной проволоки значения B/C в необходимых случаях следует уменьшить.

При решении вопроса о применении тех или иных видов железобетонных конструкций и их защите необходимо учитывать влажностный режим воздуха помещений и характер агрессивных загрязнений его. В качестве примера приведем два конкретных случая.

На строительстве второй очереди Новокузнецкого алюминиевого завода в корпусах электролиза были применены железобетонные предварительно напряженные фермы пролетом 27 м. Арматура нижнего пояса представляла собой пучки высокопрочной проволоки диаметром 5 мм. Ввиду непрерывного выделения в процессе

электролиза алюминия значительных количеств фтористого водорода и некоторых других газов (содержание фтористого водорода в атмосфере корпусов электролиза достигает 0,08 мг/л в рабочей зоне, а на уровне ферм в несколько раз превышает эту величину) возникало сомнение в долговечности ферм с проволоочной арматурой.

После исследования состояния железобетонных конструкций в корпусах электролиза первой очереди завода, срок службы которых достигает 15 лет, было установлено, что повреждения конструкций происходят вследствие ряда причин, среди которых газовая среда играет ничтожную роль. Главными причинами повреждений являются недостатки конструкции и дефекты производства работ. Действие газов, и в частности фтористого водорода, ограничивается поверхностным слоем бетона, толщина которого по истечении указанного срока не превышает 10 мм и зависит в значительной степени от фактической плотности бетона. Химический анализ многочисленных проб бетона показал, что значительное весовое содержание фтора ограничивается тонким наружным слоем бетона (до 5%) и уже на глубине 10 мм от поверхности резко падает до величины, которая может быть обнаружена в бетоне, не подвергавшемся действию фтористого водорода (0,1—0,3%). Весовая влажность бетона равна 1—2%.

Вследствие значительного выделения тепла и полного отсутствия выделений влаги в корпусах электролиза алюминия воздушная среда их отличается низкой влажностью. Относительная влажность воздуха в теплое время года находится обычно в пределах 40—50%. Поэтому воздушная среда электролизных корпусов практически не агрессивна по отношению к железобетонным конструкциям и, в частности, к арматуре. Процесс поглощения фтористого водорода капиллярно-пористым телом бетона (фторизация) идет, видимо, как и карбонизация, с различной скоростью в зависимости от степени увлажнения бетона. Малая влажность бетона, очевидно, сильно замедляет фторизацию. Арматура, находящаяся в сухом бетоне, не корродирует. Более того, даже в тех местах, где она лишена защитного слоя вследствие механических повреждений бетона, арматура также не корродирует. В то же время имеются сведения об интенсивном разрушении бетона и коррозии арматуры при систематическом

протекании кровли и увлажнении железобетонных конструкций покрытия.

Проведенное исследование позволило установить, что при условии исправности кровель в корпусах электролиза предварительно напряженные железобетонные конструкции не подвергаются опасности коррозии.

Другой случай является примером недооценки агрессивности среды. Кровельное покрытие плавильного цеха, выполненное из сборных железобетонных плит типа Р-2 по стальным фермам и прогонам, за 13 лет эксплуатации получило серьезные повреждения в результате коррозии арматуры плит. До 8% плит имеют продольные трещины в ребрах, отколы защитного слоя бетона и обнажения арматуры, покрытой слоем ржавчины значительной толщины. Анализ отобранных проб бетона из защитного слоя ребер плит показал наличие в нем до 6% ионов SO_4^{2-} , до 4% хлора и до 0,6% фтора. Слой нейтрализован, т.е. лишен нормальной щелочности на глубину от 4 до 12 мм, имеет значительную влажность (от 2,7 до 5,4%) и водопоглощение от 4,5 до 7,2%.

Под слоем бетона без трещин коррозии арматуры, как правило, не наблюдается, в районе трещин глубина коррозии составляет около 0,5 мм, а при полном обнажении арматуры достигает 1,2 мм. Извлеченный из ребра плиты стержень имел образовавшуюся под действием коррозии шейку, сечение которой составляет около 40% первоначального сечения стержня.

Столь интенсивная коррозия стали вызывается агрессивностью атмосферы цеха, содержащей сернистый газ и пыль минеральных, главным образом хлористых, солей. Содержание сернистого газа в пробе воздуха, взятой на мостовом кране цеха, составило 0,0055 мг/л, а в рабочей зоне — 0,04 мг/л. Концентрация фтористого водорода в зоне крана равна 0,0028 мг/л. Эти газы, являясь кислыми, активно поглощаются пористым бетоном и приводят к его нейтрализации.

Несмотря на сухой режим воздуха в цехе, у поверхности конструкций скапливается влага. Это объясняется тем, что минеральная пыль, содержащая главным образом хлористые соли (3—6% CaCl_2 , 26—28% MgCl 19—21% KCl), оседает на поверхности конструкций и, будучи гигроскопичной, притягивает влагу из воздуха. Влага, насыщаясь солями, проникает в бетон и вызывает активную коррозию стали.

Таким образом, правильный выбор конструкции и армирования, назначение толщины защитного слоя и, главное, увеличение плотности бетона в соответствии со степенью агрессивности среды, а также регулирование свойств самой среды позволяют повысить надежность защиты от коррозии арматуры железобетонных конструкций.

§ 15. Особенности технологии изготовления железобетонных конструкций, обеспечивающие сохранность арматуры

Процесс изготовления железобетонных конструкций в значительной степени определяет их долговечность, которая зависит от того, насколько выполненная конструкция соответствует проекту и техническим условиям на производство работ. Имеется в виду правильное расположение арматуры, чистота ее поверхности, применение надлежащим образом подобранного состава бетона, правильная его укладка и уход за твердеющим бетоном.

Строительные нормы и правила требуют применения арматуры, очищенной от грязи, масла и слоистой ржавчины, отпадающей при ударе молотком. Легкий налет ржавчины, как показывает многолетняя практика, не оказывает вредного влияния на состояние арматуры в конструкции. Слоистая ржавчина на арматуре, заложенной в бетон, как было показано выше, способствует развитию коррозии ее в бетоне. Применение такой арматуры недопустимо.

В соответствии со СНиП I-B.4-62 [127] арматурную сталь надо хранить на стеллажах в закрытых помещениях или под навесами, а высокопрочную проволоку — обязательно в сухих закрытых складах, причем воспрещается укладывать мотки, рулоны и пакеты на земляной пол.

Особенно важно предохранить от коррозии до употребления в дело высокопрочную арматурную проволоку, которая значительно быстрее, чем более толстая стержневая, уменьшается в сечении в результате коррозии. Такая проволока нуждается в защитной упаковке на время перевозки и хранения. Нами были проверены защитные упаковки с летучими ингибиторами. После перевозки и хранения проволоки с апреля по сентябрь под открытым небом состояние ее в упаковке с ингибиторами было на-

много лучше, чем в упаковке без ингибиторов; неупакованная бухта подверглась интенсивной коррозии [5].

Недостатком примененной упаковки явилось неравномерное распределение ингибитора. Очевидно, что результаты были бы лучше при упаковке в ингибированную бумагу. Такая бумага получается путем пропитки обычной упаковочной бумаги растворами ингибиторов.

Фосфатный летучий ингибитор [59] является самым дешевым из всех известных летучих ингибиторов. Стоимость 1 кг порошка 17,3 коп. При пропитке бумаги 15%-ным раствором такого ингибитора защита деталей обеспечивается в течение трех лет и более. При этом допускается хранение деталей даже при 100%-ной влажности воздуха, но при температуре не выше 40°С.

Чрезвычайно важным требованием является правильное назначение и точное выдерживание принятой толщины защитного слоя бетона у арматуры. Для фиксирования проектного положения арматуры нормы проектирования [128] наряду с бетонными прокладками допускают применение подставок и других устройств из стали. Более правильны рекомендации Технических условий на изготовление и приемку сборных железобетонных и бетонных изделий [121], запрещающие применение в качестве подкладок под арматуру обрезков стали или изделий из стали. Использование стальных фиксаторов снижает долговечность конструкций в агрессивной среде. Последующее оштукатуривание конструкций не исключает опасности коррозии арматуры при применении стальных прокладок, так как слой штукатурки не может быть равноценным слоем бетона. Необходимо отказаться от оштукатуривания конструкций, предназначенных к эксплуатации в условиях агрессивных воздействий. Эти конструкции следует выполнять с особой тщательностью в смысле обеспечения требуемой толщины защитного слоя бетона у арматуры, хорошего уплотнения бетона и получения ровной и гладкой (без раковин) наружной поверхности.

Надлежащая толщина защитного слоя бетона у арматуры как на горизонтальных, так и на вертикальных поверхностях конструкций должна достигаться за счет применения специально изготавливаемых прокладок из цементно-песчаного раствора, которые прикрепляют к арматуре (рис.41). Удобство такой прокладки заключается в том, что она может быть надежно закреплена на

арматуре при помощи пропущенной в специальное отверстие вязальной проволоки. Прокладка пригодна как для потолочных (нижняя плоскость балок, плит), так и для вертикальных поверхностей (боковые плоскости балок, колонн). Изготавливают такие прокладки выпрессовкой раствора через мундштук.

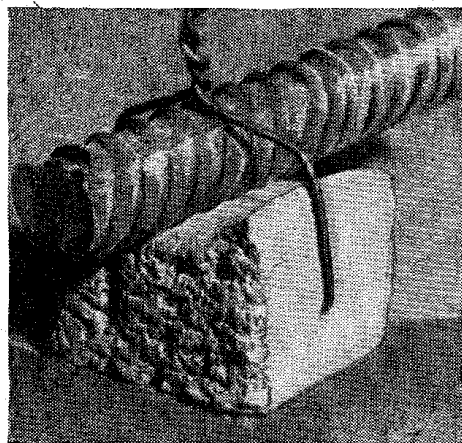


Рис. 41. Прокладка из раствора с вязальной проволокой

В последнее время появились разнообразные фиксаторы из пластмасс (рис. 42), которые весьма удобны для установки, так как их закрепление на арматурных стерж-



Рис. 42. Пластмассовые фиксаторы арматуры

нях достигается упругим защелкиванием. Однако наши опыты показали, что такие фиксаторы, могут быть причиной местных коррозионных поражений арматуры, так как в растянутой зоне бетона трещины в первую очередь образуются в местах расположения пластмассовых фик-

саторов. Поэтому для конструкций в условиях, способствующих коррозии арматуры, преимущественно следует применять фиксаторы из цементно-песчаного раствора. Исключение может быть сделано для полок ребристых плит и стеновых панелей, где для фиксирования положения тонких и гибких арматурных сеток требуется установка значительного количества фиксаторов, которые практически не ослабляют сечения бетона.

Плотная укладка бетона может быть достигнута при соблюдении необходимых требований в отношении подвижности бетонной смеси, сохранения ее консистенции и однородности при транспортировании и подаче в опалубку, а также при соответствии наибольшей крупности заполнителя размерам конструкции и расположению арматуры.

Для получения хорошего бетона, без раковин в защитном слое (особенно в подверженной агрессивным воздействиям нижней части балок, где располагается растянутая рабочая арматура) очень важно следить за тем, чтобы наибольшая крупность зерен заполнителей не превышала $\frac{1}{3}$ наименьшего размера конструкции, $\frac{3}{4}$ расстояния (просвета) между стержнями арматуры и $\frac{2}{3}$ толщины защитного слоя.

При условии выполнения этих требований, а также при соблюдении правил послойной укладки бетона с обязательным уплотнением его вибрированием поверхностные дефекты конструкций могут возникнуть лишь в редких случаях. При обнаружении таких дефектов во время распалубки их следует сразу же тщательно заделать. Поверхности с мелкими раковинами, не имеющие общей порозоватости, после распалубки и осмотра техническим персоналом с участием лаборанта надо немедленно затирать цементным раствором состава 1:2 — 1:2,5. Предварительно поверхность очищают проволочными щетками или пескоструйным аппаратом и промывают струей воды под напором. Поверхностные трещины и крупные раковины следует сразу же после распалубки очищать на всю глубину, удаляя слабый бетон и отдельные выступающие зерна заполнителя; после этого поверхность бетона очищают проволочными щетками, промывают струей воды под напором (или продувают сжатым воздухом) и заделывают раковины бетоном той же марки, что и в конструкции, но с более мелким заполнителем; при этом смесь тщательно уплотняют. Крупные каверны за-

дельвают торкретированием или бетонированием под давлением. Все отремонтированные конструкции необходимо дополнительно выдерживать в теплой влажной среде, укрывая мешковиной, рогожами и регулярно поливая водой при температуре не ниже 15°C в течение не менее 7 суток.

Как указывалось ранее, чрезвычайно важным для получения хороших защитных свойств бетона по отношению к арматуре является соблюдение влажного режима твердения бетона. Минимальные сроки и способы увлажнения поверхностей железобетонных конструкций приводятся в Технических условиях и инструкции [132].

Режим пропаривания сборных железобетонных конструкций, предназначенных для работы в условиях, способствующих коррозии арматуры, должен включать в себя предварительное выдерживание изделий после формирования при температуре не ниже 15°C не менее 2—4 ч и уточняться в лаборатории с учетом свойств применяемых цементов. Чтобы с поверхности свежесформованных изделий не испарялась вода, их следует покрывать листами резины, полимерными пленками и пр.

Скорость подъема температуры в камере при пропаривании немассивных конструкций в формах не должна превышать 20 град/ч, а при пропаривании массивных — 10 град/ч. Максимальная температура прогрева — не выше 70°C . На всех этапах пропаривания относительная влажность в камере не должна быть менее 95%, в том числе и при охлаждении, скорость которого составляет 15—20 град/ч.

Для повышения плотности и однородности бетона рекомендуется вводить в бетон пластифицирующие добавки, наиболее распространенной из которых является сульфитно-спиртовая барда. Порядок применения пластифицирующих добавок определяется соответствующей инструкцией [55].

Добавки — ускорители твердения бетона необходимо использовать очень осторожно. До сих пор наиболее эффективными и доступными ускорителями являются хлориды CaCl_2 , NaCl , HCl . Кроме того, СНиП I-B.2-62 [129] указывает на возможность применения молотой негашеной извести, сернокислого глинозема и поташа. Теми же нормами предусматривается ограничение в применении добавок CaCl_2 и HCl :

а) для неармированных и конструктивно-армирован-

ных конструкций — соответственно не более 3 и 2% веса цемента;

б) для конструкций, армированных по расчету, — не более 2 и 1,5%.

Не разрешается вводить добавки в бетоны для изготовления:

а) предварительно напряженных конструкций с проволочной арматурой диаметром 5 мм и менее;

б) железобетонных конструкций, предназначенных для эксплуатации при относительной влажности воздуха выше 60%;

в) изделий автоклавного твердения.

Эти ограничения вызваны опасностью коррозии арматуры (прочие ограничения вызваны другими соображениями и здесь не приводятся).

Как показали исследования, хлористый кальций усиливает опасность коррозии арматуры в железобетонных конструкциях под действием блуждающих токов. Поэтому «Указания по защите железобетонных конструкций электролизных цехов от коррозии, вызываемой блуждающими токами» [122] запрещают вводить хлористый кальций в бетон для таких конструкций.

Согласно СНиП III-B.1-62 [130], нельзя вводить в бетон для железобетонных конструкций хлористые соли в количестве более 2% веса цемента с целью получения твердеющих на холоду смесей. Исключение могут составить конструкции, постоянно и целиком находящиеся под водой. Запрещение необходимо распространить также на бетон для замоноличивания стыков сборно-монолитных железобетонных конструкций и для бетонирования стальных каркасов.

Необходимо особо остановиться на технологии формирования и твердения изделий в заводских условиях. В последние годы в практике заводского изготовления сборных железобетонных конструкций широко применяются жесткие бетонные смеси. Для укладки и уплотнения таких смесей требуются мощные виброплощадки, часто необходима дополнительная вибропригрузка. Тем не менее нередко случаи получения изделий с недостаточно уплотненным бетоном. Тот же недостаток имеют железобетонные конструкции из мелкозернистого бетона, получаемые способом вибропроката. В последнем случае бетон приобретает повышенную пористость в результате жесткого режима прогрева. При изготовлении железобетонных конструкций — соответственно не более 3 и 2% веса цемента;

бетонных конструкций из жестких бетонных смесей для агрессивных условий службы необходим строгий контроль за уплотнением. Конструкции с недостаточно уплотненным бетоном не могут быть использованы без дополнительных сложных защитных мероприятий.

На некоторых заводах железобетонных изделий при изготовлении мелких ребристых плит (ГОСТ 514—48) и других изделий пользуются способом так называемой немедленной распалубки. При этом часто наблюдаются дефекты в изделиях: трещины, разломы в свежееуплотненном бетоне. Больше всего повреждаются опорные части плит. Происходят местные пластические деформации свежееотформованного изделия, которым в какой-то мере сопротивляется упругий арматурный каркас. В результате каркас смещается относительно бетона, нарушается сцепление его с арматурой. Часто наблюдаются местные вспучивания бетона над арматурой, сопровождающиеся разломами защитного слоя, образованием трещин обычно вдоль ребер и обнажением арматуры в опорных частях плит. Такие дефектные плиты иногда встречаются в покрытиях промышленных зданий. Естественно, что при наличии хотя бы небольшой степени агрессивности среды арматура таких плит начинает интенсивно корродировать.

Представляет значительный интерес предосторожности, предусматриваемые нормами ГДР [169] при изготовлении предварительно напряженных конструкций с арматурой из высокопрочной проволоки и термоупрочненной катанки. Необходимо предохранять арматуру от увлажнения (перевозить в закрытых барабанах и хранить в сухих складах), а также от механических повреждений (не кидать при выгрузке). Рекомендуются как можно быстрее перерабатывать сталь после поставки, в особенности если при хранении не может быть обеспечена относительная влажность воздуха менее 60%. В таком случае сталь должна быть переработана в течение 8 недель. Перед употреблением в дело надо удалить с поверхности арматуры налет воздушной ржавчины и визуально убедиться в отсутствии деформаций, трещин, отклонений от профиля, закатов, механических повреждений.

Арматура не может оставаться без защиты от коррозии на открытом стенде более 24 ч, а в канале (при последующем натяжении) более 10 суток.

Напряженные пучки в каналах до инъецирования

защищают от влаги, плотно закрывая отверстия. В случае задержки инъецирования каналов свыше 10 суток необходимо создать в каналах защитную среду (жидкую или газообразную), в частности при помощи летучих ингибиторов.

Бетон для предварительно напряженных конструкций должен иметь марку не ниже 300, состав подбирают пробными замесами, обязательно проверяя плотность укладки. Объем пор не должен превышать 14%. Требования к режиму твердения обычные.

Не допускается затирка пористых мест для восстановления защитного слоя плотного бетона, а также обработка изделий веществами, реагирующими с бетоном и сталью. Не разрешается применять цемент, характеристика которого неизвестна, а также цементы, изготавливаемые с использованием отходов производства серной кислоты из гипса. Для складирования цемента необходимо предусматривать отдельные емкости. В одной конструкции, например сборно-монолитной, можно применять цемент только одного завода-поставщика. Добавки в бетон и инъекционный раствор должны быть свободны от хлоридов и сульфатов и иметь специальное удостоверение о безвредности для напряженной стали.

Заполнители не должны содержать водорастворимых частей, вступать во вредные реакции с цементом и иметь значительную пористость. Содержание растворимых хлоридов не должно быть выше 0,003% по весу. Заполнители следует разделять не менее чем на три фракции с хорошей гранулометрией. Использовать легкие пористые заполнители можно только после экспериментального подтверждения достаточной защиты арматуры таким бетоном.

Для затвердения бетона разрешается применять только чистую питьевую воду, содержание растворимых хлоридов в которой не должно превышать 0,05% при нормальном твердении бетона и 0,03% при пропаривании.

Водоцементное отношение не должно быть выше 0,45.

Защитный слой бетона у арматуры — не менее 30 мм, при заводском изготовлении в закрытом помещении — до 25 мм, а при стержневой арматуре — до 20 мм (на открытом воздухе — до 25 мм). Не разрешаются минусовые допуски для защитного слоя плит. Растягивающие напряжения в арматуре в любой момент не должны быть выше:

для термоупрочненной катанки St 140/160—
7 200 кГ/см²;

для высокопрочной проволоки — 6000 кГ/см².

Для проволоки напряжение может быть повышено до 8000 кГ/см², если опытами доказано, что при этом не превзойден предел текучести стали.

При стержневой арматуре St 60/90 диаметром более 19 мм в каждом элементе должно быть не менее четырех стержней. Для плоских плит требуется не менее пяти стержней на каждый метр ширины, для балок и ребристых конструкций — не менее трех стержней на каждое ребро. Прядевая арматура считается как один элемент. Диаметр одиночной проволоки должен быть не менее 3 мм.

Не допускается оцинковка напрягаемой арматуры, а также применение оцинкованных каналообразователей.

При волочении нельзя применять вызывающие коррозию смазочные средства, например медь. Рекомендуются избегать концентрации напряжений вследствие перегибов и изгибов напрягаемой арматуры. При сматывании в мотки диаметр их должен быть не менее 500 диаметров проволоки.

Предварительно напряженные конструкции, предназначенные для закрытых помещений, можно хранить не защищенными от осадков до 8 недель с момента изготовления. Независимо от назначения, такие конструкции нельзя укладывать незащищенными на землю или на основание, вызывающее коррозию.

Аналогичное предписание выпущено в 1963 г. в ФРГ [151]. В нем запрещается вводить хлористые соли в бетон для предварительно напряженных конструкций. Шлакопортландцемент можно применять в бетоне при содержании шлака не более 50%. Для инъецирования каналов разрешается только портландцемент средней тонкости помола. Содержание цемента в бетоне — не ниже 350 кг/м³, а $B/C \leq 0,5$. Предусматривается увеличение защитного слоя и не допускается раскрытие трещин при возможности химических воздействий на конструкции, а также влажного воздуха (в прачечных, хлевках и т. д.).

На перекрытиях из предварительно напряженных элементов нельзя устраивать полы на магнетиальном вяжущем. Последнее ограничение продиктовано необходимостью исключить попадание хлористых солей в бетон и к поверхности предварительно напряженной арматуры.

Здесь полезно привести пример из практики, когда на ребристых плитах покрытий ряда производственных помещений через 1—2 года после сдачи в эксплуатацию появились следы коррозии в виде постепенно увеличивающихся ржавых пятен, трещин и отколов бетона в местах с малой толщиной защитного слоя. Причиной этого явления было проникание в бетон хлор-ионов из расположенного сверху утеплителя, который представлял собой безавтоклавный ячеистый бетон, изготовленный с добавкой хлористого кальция. В процессе монтажа покрытий были длительные задержки с устройством кровельного ковра, утеплитель увлажнялся атмосферными осадками. В холодное время года в нем дополнительно конденсировалась влага воздуха помещений, так как пароизоляция не была предусмотрена ввиду нормального влажностного режима помещений. Переувлажненный утеплитель отдавал избыток влаги бетону плит.

Изготовление конструкций является решающим этапом, определяющим их долговечность. Какими бы совершенными ни были конструкции в проекте, как бы полно ни учитывались условия их службы, как бы тщательно ни проектировались составы бетонов, низкое качество изготовления может свести к нулю все предыдущие усилия. Поэтому на качество исполнения конструкций, особенно предназначенных к эксплуатации в агрессивных условиях, необходимо обращать серьезное внимание.

§ 16. Меры защиты армирующих сеток в армоцементных конструкциях

Армоцементными принято называть тонкостенные (толщиной 10—20 мм) конструкции, армированные несколькими слоями тонких тканых сеток из стальной проволоки диаметром 0,5—1 мм. При этом защитный слой из мелкозернистого (песчаного) бетона получается очень тонким — всего 2—4 мм. Каковы его защитные свойства и как гарантировать при изготовлении конструкций, что гибкие сетки не будут выходить на поверхность, как защитить их в этом случае — вот основные вопросы, решение которых очень важно для долговечности этих конструкций.

На начальной стадии развития таких конструкций, не полагаясь на защитные свойства тонкого слоя песчаного бетона, рекомендовали в условиях периодического увлажнения защищать поверхность конструкций красками [51]. Для несущих армоцементных конструкций, на-

Зависимость коррозионной стойкости армоцементных образцов от режима уплотнения

Показатели	Способ уплотнения					
	вибрация		вибрация с пригрузом 60 Г/см ²		виброштамп	
Частота в кол/мин	3000	6000	3000	6000	6000	10000
Стойкость (число циклов увлажнения)	30	120	150	165	190	190

Оказалось также, что напряжение сжатия значительно повышает защитные свойства песчаного бетона.

Исследования позволили сделать вывод о том, что можно рассчитывать на многолетнюю эксплуатацию армоцементных конструкций, не защищаемых от атмосферных воздействий, при толщине защитного слоя 2—3 мм, если песчаный бетон имеет достаточную плотность по всей конструкции.

Указания по проектированию армоцементных конструкций [124] разрешают изготавливать эти конструкции только механизированным способом с обеспечением защитного слоя у стальных сеток не менее 2 мм из плотного цементно-песчаного раствора (водопоглощение менее 7—8%) с ограничением раскрытия трещин. Предусматривается в необходимых случаях применение защищенных арматурных сеток, в частности оцинкованных при толщине слоя цинка 30—40 мк. Применение армоцементных конструкций в агрессивных условиях не рекомендуется. В случае невозможности выполнить требования в отношении толщины защитного слоя и плотности бетона поверхность конструкций надо покрывать лакокрасочными материалами в соответствии с действующими инструкциями [52].

§ 17. Защита поверхности железобетонных конструкций

Защита поверхности железобетонных конструкций требуется прежде всего в тех случаях, когда окружающая среда разрушающе действует на бетон. Однако этот способ можно использовать и как средство уменьшения проницаемости бетона с целью усиления защиты находящейся в нем арматуры, когда окружающая среда не оказывает непосредственного разрушающего действия на бетон.

ходящихся внутри зданий с сухим воздухом и без вредных газов, этого не требовали.

Наблюдения за состоянием опытных, не имеющих защитной покраски армоцементных кровель в Ленинграде, показали, что за 8 лет эксплуатации они хорошо сохранились. Верхняя армирующая сетка подверглась коррозии лишь в местах выхода ее на поверхность. При защитном слое в 1—2 мм коррозии сетки не наблюдается. Глубина карбонизации бетона сверху не превышает 0,5 мм. Нижние сетки (со стороны чердака) на больших участках поверхности не имеют защитного слоя и сплошь ржавые.

Элементы кровли в виде панелей двоякой кривизны были изготовлены вручную из цементно-песчаного раствора 1:1,3—1:1,5 (по объему) на пластифицированном портландцементе марки 400 завода им. Воровского и твердели в естественных условиях. Армоцемент в этой конструкции работает в основном на сжатие и не имеет видимых трещин.

Проведенные нами исследования [6, 9] показали, что можно получить плотный мелкозернистый бетон, практически не карбонизирующийся. Наблюдения подтвердили также, что периодически увлажняемый бетон кровель карбонизируется медленнее, чем неувлажняемый.

В последнее время предложены способы формирования армоцементных конструкций из малоподвижных смесей с виброуплотнением и способы фиксирования положения сеток. Поэтому создаются возможности защиты арматурных сеток путем усовершенствования технологии изготовления армоцементных конструкций. Интересные исследования в этом направлении были выполнены И. А. Лобановым и С. А. Собакиной [66], которые использовали метод измерения омического сопротивления проволоки в образцах из цементно-песчаного раствора разной плотности и при различной толщине защитного слоя. Раствор уплотняли вибрированием с пригрузом при различной частоте.

Образцы подвергали периодическому увлажнению в 1%-ном растворе хлористого натрия. Защитное действие песчаного бетона характеризовалось числом циклов, которое выдержал образец до резкого возрастания омического сопротивления проволоки, что свидетельствовало о полной потере ее сечения. Результаты (табл. 36) показали, что, подобрав режим уплотнения, можно добиться многократного увеличения стойкости армоцемента.

Нами был испытан ряд способов поверхностной обработки бетонных образцов с целью замедления их карбонизации [5]. Результаты этих опытов показывают, что флюатирование и силикатная покраска практически не уплотняют поверхность бетона и не повышают его сопротивляемость диффузии углекислоты. Железнение поверхности образцов существенно замедлило карбонизацию. Наибольшее сопротивление прониканию углекислоты в бетон в наших опытах показало покрытие поверхности образцов пленкой из битума, растворенного в лаке кукурсолъ. Пропитка образцов расплавом петролатума уменьшила общую карбонизацию, но не исключила ее глубокого распространения в отдельных местах, что, по-видимому, следует объяснить неравномерностью пропитки.

Глубина карбонизации образцов видна на фотографии свежего излома, смоченного раствором фенолфталина (рис. 43): периферийная, светлая часть сечения карбонизированная, темные места в центре сечения некарбонизированные.

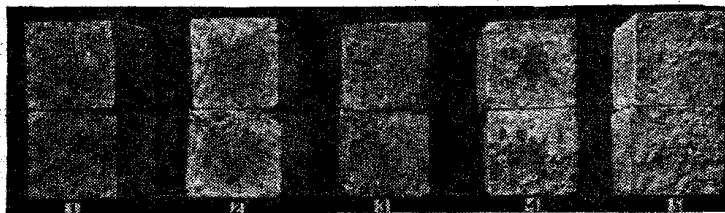


Рис. 43. Карбонизация призм из раствора 1:3 с защищенной поверхностью

1 — покраска раствором битума в лаке кукурсолъ; 2 — железнение; 3 — пропитка петролатумом; 4 — флюатирование; 5 — покрытие силикатной краской

Скорость карбонизации цементно-песчаного раствора состава 1:2 без обработки поверхности была такой же, как и раствора 1:3, уплотненного покраской, а раствор 1:1 практически не карбонизировался (см. § 4). Таким образом, наилучшим способом повышения защитных свойств бетона по отношению к арматуре является увеличение его плотности. Поэтому в первую очередь необходимо использовать все возможности для достижения высокой плотности бетона и лишь в крайнем случае прибегать к покраске.

Для получения качественных защитных покрытий

решающее значение имеет подготовка поверхности бетона. Поверхностные слои бетона должны быть воздушно-сухими, т. е. иметь влажность не более 2—3% по весу. Поверхность перед окраской очищают от пыли и загрязнений щетками, пылесосом или сжатым воздухом.

Штукатурить бетонные поверхности перед окраской не следует. Необходимо стремиться к получению чистых и гладких поверхностей путем тщательного бетонирования и применения плотной опалубки. Мелкие раковины, норы, трещины, выбоины и прочие неровности поверхности перед окраской заделывают шпаклевкой, приготовляемой в соответствии с составом применяемого защитного покрытия.

Таблица 37

Примеры рекомендуемых защитных покрытий железобетонных конструкций в условиях различных агрессивных сред

Характеристика агрессивной среды	Рекомендуемые защитные покрытия	Количество слоев
Слабоагрессивная с газами и пылью	Известковая побелка	1
Среднеагрессивная с газами и пылью	1. Грунт — лак № 170; покрытие — эмали ПФ-133 или ПФ-115, или ГФ-820, или АЛ-170	2—3
	2. Грунт — лак ХСЛ или ХС-76; покрытие — эмали ХСЭ, или ХС-710, или ХСЭ с лаком ХСЛ (1:1)	1
	3. Грунт — лак ХСЛ или ХС-76; покрытие — эмали ХСЭ, или ХС-710, или ВХЭ-4001, или ХВ-113	3—4
	4. Грунт — лак ОЭП-4100; покрытие — эмаль ОЭП-4171 или ОЭП-4173	1
Сильноагрессивная с газами и пылью	1. Грунт — лак ХСЛ или ХС-76; покрытие — эмали ХСЭ, или ХС-710, или ХВ-113, или ВХЭ-4001	2—3
	2. Грунт — лак ОЭП-4100; покрытие — грунт шпатлевка Э-4020 или ЭП-00-10	5—6
		1
		2—4

Примечание. Повышенное число слоев покрытия принимается в случае окраски конструкций, трудно доступных для возобновления покрытий, а также вблизи источников загрязнений.

Вид и конструкцию (последовательность и число слоев) защитного покрытия выбирают в соответствии с Указаниями [123] в зависимости от характера и степени агрессивности среды. Примеры рекомендуемых защитных покрытий приведены в табл. 37.

Учитывая деформации конструкций и возможное раскрытие трещин при восприятии нагрузок сооружением, покраску сборных железобетонных конструкций лучше производить после их монтажа и замоноличивания. При этом видимые невооруженным глазом раскрывающиеся трещины должны быть особенно тщательно зашпаклеваны и покрашены.

Для защиты поверхности железобетонных конструкций наиболее целесообразно применять эластичные трещиностойкие покрытия. Такие покрытия на основе хлорсульфированного полиэтилена [144] разработаны под руководством В. В. Шнейдеровой в НИИЖБ. Их выпуск освоивается промышленностью.

Для контроля сплошности и требуемого числа слоев покрытия применяют краски двух цветов, чередуя их нанесение (в основном это относится к готовым перхлорвиниловым краскам).

В процессе эксплуатации окрашенных конструкций необходимы систематический надзор за состоянием защитных покрытий и возобновление поврежденных мест (текущий ремонт), а также периодический (раз в несколько лет, в зависимости от стойкости покрытия) капитальный ремонт, т. е. возобновление покрытия. При возобновлении защитных покрытий старую краску обычно удаляют. Уход за покрытием (например, ежегодное нанесение на покрытие на основе перхлорвиниловых эмалей защитной смазки, состоящей из 95% петролатума и 5% парафина, разведенных керосином) позволяет удлинить срок его службы и улучшить защитные свойства.

В заключение необходимо подчеркнуть, что защитные покрытия могут оправдать свое назначение только при высококачественном их выполнении.

Глава

5

ЗАЩИТА АРМАТУРЫ В КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ЛЕГКИХ, ЯЧЕЙСТЫХ И АВТОКЛАВНЫХ СИЛИКАТНЫХ БЕТОНОВ

§ 18. Особенности коррозии арматуры и ее защита в легких бетонах

В настоящее время в строительстве широко применяются конструкции из бетонов на легких пористых заполнителях. Бетоны эти отличаются большим разнообразием по виду заполнителей и вяжущих, а также по структуре, определяемой степенью заполнения плотным раствором пространства между зернами пористого заполнителя.

Выше было рассмотрено влияние вида вяжущего на состояние арматуры в тяжелых бетонах. В принципе оно остается таким же и для легких бетонов.

Опыт показывает, что состояние арматуры в легких бетонах определяется главным образом их структурой, а также пористостью заполнителя.

Исследования состояния арматуры в легких бетонах на клинкерных цементах проводились неоднократно. В. М. Москвин [74] установил, что для предохранения арматуры от коррозии в пемзобетоне расход цемента должен быть не менее 220 кг/м^3 , а лучше 250 кг/м^3 . При этом в состав бетона вводили диатомит в количестве от 20 до 40% веса цемента. В. О. Саакян [110] при кратковременных испытаниях во влажной среде арматуры в пемзобетоне плотной структуры с расходом цемента 160 кг/м^3 и более наблюдал коррозию лишь в тех местах, где были раковины.

На основании проведенного в 1936 г. М. З. Симоновым в Тбилиси обследования ряда жилых, общественных и производственных зданий из легкого железобетона было установлено, что состояние арматуры не отличается от такового в сооружениях из обычного железобетона.

В 1937 г. была выпущена «Инструкция по проектированию и возведению конструкций и сооружений из легкого железобетона» [56]. Для сооружений, подвергаю-

щихся действию атмосферных или других факторов, вызывающих коррозию металла, минимальное содержание портландцемента установлено 150 кг на 1 м³ пемзо- или туфобетона. При этом сумма весов пылевидных частиц и портландцемента должна быть равна 250 кг/м³.

В. О. Саакян на основании годичных испытаний образцов пришел к выводу, что для гарантии сохранности арматуры в бетоне на арктическом туфе расход портландцемента должен быть не менее 250 кг/м³. Проведенные им позже испытания показали, что в бетоне на литоидной пемзе арматура не корродирует даже при расходе цемента 175 кг/м³; при этом сумма весов цемента и пылевидных частиц составляла 280 кг/м³.

В. Г. Довжик и Л. А. Кайсер [44] считают, что плотность структуры является основой защиты арматуры в конструктивно-теплоизоляционном керамзитобетоне. По их данным, в конструкциях для жилищного строительства из керамзитобетона объемным весом 800—1000 кг/м³ на керамзитовом песке при расходе цемента не менее 200 кг/м³ арматура надежно защищена от коррозии.

При недостаточно плотной структуре (плотность 0,95—0,97) или при пониженном расходе цемента (примерно 150 кг/м³) для предупреждения местной коррозии арматуры авторы рекомендуют вводить в бетонную смесь нитрит натрия в количестве 2% веса цемента, а в случае неплотной структуры (плотность менее 0,9) и низкого расхода цемента (примерно 100 кг/м³) покрывать арматуру цементно-казеиновой обмазкой. При этом изделие должно иметь фактурные слои из плотного цементно-песчаного раствора.

Согласно нормам ФРГ [234], при изготовлении полых плит настилов из пемзобетона защитный слой бетона плотной структуры должен быть не менее 1 см в сухих условиях и не менее 1,5 см на открытом воздухе, а расстояние от стержней до внутренней поверхности бетона в пустотах должно быть не менее 1 см. Арматуру рекомендуется укладывать в цементное тесто (в некоторых случаях с добавкой мелкого песка или трасса): при этом арматура втапливается в предварительно уплотненный пемзобетон и затем обильно заливается цементным тестом. Для уменьшения межзерновой пустотности пемзový щебень дробят до крупности 6—8 мм и добавляют фракцию 0—3 мм. Рекомендуется вводить песок в количестве 10%, но не более 20%. При выполнении этих тре-

бований в бетоне марки 80—100 пористость минимальная, не опасная для арматуры. Если конструкция подвергается воздействию паров воды, то необходимо нанесение цементной штукатурки (плотный фактурный слой), а при действии паров кислот нужна дополнительная покраска поверхности конструкции.

В отечественной нормативной литературе отмечается недостаточная четкость и противоречивость рекомендаций для обеспечения сохранности арматуры в конструкциях из легких бетонов. СНиП III-V.6-62 [131] предусматривают, что «антикоррозийная защита арматуры железобетонных конструкций из легких, ячеистых и других пористых бетонов производится путем нанесения цементно-казеиновой, цементно-полистирольной или других видов обмазки».

Указания по проектированию антикоррозионной защиты строительных конструкций [123] предусматривают, что в промышленных зданиях легкие бетоны на пористых заполнителях могут применяться для армированных конструкций только при плотной структуре. При этом в случае воздействия агрессивных сред требуется обязательная защита поверхности конструкций.

В ГОСТ 11024—64 на керамзитобетонные панели [37] указано, что они применяются в конструкциях зданий с сухим, нормальным и влажным режимом. При относительной влажности выше 60% требуется защита внутренней поверхности панелей пароизоляционным покрытием. Указывается, что керамзитобетон должен иметь плотную и однородную структуру. Межзерновое пространство должно быть целиком заполнено раствором. Изготовление керамзитобетона с неплотной структурой допускается при условии защиты арматуры от коррозии обмазками или покрытиями и защиты всех поверхностей панелей от промокания. Толщина защитного слоя должна быть не менее 20 мм.

По ГОСТ на методы испытания бетонной смеси [38] плотная структура легких бетонов характеризуется объемом межзерновых пустот в уплотненной бетонной смеси не более 3%.

Таким образом, в рекомендациях по защите арматуры от коррозии нет необходимой ясности. По-видимому, наиболее обоснована рекомендация о защите арматуры путем использования легких бетонов плотной структуры на цементном вяжущем, которые, пожалуй, уступают тяжелым бетонам только в длительности сохранения за-

щитных свойств. При этом, очевидно, предполагаемое вредное действие содержащихся в некоторых заполнителях соединений серы и частиц несгоревшего угля не должно иметь места, так как заполнители и арматура целиком обволакиваются цементным тестом.

Защита арматуры в таких бетонах специальными покрытиями исключается, а если возникает необходимость в усилении защитных свойств бетона (например, в агрессивных средах), то это должно достигаться либо использованием фактурных слоев из плотных бетонов или растворов, либо окрасочной, пропиточной или оклеечной изоляцией той поверхности конструкций, которая испытывает агрессивное воздействие.

Известно, что лучше всего защищает арматуру плотный бетон. Однако в практике часто используются бетоны (главным образом, конструктивно-теплоизоляционные) с различной степенью неплотности структуры, где имеется реальная угроза развития коррозии арматуры.

Мы попытались путем прямых коррозионных испытаний сравнить защитные свойства различных легких бетонов по отношению к арматуре и проверить действие защитных покрытий арматуры в керамзитобетоне и термозитобетоне различной структуры: плотном, поризованном и крупнопористом. Составы керамзитобетона различались также по расходу цемента, а термозитобетон был представлен составами на термозитовом песке и песке из гранулированного шлака.

Образцы изготавливали в стальных формах размером $10 \times 10 \times 30$ см. В каждую форму помещали в горизонтальном положении 6 арматурных стержней, из которых 4 имели защитные антикоррозионные покрытия, а 2 были шлифованными незащищенными.

В качестве защитных покрытий применяли следующие составы (в вес. ч.):

- | | |
|----------------------------|--|
| 1. Цементно-битумный: | 3. Цементно-перхлорвиниловый: |
| битум марки V —1 | лак ХСЛ —1 |
| толуол —1,5 | портландцемент —1,5 |
| портландцемент —6 | 4. Цементно-полистирольный: |
| 2. Цементно-кузбасслаковый | полистиродный клей |
| портландцемент —1 | 80%-ный (полистирол блочный в толуоле) —10 |
| кузбасслак —1 | портландцемент —15 |
| | молотый песок —2 |

Толщина покрытий выдерживалась в пределах 0,4—0,6 мм. Защитный слой бетона у арматуры имел толщину 15 мм. Уплотняли бетонную смесь на лабораторной виброплощадке. Все бетонные образцы пропаривались при температуре 85°C. Режимы дальнейшего хранения образцов были различными: 1) воздушно-сухой при относительной влажности воздуха около 60% и температуре $30 \pm 1^\circ$ и 2) воздушно-влажный при температуре $30 \pm 1^\circ$, относительной влажности около 80% и повышенном содержании углекислоты и кислорода.

Рассмотрение результатов (табл. 38) показывает, что при относительной влажности воздуха 80% коррозия развивается во времени. Незащищенная арматура имеет наибольшую степень поражения коррозией как по площади, так и по потере веса в поризованном керамзитобетоне, который, как и следовало ожидать, по защитным свойствам близок к ячеистым золобетонам. В крупнопористом термозитобетоне степень поражения арматуры после 21 месяца значительно ниже, а после 48 месяцев приближается к поризованному. Пористые бетоны быстро карбонизируются. Коррозия первоначально развивается в основном там, где отсутствует контакт цементного камня с арматурой, а затем распространяется по всей поверхности.

В бетонах плотной структуры с расходом цемента 180 кг/м^3 и выше распространение коррозии по поверхности арматуры меньше, а весовые потери примерно на 1 порядок ниже, чем в поризованном. В термозитобетоне на песке из гранулированного шлака с расходом цемента 385 кг/м^3 стержни практически не имели поражения, а карбонизация бетона минимальная. В других составах карбонизация прошла несколько глубже, в том числе и с добавками кремнеорганической жидкости ГКЖ-94, которая, очевидно, не способствует уплотнению структуры. При рассмотрении структуры бетона в изломе видны отдельные воздушные поры, а под стереоскопическим микроскопом были обнаружены усадочные трещины в сечении образца на поверхности контакта с арматурой, которые и являются первоначальными очагами развития коррозии.

В керамзитобетоне с расходом цемента 180 кг/м^3 состояние арматуры оказалось несколько хуже, чем при расходе цемента 250 кг/м^3 . Очевидно, как межзерновая пустотность, так и пористость цементно-песчаного рас-

Таблица 38

Состояние арматуры в легких бетонах после хранения
в камере с относительной влажностью 80%

Вид бетона	Расход цемента в кг/м ³	Объемный вес в кг/м ³	Структура	Глубина карбонизации в мм через		Состояние арматуры			
				21 мес.	48 мес.	через 21 мес.		через 48 мес.	
						площадь поражения в %	потеря веса в %	площадь поражения в %	потеря веса в %
Керамзитобетон плотный с легким песком	250	1300	Плотная	8—10	10—20	10	0,0354	40	0,0624
То же	180	1300	То же	20—25	>50	65	0,0345	70	0,0501
Керамзитобетон поризованный	250 + зсгла 170	1100	Пористая	>50	>50	99	0,3899	97	0,3940
Керамзитобетон плотный с добавкой ГКЖ-94	250	1250	Плотная	13—17	30—35	25	0,0200	70	0,1099
Термозитобетон с термозитовым песком	300	1880	То же	5—8	15—25	15	0,0071	15	0,0490
Термозитобетон с песком из гранулированного шлака	385	2050	»	5—8	7—10	0	0	0	0
Термозитобетон крупнопористый (беспесчаный)	306	1345	Крупнопористая	>50	>50	15	0,0899	99	0,1512

твора были здесь выше, что подтверждается глубокой карбонизацией.

В бетонах плотной структуры вид заполнителя практически не повлиял на состояние арматуры, которое определяется в основном расходом цемента и величиной межзерновой пустотности.

В возрасте двух лет были сняты с испытания образцы, хранившиеся в помещении лаборатории (относительная влажность воздуха 40—50%). Результаты испытания показали, что развитие коррозии незащищенной арматуры как по площади распространения, так и по глубине проникания существенно меньше, чем при воздушно-влажном режиме хранения. Имеющиеся поражения арматуры являются результатом развития коррозии в период, предшествующий установлению воздушно-сухого состояния образцов, по достижении которого, очевидно, развитие коррозии прекращается.

После 48 месяцев хранения во влажной камере наилучшим оказалось цементно-битумное покрытие, которое в 11 составах бетона из 13 удовлетворительно защитило арматуру (площадь распространения коррозии не превышала 3%), а цементно-перхлорвиниловое — лишь в 3 наиболее плотных составах. Цементно-кузбасслаковое и цементно-полистирольное покрытия обеспечили защиту соответственно в 6 и 8 составах.

В поризованном керамзитобетоне и крупнопористом термозитобетоне удовлетворительные результаты показало лишь цементно-битумное покрытие. Только в двух составах бетонов плотной структуры защиту арматуры обеспечили все покрытия. Глубина проникания коррозии при наличии покрытий, как правило, в несколько раз (от 2 до 8) меньше, чем на незащищенной арматуре.

Исследование защитных свойств некоторых составов легких бетонов и антикоррозионных покрытий арматуры в этих бетонах позволяет сделать следующие выводы.

1. Коррозия незащищенной арматуры наблюдалась во всех составах бетона, которые считались плотными. Изучение структуры и глубины карбонизации этих бетонов показало, что они имеют межзерновую пустотность, которая и является причиной развития коррозии арматуры. Поэтому для надежной защиты арматуры необходимо при подборе составов плотных бетонов на пористых заполнителях контролировать межзерновую пустотность по методике, указанной в ГОСТ 11051—64

«Методы испытаний бетонной смеси», ограничивая ее величиной 3⁰/о.

2. В крупнопористых бетонах развивается коррозия арматуры в тех местах, где нет контакта ее поверхности с цементным камнем. Поэтому необходимо либо ограничивать применение армированных конструкций из таких бетонов сухими условиями эксплуатации, когда при быстром снижении технологической влажности процесс коррозии затухает, либо защищать арматуру антикоррозийными покрытиями.

3. В поризованных золобетонах на пористых заполнителях арматура корродирует наиболее интенсивно (аналогично арматуре в ячеистых бетонах), что объясняется быстрой карбонизацией легкопроницаемого поризованного раствора, который к тому же содержит золунос, имеющую в своем составе компоненты, агрессивные по отношению к стали. В таких бетонах защита арматуры покрытиями является обязательной.

4. Толщина защитного слоя имеет значение только в истинно плотных бетонах, где с ее увеличением уменьшается возможность развития коррозии арматуры.

5. При пониженном расходе цемента (180 кг/м³) в керамзитобетоне наблюдается усиленная коррозия арматуры. Очевидно, что снижение расхода цемента без ущерба для защитной способности бетона возможно только при замене части цемента уплотняющими тонкомолотыми добавками с тщательным подбором состава бетона и контролем плотности свежееуложенной смеси.

6. В воздушно-сухих условиях коррозия арматуры в бетонах любой структуры имеет резко затухающий характер. Коррозия развивается только в период сохранения бетоном технологической влажности и не достигает опасной степени. Поэтому в конструкциях, предназначенных для эксплуатации в сухих условиях, исключаяющих конденсационное сверхсорбционное увлажнение бетона, арматуру можно не защищать даже в бетонах пористой структуры.

7. Из проверенных защитных покрытий полностью надежным оказалось цементно-битумное, которое и следует в первую очередь рекомендовать для защиты арматуры в необходимых случаях, т. е. в бетонах с межзерновой пустотностью, превышающей 3⁰/о, и в поризованных. Защитные свойства цементно-кузбасслакового покрытия можно улучшить, если увеличить его толщину

(например, путем нанесения в два слоя). Для улучшения защитных свойств цементно-полистирольного покрытия необходимо, очевидно, уточнение его рецептуры.

Нами были обследованы крупнопанельные здания с целью изучения состояния арматуры, которое оценивалось определенным баллом в соответствии со степенью поражения поверхности:

Совершенно чистая	0
Коррозия в виде налета точками и пятнами; площадь поражения до 50%	1
То же, площадь поражения более 50%	2
Образование пластинок ржавчины и язв; площадь поражения до 25%	3
То же, площадь поражения до 50%	4
То же, площадь поражения более 50%	5

Определялась влажность бетона посередине сечения стены и у арматуры.

Всего было обследовано 8 домов из керамзитобетонных однослойных панелей в Москве и Новомосковске со сроком эксплуатации от 1 до 6 лет. Первичные результаты обследования позволяют заметить лишь две не очень четкие закономерности: уменьшение влажности стен и увеличение степени коррозии с течением времени. Возможность сравнения весьма ограничена ввиду разного срока эксплуатации отдельных домов и неодинакового качества бетона.

Средняя влажность керамзитобетона в наружной стене дома, находящегося в эксплуатации 5 лет, около 3,5⁰/о. Она в 2,5 раза ниже, чем в доме двухлетнего возраста, и в 4,5 раза ниже, чем в доме после 1 года эксплуатации. Еще более резко снижается влажность в слоях бетона, прилегающих к лицевым поверхностям, т. е. там, где располагаются арматурные сетки. Здесь уже через 2 года после постройки влажность снизилась до 2⁰/о.

Установить зависимость степени коррозии арматуры от влажности бетона не представляется возможным ввиду разного срока службы отдельных домов. Бесспорно лишь, что с течением времени благодаря просыханию стен коррозия арматуры затухает.

Если судить по средним оценкам из 10 вскрытий арматуры на каждый дом, то к пятилетнему сроку эксплу-

атации степень коррозии арматуры достигает лишь 2,1 балла, тогда как после 1 года она оценивалась 1,2 балла. Наибольшая зарегистрированная степень коррозии при этом была оценена соответственно 5 и 3 баллами.

В последнее время находят широкое применение поризованные легкие бетоны. Их защитные свойства по отношению к арматуре близки к защитным свойствам безавтоклавных ячеистых бетонов. Известно, что в первые годы эксплуатации у поверхности арматуры изделий из безавтоклавных ячеистых бетонов сохраняется щелочная пассивирующая среда. Поэтому их повышенная первоначальная влажность не вызывает значительной коррозии арматуры, если бетон не содержит агрессивных компонентов в виде зол, шлаков и добавок хлористых солей. Через несколько лет эксплуатации ячеистый бетон карбонизируется и перестает пассивировать сталь, но к этому времени бетон обычно (при сухом режиме помещений) настолько просыхает, что коррозия практически прекращается.

С учетом этих обстоятельств оказалось возможным допустить в Инструкциях [53, 54] изготовление и использование в зданиях с сухим и нормальным влажностным режимом и неагрессивной воздушной средой изделий из поризованных легких бетонов с расходом цемента не менее 200 кг/м^3 и объемом вовлеченного воздуха не более 25% без специальных мер защиты арматуры от коррозии. При этом обязательно требуется устройство лицевых фактурных слоев из раствора или бетона на плотных заполнителях и обеспечение необходимой толщины защитного слоя. В зданиях с относительной влажностью воздуха помещений выше 60% внутренние поверхности изделий должны иметь пароизоляционное покрытие, а арматура должна иметь защитное покрытие.

Приведенные данные из литературы, нормативных документов, результаты экспериментов и обследований позволяют сделать следующие выводы и рекомендации по защите арматуры стеновых панелей из легких бетонов.

Наибольшую сохранность арматуры гарантирует бетон плотного строения. Поэтому необходимо применять для изготовления стеновых панелей такой бетон, состав и способ уплотнения которого обеспечивают заполнение цементно-песчаным раствором всех пустот между зер-

нами крупного заполнителя. Это может быть достигнуто фракционированием легкого заполнителя, применением легкого песка и расходом цемента не менее 250 кг на 1 м^3 бетона. Объем межзерновых пустот в уплотненной бетонной смеси, определяемый по ГОСТ 11051—64 [38], не должен превышать 3%.

Изготовление панелей из керамзитобетона и других легких бетонов неплотной структуры с использованием неагрессивных заполнителей может быть допущено при условии защиты арматуры от коррозии при помощи обмазок, кроме того, лицевые поверхности панелей необходимо защищать от промокания. Такие панели можно применять только в зданиях с сухим и нормальным влажностным режимом помещений. Не следует изготавливать панели из бетона неплотной структуры с использованием шлаковых и зольных заполнителей.

В панелях из поризованных легких бетонов, предназначенных для зданий с сухим и нормальным влажностным режимом помещений и чистой воздушной средой, допускается не прибегать к специальной защите арматуры, если не используется зола, а расход цемента — не менее 200 кг/м^3 . При этом обязательно устройство плотных фактурных слоев. В остальных случаях необходимо защищать арматуру, так же как в изделиях из ячеистых бетонов, и наносить на внутреннюю поверхность панелей пароизоляционное покрытие.

Защитные обмазки должны иметь повышенную прочность, исключаящую их повреждение от ударов крупного заполнителя при подаче бетонной смеси в форму и уплотнении с вибрацией. Этим требованиям удовлетворяют цементно-полистирольная и цементно-битумная обмазки. Цементно-казеиновая обмазка из-за своей хрупкости не может быть рекомендована для защиты арматуры в легких бетонах. При значительной влажности среды целесообразно использовать оцинкованную арматуру.

Лицевые поверхности и торцы панелей должны быть плотными. Целесообразно дополнительно обрабатывать горцы панелей гидрофобными жидкостями для придания несмачиваемости поверхности бетона. Для повышения сохранности арматуры в панелях из легких бетонов необходимо использовать конструктивные меры защиты от увлажнения.

Выше речь шла преимущественно о защитных свойствах легких конструктивно-теплоизоляционных бетонов,

применяемых в ограждающих конструкциях с обычной ненапрягаемой арматурой. Приведенные рекомендации по защите арматуры в этих конструкциях могут быть, очевидно, распространены и на несущие конструкции, которые будут эксплуатироваться в неагрессивных воздушно-сухих условиях. Нельзя механически переносить эти рекомендации на конструкции, находящиеся на открытом воздухе или подвергающиеся агрессивным воздействиям, в особенности если они имеют предварительно напрягаемую арматуру. В этих случаях необходимо более точно знать, в какой степени снижаются защитные свойства бетона по отношению к арматуре в результате замены плотных заполнителей пористыми.

По данным Ниши [202], бетон на пористом гравии карбонизируется в 1,2 раза быстрее, чем на плотном, а если при этом используется и пористый песок, то карбонизация ускоряется вдвое. Наши опыты показали также примерно двойное ускорение карбонизации керамзитобетона с легким песком по сравнению с плотным бетоном при одинаковом расходе цемента.

В результате шестилетних испытаний строительной исследовательской станцией Англии [158] предлагаются коэффициенты карбонизации для разных бетонов (в легких бетонах 50% мелкого заполнителя составлял речной песок):

на речном гравии и песке	1 (1 мм)
» шлаковой пемзе	1,8—2,4 (2—3 мм)
» заполнителе типа керамзита	3,2 (4 мм)
» » » аглопорита	1,2—2 (1—2 мм)

Абсолютные значения глубины карбонизации всех бетонов сравнительно невелики.

По данным К. Вальца [231], газопроницаемость и водопоглощение конструктивного легкого бетона при умеренном расходе цемента зависят от структуры пор зерен заполнителя, но всегда больше, чем у тяжелого бетона равной прочности. Однако благодаря большой деформативности легкого бетона, раскрытие трещины в растянутых элементах конструкций не более опасно, чем в тяжелом бетоне.

В заключение можно сделать следующие общие рекомендации по защите арматуры в легких бетонах.

Наиболее надежными способами защиты арматуры в легких бетонах во всех случаях являются повышение защитных свойств самого бетона и создание условий, препятствующих повышению его влажности. Применять бетоны с пониженными защитными свойствами, прибегая к специальной защите арматуры, следует лишь при соответствующем технико-экономическом обосновании и при условии обеспечения хорошо налаженной технологии нанесения защитных покрытий, гарантирующей их высокое качество.

В легких бетонах плотной структуры на крупном пористом заполнителе, природном тяжелом песке и клинкерных цементах не требуется специальной защиты арматуры. Плотной считается структура бетона, в котором объем межзерновых пустот уплотненной бетонной смеси, определяемый по ГОСТ 11051—64, не превышает 30%. Такие бетоны можно применять для конструкций с предварительно напряженной арматурой. В зависимости от степени агрессивности среды принимаются меры для защиты поверхности конструкций или ограничивается их использование в соответствии с Указаниями СН 262—67. При этом, если в процессе эксплуатации бетон у арматуры будет находиться в воздушно-сухом состоянии (равновесная влажность, соответствующая относительной влажности воздуха 60%), содержание цемента в бетоне не регламентируется. Если же в процессе эксплуатации влажность бетона может быть более высокой, содержание цемента должно быть не ниже 250 кг/м³.

Легкие бетоны плотной структуры на крупном и мелком пористом заполнителе и клинкерных цементах можно применять для всех конструкций, кроме предварительно напряженных, без специальной защиты арматуры, если в процессе эксплуатации влажность бетона у арматуры будет находиться в пределах равновесной при относительной влажности воздуха 75%. Расход цемента при этом не должен быть ниже 250 кг/м³. При меньшем расходе цемента конструкции из этих бетонов с незащищенной арматурой можно применять только при гарантированном воздушно-сухом состоянии бетона у арматуры в процессе эксплуатации.

Легкие бетоны плотной структуры на пористых заполнителях, малоклинкерных и бесклинкерных вяжущих (твердеющие при пропаривании и в автоклаве) могут быть использованы для любых армированных конструк-

Воздухопроницаемость бетонов

Показатели	Автоклавный пенобетон				Обычный бетон	
	800	800	800	1000	2400	2400
Объемный вес в кг/м^3 . . .	800	800	800	1000	2400	2400
Расход цемента в кг/м^3 . . .	220	270	320	270	270	320
Коэффициент воздухопроницаемости $\times 10^3$	0,52	0,285	0,073	0,0224	0,0037	0,0032

ций, кроме предварительно напряженных, без специальной защиты арматуры только при воздушно-сухом состоянии бетона у арматуры в процессе эксплуатации. Конструкции из таких бетонов со специально защищенной арматурой следует применять при условии, если в процессе эксплуатации влажность их будет ограничена (в пределах равновесной влажности бетона у арматуры соответствующей относительной влажности воздуха 75%).

Легкие бетоны на пористых заполнителях с межзерновой пустотностью свыше 3%, пористые, крупнопористые, с поризованным цементным камнем и ячеистые можно применять для ограждающих конструкций без специальной защиты арматуры только при гарантированном воздушно-сухом состоянии бетона у арматуры в процессе эксплуатации. При наличии специальной защиты арматуры применение ограждающих конструкций из таких бетонов возможно, если в процессе эксплуатации влажность бетона у арматуры будет находиться в пределах равновесной при относительной влажности воздуха 75%.

§ 19. Особенности коррозии арматуры в ячеистых бетонах

Данные, полученные при обследовании ряда конструкций из ячеистых бетонов, поврежденных вследствие развития коррозии арматуры, экспериментальные исследования и теоретические соображения показывают, что такие бетоны не могут служить надежной защитой для стальной арматуры из-за высокой проницаемости пористой структуры.

В самом деле, проницаемость ячеистых бетонов значительно выше, чем плотных. По нашим данным (табл. 39), воздухопроницаемость пенобетона больше, чем обычного, в 10—100 раз.

По И. Т. Кудряшovu [63], при объемном весе пенобетона 600 кг/м^3 коэффициент паропроницаемости равен 0,0153, а при 1000 кг/м^3 — 0,0074 $\text{г/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{мм рт. ст.}$

По данным А. Т. Баранова и Г. А. Бужевича [21], ячеистый золобетон имеет открытые и замкнутые поры с преобладающим размером от 0,1 до 0,25 мм, однако есть поры до 2,5 мм в поперечнике. В цементно-зольном

камне, образующем перегородки между ячейками, размер пор меньше: от 0,08 до 0,12 мм. Большинство ячеек, таким образом, сообщается между собой, обуславливая большую скорость водопоглощения ячеистых бетонов.

И. Т. Кудряшов и В. П. Куприянов [64] приводят данные, показывающие, что водопоглощение ячеистых бетонов составляет от 22 до 40% по объему. Сорбционное увлажнение при 60% относительной влажности воздуха равно 1—4%, гигроскопичность (т. е. сорбция при 100% влажности) равна 2,5—6,5% по объему. Изотерма сорбции пенобетона с объемным весом 800 кг/м^3 показана на рис. 44.

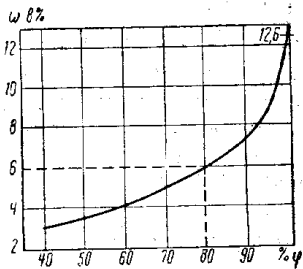


Рис. 44. График сорбции пенобетона

По данным, сообщенным нам О. А. Бененсоном, безавтоклавный газозолобетон объемным весом 950 кг/м^3 имел водопоглощение 38—39% по весу, сорбционную влажность 5% при относительной влажности воздуха 60 и 20% при 100%-ной влажности воздуха. На водопоглощение ячеистого бетона существенно влияет содержание в нем золы: при увеличении $З/В$ от 0 до 1,5 водопоглощение возрастает с 49 до 69% по весу. Увеличение водовязущего отношения от 0,48 до 0,64 уменьшает водопоглощение с 69 до 59%.

Большая разница между скоростью водопоглощения и скоростью водоотдачи ячеистых бетонов. В частности, водопоглощение ячеистого золобетона за 4 ч составляет 90% водопоглощения за 3 суток. Водоотдача при объемном весе 600 кг/м^3 характеризуется стабилизацией ве-

са образца размером $7 \times 7 \times 7$ см в воздушно-сухих условиях через 40 суток при равновесной влажности материала 6—10%. Гораздо медленнее снижается влажность в образце $30 \times 30 \times 30$ мм: за 100 суток при объемном весе 600 кг/м^3 она доходит до 26%, при объемном весе 800 кг/м^3 — до 25% и при 1100 кг/м^3 — до 16%.

Таким образом, структура ячеистых бетонов легко проницаема для газов, паров и воды, причем последняя с трудом удаляется (при обычных температурно-влажностных условиях). Эти свойства лишают ячеистые бетоны сколько-нибудь серьезной защитной способности по отношению к арматуре. Другой особенностью ячеистых бетонов является то, что они применяются почти исключительно в ограждающих конструкциях, условия работы которых способствуют миграции влаги в их толще и накоплению ее при определенных режимах.

Ограждение подчас имеет конструкцию, затрудняющую удаление влаги из ячеистого бетона. Например, по данным Б. Ф. Васильева, в Магнитогорске в доме из безавтоклавного пенобетона объемным весом 700—800 кг/м^3 , толщиной 22 см, заключенного между двумя 4-см бетонными слоями, средняя весовая влажность пенобетона зимой составляла с южной стороны 24, с северной 29%. Наибольшая влажность в центре стены была в первую зиму — 50%, а через 2 года 45%, т. е. снизилась очень мало.

По нашим данным [11], плотный фактурный слой с наружной стороны армопенозолобетонных стеновых панелей здания Луганской ГРЭС создавал определенный подпор влаги. Весовая влажность пенозолобетона с внутренней стороны панелей машинного зала находилась в пределах 5,8—17,5%, посередине сечения панели в пределах 17—40,6%, а у наружного фактурного слоя 18,4—43,5%.

Аналогичная картина накопления влаги наблюдается в покрытиях промышленных зданий из армированного ячеистого бетона. По данным В. Е. Соколовича, полученным при обследовании кровельного покрытия Шекинской ГРЭС летом 1959 г. (9 лет эксплуатации), весовая влажность пенобетона под стяжкой составляла 23—27%, а у внутренней поверхности — около 4%. Отмечена сплошная коррозия арматуры глубиной до 0,35 мм (0,7 мм по диаметру).

Нам пришлось наблюдать случай интенсивной коррозии арматуры в покрытии цеха крупных шлакоблоков

одного из московских заводов железобетонных изделий. Покрытие цеха площадью около 4000 м^2 было выполнено из армопенобетонных плит производства Лыткаринского завода. По нижней поверхности плит устроено пароизоляционное покрытие краской СЖ. Кровля была сделана почти год спустя после укладки плит. На непросушенные плиты нанесли пароизоляционную покраску. В местах опирания на балки поверхность плит оставалась без пароизоляции. В цехе влажность воздуха доходила до 95% при температуре 12°C. В холодное время года на поверхности покрытия конденсировалась влага.

По прошествии 2 лет в одних местах защитный слой пенобетона начал отпадать сам, в других — при простукивании плит. Влажность пенобетона достигла 30%. Арматурные каркасы покрыты ржавчиной на 60—95% поверхности. Глубина коррозионных поражений — от долей миллиметра до сквозных. Последнее было отмечено в 4 плитах из 32 снятых. Коррозия имеет резко выраженный язвенный характер.

Е. С. Силаенковым [113] с сотрудниками обследовано значительное число армированных конструкций из ячеистых бетонов. Результаты обследований, частично сведенные нами в табл. 40, позволяют отметить некоторые закономерности.

Прежде всего состояние арматуры зависит от влажности конструкции. При устойчиво-сухом режиме конструкции арматура или чистая, или имеет незначительные налеты ржавчины, образовавшейся в период изготовления и монтажа, связанный с неизбежным увлажнением. Технологическая влажность конструкций медленно уменьшается при наличии плотных фактурных слоев, а в холодное время года происходит даже накопление конденсационной влаги. Этим объясняется, как правило, интенсивное развитие коррозии арматуры как под фактурным слоем, так и непосредственно в нем. По-видимому, развитию коррозии арматуры в плотных фактурных слоях способствует эффект дифференциальной аэрации, вследствие которого эта арматура становится анодной по отношению к арматуре в ячеистом бетоне.

Е. С. Силаенков отмечает, что развитию коррозии в благоприятных условиях эксплуатации способствуют такие дефекты изделий, как недостаточная толщина защитного слоя, неоднородность структуры, трещиноватость и повышенная начальная влажность бетона. Быст-

Таблица 48
Сводка результатов обследования (по Е. С. Салаенкову)

Место и объект	Конструкция и материал	Влажность в % (вс.)	Состояние арматуры	Оценка в баллах ¹
Рига, жилые дома	Оконные перемычки из газобетона	3—5	Налет ржавчины	1
Березники, жилые дома	Стеновые панели из пенобетона с плотным фактурным слоем	12—14	Пластиначая ржавчина с язвками (в пенобетоне и фактурном слое)	5
То же	То же, с поризованным фактурным слоем	6,5—7,2	Налет ржавчины	1—2
Первоуральск, жилые дома	Стеновые панели из пенобетона с плотным фактурным слоем	—	Пластиначая ржавчина с язвками (в фактурном слое)	5
Рига, завод Автоэлектротрибор Челябинск, тракторный завод	Плиты покрытия То же	—	Налет пятнами — в пенобетоне чистая	1
Березники, деревообделочный завод	Плиты КАП	—	В основном чистая, в отдельных местах верхней сетки налеты ржавчины	0—1
Свердловск, промышленное здание	Стеновые панели из газоплакозосиликата	—	В основном чистая, отдельные пятна	1
Челябинск, завод железобетонных изделий	Плиты покрытия	До 28	В увлажненной плите пластиначая ржавчина	3—4
Рига, цементно-шиферный комбинат	То же	Бетон увлажнен То же	Ржавчина налетами и пластиначая	3
			Пластиначая ржавчина с язвками	5
			То же	5

¹ Оценка состояния арматуры произведена по 5-балльной системе (см. стр. 169).

рое развитие коррозии вызывает увлажнение изделий при транспортировании, хранении и монтаже. Наиболее опасным является периодическое или постоянное увлажнение в процессе эксплуатации, выводящее конструкции из строя в течение 3, 5, 10 лет. Автор рекомендует увеличить толщину защитного слоя в конструкциях из ячеистого бетона до 3 см, отказаться от плотных фактурных слоев и при этих условиях и сухом режиме помещений не прибегать к специальной защите арматуры обмазкой.

Защита арматуры обмазками может увеличить срок эксплуатации конструкций в жестких условиях, где, кроме того, необходимо защищать бетон от увлажнения. Целесообразность применения армированных конструкций в этих условиях вообще сомнительна, так как надежная защита их сложна, дорогостояща и недолговечна.

Нами с Н. К. Розенталем [11] были обобщены результаты трехкратного обследования крупнопанельных стен из пенозолобетона на Луганской ГРЭС, построенных в разное время. Панели изготовлены на Кураховском заводе из автоклавного пенозолобетона объемным весом 900 кг/м³ с наружным фактурным слоем из тяжелого бетона толщиной 30 мм. Одна из сеток сварного арматурного каркаса находится в этом слое. Для пароизоляции часть панелей окрашена. Арматурные каркасы панелей, изготовленных при строительстве первой очереди, не защищались от коррозии, в дальнейшем в течение непродолжительного времени для защиты арматуры использовали цементно-казеиновую обмазку, а потом перешли на битумно-глинистую. Влажность пенозолобетона после автоклавной обработки достигала 40%.

Обследования показали, что влажность конструкций зависит главным образом от температурно-влажностного режима помещений. В машинном зале на отметке +1,5 м относительная влажность воздуха достигает 75%, влажность пенозолобетона доходит до 30—40% и за последние 3 года снизилась незначительно. Степень коррозии арматуры — от 0 до 5 баллов. На отметке +9,5 влажность пенозолобетона не превышает, как правило, 20%. Наблюдается постепенное просыхание стен, причем более быстрое в тех местах, где слабее пароизоляция. В этих местах влажность бетона обычно не превышает 10%, а степень коррозии арматуры — не выше 3 баллов.

Битумно-глинистая обмазка эффективна лишь при

быстром просыхании конструкции. Если повышенная влажность сохраняется свыше 1—2 лет, то обмазка разрушается и появляется язвенная коррозия арматуры. Как видно из рис. 45, несмотря на снижение влажности

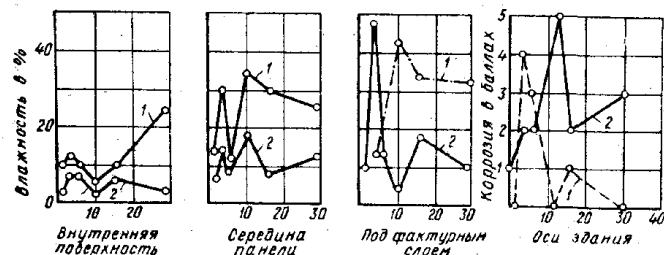


Рис. 45. Влажность газозолобетона и степень коррозии арматуры стеновых панелей машинного цеха на отметке 9,5 м (срок эксплуатации до 9 лет)
1 — в 1961 г.; 2 — в 1964 г.

стен, за 3 года степень коррозии арматуры возросла на 1—5 баллов. На уровне подкрановых путей наблюдается наименьшая влажность воздуха. Соответственно за 7 лет влажность пенозолобетона снизилась с 30% до 2—10%, а за последние 3 года — примерно в 2 раза. В плотном фактурном слое также наблюдалась коррозия арматуры, оцениваемая баллом от 1 до 5.

Анализ результатов позволил заключить, что процесс коррозии прекращается лишь при сухом температурно-влажностном режиме помещения. В этом случае пароизоляция внутренней поверхности панелей играет отрицательную роль, так как затрудняет просыхание, что способствует более интенсивному развитию коррозии арматуры. При влажном режиме ($\phi > 60\%$) необходима надежная защита арматуры и пароизоляция поверхности. Плотный фактурный слой во всех случаях нежелателен.

Приведенные примеры достаточно убедительно показывают, что в ограждающих конструкциях из ячеистого бетона влага может задерживаться весьма длительное время или даже накапливаться и вызывать интенсивную коррозию арматуры.

Одинаковые по структуре ячеистые бетоны разных видов весьма значительно различаются по своей химической природе, которая определяется режимом тверде-

ния, составом вяжущих и заполнителей, а также воздействием окружающей среды. При рассмотрении влияния вяжущих и добавок на коррозию арматуры было установлено, что ячеистые бетоны на золах пылевидного сжигания углей и сланцев в известной степени агрессивны по отношению к арматуре. Ячеистые бетоны на известковом вяжущем, как будет показано ниже, по своему действию на арматуру почти не отличаются от бетонов на портландцементе.

Автоклавная обработка ячеистых бетонов лишает их способности пассивировать сталь. В таких бетонах арматура начинает корродировать сразу после автоклавной обработки. В безавтоклавных ячеистых бетонах такого явления не наблюдается. Непосредственно после тепловой обработки и в последующий период времени, несмотря на высокую влажность изделий, арматура не корродирует (если в бетоне нет агрессивных составляющих). Объясняется это тем, что в бетоне сохраняется щелочная среда. Однако рассчитывать на длительную сохранность арматуры в безавтоклавных ячеистых бетонах нельзя, так как благодаря пористой структуре эти бетоны интенсивно карбонизируются. По данным О. А. Бененсона, безавтоклавный газозолобетон объемного веса 950 кг/м^3 , имевший первоначально показатель концентрации водородных ионов более 11,3 (тот же состав после автоклавной обработки имел $\text{pH}=9,2$), карбонизировался за 6 месяцев на глубину 18 мм, а за 2 года — на 25 мм ($\text{pH}=9,05$).

Рассмотрим сначала условия существования арматуры в ячеистых бетонах без вредных составляющих, т. е. в пено(газо)бетоне и пено(газо)силикате. Нами проводилось сравнительное изучение коррозии арматуры в плотных и ячеистых бетонах автоклавного твердения [78] на цилиндрических образцах. Составы бетонов приведены в табл. 41.

Результаты оценки состояния арматуры после 6-месячного нахождения образцов в камере с температурой воздуха 30°C и относительной влажностью 80% при повышенном содержании углекислоты и кислорода приведены в табл. 42.

Как видно из табл. 42, автоклавная обработка понижает защитные свойства бетонов, особенно при наличии в их составе тонкомолотого кремнеземистого компонента. Наиболее сильно снижение защитных свойств в ячеистых бетонах, причем практически нет разницы между

Таблица 41

Виды и составы испытанных бетонов

Вид бетона	Расход в кг на 1 м³ бетона					Водоукрепительное отношение
	портланд-цемент	известняк-песок	песок	песок молотого	щебня	
Бетон обыкновенный автоклавный	275	—	1030	—	835	0,73
То же, нормального твердения	275	—	1030	—	835	0,73
Бетон песчаный автоклавный	260	—	970	570	—	—
То же	280	—	1520	—	—	—
Пенобетон автоклавный:						
$\gamma = 600 \text{ кг/м}^3$	285	—	—	285	—	0,4
$\gamma = 800$ »	285	—	—	455	—	0,38
$\gamma = 1000$ »	270	—	—	630	—	0,36
Пеносиликат $\gamma = 800 \text{ кг/м}^3$	—	185	—	555	—	0,4

Таблица 42

Влияние вида бетона и толщины защитного слоя на состояние арматуры

Бетон	Глубина карбонизации за 6 мес.	Степень сохранности арматуры в баллах¹ при толщине защитного слоя в см					
		1		2		3	
		в	г	в	г	в	г
Обыкновенный автоклавный	19,5	9,9	8,3	10	10	9,8	10
То же, нормального твердения	—	10	10	10	10	10	10
Песчаный автоклавный с молотым песком	6	—	—	6,5	—	—	—
То же, без молотого песка	20	—	—	9,7	—	—	—
Пенобетон автоклавный $\gamma = 800 \text{ кг/м}^3$	—	4	1	4,7	2,5	2,5	4,5
Пеносиликат $\gamma = 800 \text{ кг/м}^3$	—	—	—	5,3	—	—	—

Примечания: 1. Степень сохранности арматуры оценивается по 10-балльной системе (см. подпись к рис. 16).

2. Вертикальное положение стержня при бетонировании — в, горизонтальное — г.

пенобетоном и пеносиликатом. Толщина защитного слоя пенобетона не играет роли.

Горизонтальное расположение стержней при бетонировании, как правило, приводит к более значительной их коррозии, чем вертикальное. Развитие коррозии начинается на нижней части поверхности арматуры, что свя-

зано с образованием подарматурной пустотности при осадке бетонной смеси в процессе схватывания.

Вторая серия образцов была изготовлена из пенобетона (состав см. в табл. 38) объемным весом 600, 800 и 1000 кг/м³ с защитным слоем 2 см при горизонтальном расположении арматуры. В табл. 43 приведены значения коэффициента паропроницаемости эти бетонов и глубина карбонизации их за 1 месяц.

Данные о результатах испытания образцов при основном режиме приведены на рис. 46. Степень сохранности арматуры в пеносиликате не зависит от его объемного веса. Из данных рис. 46 и табл. 43 следует, что с увеличением объемного веса пенобетона коэффициент паропроницаемости и глубина карбонизации его несколько уменьшаются, а степень развития коррозии возрастает.

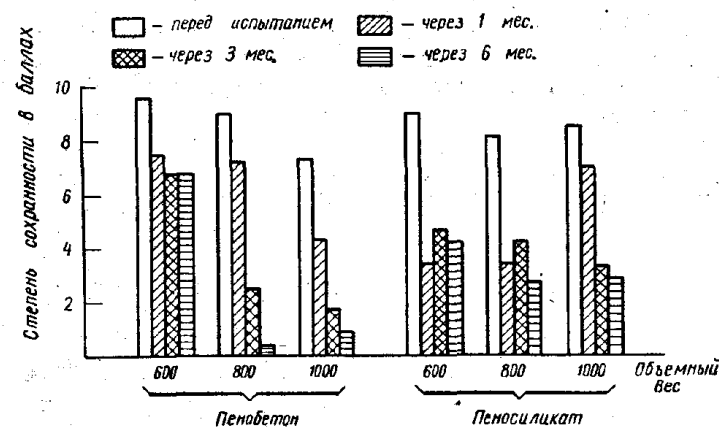


Рис. 46. Влияние объемного веса ячеистых бетонов на сохранность арматуры

Таблица 43

Характеристика пенобетона

Объемный вес в кг/м³	Коэффициент паропроницаемости	pH	Глубина карбонизации в мм за 1 мес.
600	0,02	9,5—10	10—12
800	0,018	9—9,5	7—8
1000	0,014	8,5—9	5

Этот на первый взгляд парадоксальный факт объясняется тем, что увеличение объемного веса и плотности пенобетона достигалось повышением доли молотого песка, который активно связывал известь в процессе автоклавной обработки. В результате снизилась величина рН в водных пленках и ухудшились условия сохранности арматуры, несмотря на повышение плотности бетона.

Имеет значение, очевидно, также плотность перегородок между ячейками, так как расход вяжущего на единицу объема материала перегородок тем больше, чем меньше объемный вес ячеистого бетона. Это подтверждают данные И. Т. Кудряшова [63].

Весьма существенным выводом из данной работы явилось то, что в связи с большой пористостью и проницаемостью ячеистых бетонов увеличение толщины защитного слоя у арматуры, расхода вяжущего и объемного веса не улучшает условий защиты арматуры.

В другой серии испытаний ячеистых бетонов выяснялось влияние на развитие коррозии арматуры вида и расхода вяжущего, объемного веса бетона, введения добавки замедлителя коррозии — нитрита натрия. Испытание производилось в термогигростатической камере при температуре 30°C и относительной влажности воздуха

80%. Результаты испытания приведены в табл. 44 и на рис. 47.

Таблица 44

Влияние объемного веса и расхода вяжущего на состояние арматуры

объемный вес в кг/м³	характеристика материалов		коэффициент воздухопроницаемости $\times 10^3$	Площадь поражения в %	Наибольшая глубина в мм	Потеря веса в г
	в пенобетоне	в пеносиликате				
800	220	—	0,52	87	70	0,098
		150	—	5	62	0,029
	270	—	0,295	67	110	0,115
		175	—	17	64	0,036
	320	—	0,073	50	44	0,054
		200	—	2	100	0,034
1000	270	—	0,022	80	56	0,075
		150	—	20	26	0,034
800*	270	—	—	0	0	0
		175	—	0	0	0

* Бетон с добавкой нитрита натрия в количестве 2% веса вяжущего.

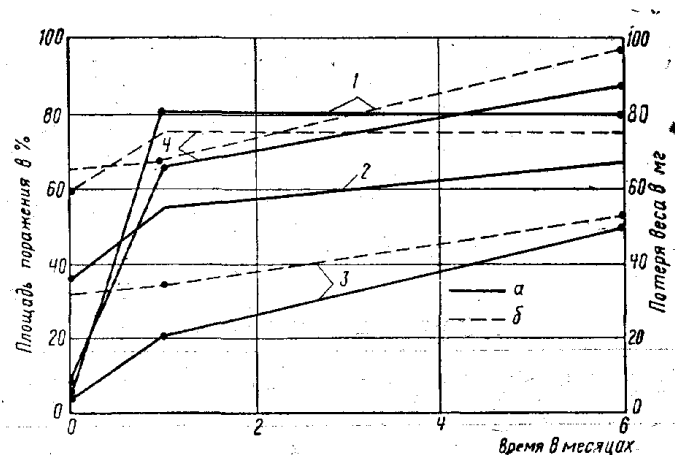


Рис. 47. Кинетика коррозии арматуры в пенобетоне

1 — $\gamma = 800$, $\text{Ц} = 220$; 2 — $\gamma = 800$, $\text{Ц} = 270$; 3 — $\gamma = 800$, $\text{Ц} = 320$; 4 — $\gamma = 1000$, $\text{Ц} = 270$; а — площадь поражения; б — потеря веса

Четкой зависимости показателей коррозии от расхода вяжущего, так же как и от объемного веса, не наблюдается. В пенобетоне увеличение расхода цемента приводит к некоторому сокращению площади и глубины коррозии. При добавке замедлителя коррозии — нитрита натрия — в количестве 2% веса вяжущего в течение 6 месяцев испытания коррозии арматуры не обнаружено. Распространение коррозии по поверхности арматуры первоначально идет быстро, затем замедляется (рис. 47). Этого нельзя сказать о весовых потерях при относительной влажности воздуха 80%, которые в воздушно-сухих условиях, по данным В. К. Райдна [99], свидетельствуют о затухающем характере коррозионного процесса (см. рис. 25).

Весьма различная воздухопроницаемость пенобетонных образцов (табл. 44) не оказывает заметного влияния на показатели коррозии. На основании этого можно сделать вывод, что в ячеистых материалах не скорость диффузии кислорода лимитирует коррозионный процесс.

Наши данные по коррозии арматуры в пенобетоне естественного твердения показывают, что до 1 месяца, пока бетон имеет высокую щелочность, коррозия арматуры не возникает, несмотря на пористость бетона. После 6 месяцев, когда вследствие глубокой карбонизации щелочность резко упала, коррозия достигает примерно того же уровня, что и в автоклавном пенобетоне.

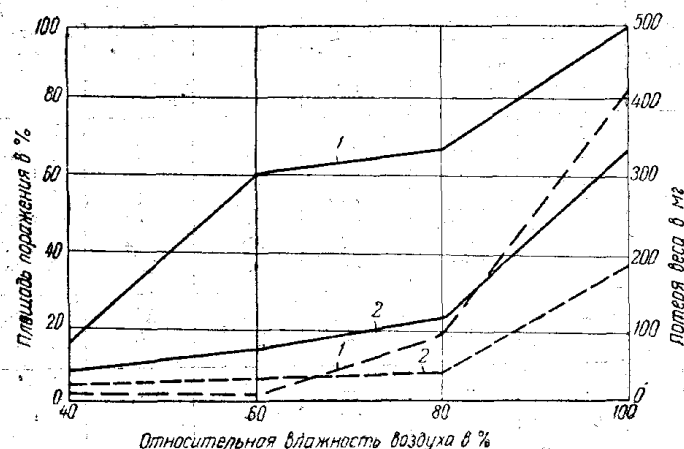


Рис. 48. Влияние влажности воздуха на состояние арматуры
сплошные кривые — в пенобетоне; пунктирные — в пеносиликате; 1 —
площадь поражения; 2 — потеря веса

Для уточнения полученных нами ранее данных [78] о влиянии относительной влажности воздуха на развитие коррозии арматуры в ячеистых бетонах была изготовлена серия образцов объемным весом 800 кг/м^3 с расходом цемента в пенобетоне 270 кг/м^3 и извести в пеносиликате 175 кг/м^3 . Результаты шестимесячных испытаний (рис. 48) свидетельствуют о том, что при изменении относительной влажности воздуха от 40 до 80% площадь поражения арматуры в пенобетоне увеличивается примерно в 5 раз, а потеря веса — в 2,5 раза. Дальнейшее повышение влажности до 95% приводит к 100%-ному поражению поверхности арматуры и резкому увеличению весовых потерь. В пеносиликате данного состава распространение коррозии и весовые потери меньше, чем в пенобетоне, влияние же влажности среды аналогично.

По данным Ю. М. Бутта [24], наблюдается интенсив-

ная коррозия арматуры после 1—2 лет эксплуатации кровельных плит и стеновых панелей из автоклавного газобетона в животноводческих помещениях, где относительная влажность воздуха летом равна 75—80%, а зимой и весной — 85—97%.

Таким образом, подтвердились полученные нами ранее данные о резком усилении процесса коррозии при нахождении армированных ячеистых бетонов в воздушной среде высокой влажности. Это объясняется, по-видимому, особенностями структуры ячеистых материалов, в которых капиллярная вода благодаря более крупной пористости появляется при более высокой влажности воздуха, чем в обычном бетоне, не препятствуя в то же время доступу кислорода к поверхности арматуры. В связи с этим для армированных конструкций из ячеистых бетонов особенно опасно длительное увлажнение.

Таблица 45

Состояние арматуры в автоклавных ячеистых бетонах в условиях периодического увлажнения (на балансирной установке)

Бетон	Характеристика бетона	Срок испытания в месяцах	Площадь коррозии в %	Глубина коррозии в мм	Потеря веса в г
Пенобетон	Расход цемента 270 кг/м^3 . . .	6	40	156	0,017
	$\gamma = 800 \text{ кг/м}^3$	12	100	182	0,1145
	То же, с добавкой нитрита натрия	{ 6 12	10	91	0,0487
			25	119	0,1197
Пеносиликат	Расход извести 175 кг/м^3 . . .	6	35	184	0,2274
	$\gamma = 800 \text{ кг/м}^3$	12	96	202	0,2525
То же	То же, с добавкой нитрита натрия	{ 6 12	15	56	0,0607
			80	88	0,0867

Результаты испытания в течение 1 года образцов ячеистых бетонов с арматурой при периодическом увлажнении пресной водой и воздушной сушке (на балансирной установке), приведенные в табл. 45, показывают, что эти условия являются столь же опасными для арматуры в пеносиликате, как и высокая влажность воздуха. Для арматуры в пенобетоне более опасными ока-

зались условия воздушно-влажные. По-видимому, вследствие более прочного удерживания пленочной воды материалами на цементном вяжущем, чем на известково-песчаном (о чем свидетельствуют данные И. Я. Ривлин), в первых диффузия кислорода к поверхности металла тормозится при насыщении пор водой.

Замедляющее действие добавки нитрита натрия оказалось в данных условиях меньшим, чем в воздушно-влажных. В пенобетоне нитрит натрия вызвал увеличение интенсивности коррозии за счет концентрации ее на меньшей площади. Это обстоятельство еще раз свидетельствует об опасности использования нитрита натрия для замедления коррозии арматуры путем введения его в бетон.

Исследования коррозии арматуры в ячеистых автоклавных материалах на песке позволяют сделать следующие выводы.

Автоклавная обработка ячеистых бетонов с молотым песком лишает их основы защитного действия — высокой щелочности. Вследствие большой пористости ячеистых бетонов их проницаемость находится выше тех значений, при которых она может влиять на скорость коррозии. Поэтому при определенных внешних условиях коррозия арматуры в ячеистых бетонах развивается практически вне зависимости от их состава. Резко усиливает коррозию высокая влажность воздушной среды. Аналогично действует периодическое увлажнение, особенно на арматуру в пеносиликате. Процесс коррозии арматуры в ячеистом бетоне постепенно замедляется, по-видимому, до образования трещин в защитном слое.

Замедлитель коррозии — нитрит натрия, вводимый в бетонную смесь в количестве 2% веса вяжущего, при периодическом увлажнении не защищает от коррозии.

В другой нашей работе, проведенной совместно с А. Т. Барановым и Л. М. Розенфельдом при участии В. Г. Батракова, изучались вопросы коррозии и защиты арматуры в конструкциях из пенобетонов на основе зол [5].

Образцы пенозолобетона готовили на смеси молотой и немолотой золы ТЭЦ. В качестве вяжущих применяли портландцемент марки 400 Воскресенского завода, известь и гипсовый камень. Образцы-призмы $5 \times 5 \times 15$ см с помещенным внутрь стержнем запаривали в автоклаве при режиме 5+4 ч + естественный спуск. Было отмечено, что на стержнях коррозия появляется сразу

после автоклавной обработки. После 3- и 12-месячного хранения образцов в камере с температурой 30°C и относительной влажностью воздуха 80% было зафиксировано развитие коррозии арматурных стержней. К 3 месяцам было поражено 95—100% поверхности, причем глубина язв достигала 185—250 мк. К 1 году несколько возросла потеря веса, однако коррозия значительно замедлилась. Четкого влияния состава пенозолобетона на развитие коррозии арматуры выявить не удалось.

Вид примененной золы не оказал заметного влияния на развитие коррозии арматуры, несмотря на различное содержание серы в золе. Глубина коррозии в пенозолобетоне за 1 год достигла 440 мк; скорость коррозии при относительной влажности воздуха 95% оказалась примерно в 10 раз большей, чем при влажности 80%. Было установлено также, что даже при низкой относительной влажности воздуха (50%) коррозия арматуры в пенозолобетоне полностью не прекращается.

Автоклавная обработка существенно понижает защитные свойства пенозолобетона. Снижение pH составляет величину порядка 1—2 единиц, свободная окись кальция исчезает полностью. В образцах безавтоклавного пенозолобетона непосредственно после изготовления совершенно не было коррозии. В дальнейшем коррозия наблюдалась в значительно меньшей степени, что можно объяснить только большей щелочностью пенобетона этого вида. Однако как только процесс карбонизации достигает поверхности арматуры, коррозия при одинаковой влажности развивается не менее интенсивно, чем в автоклавном пенобетоне.

В табл. 46 приведены результаты испытания защит-

Таблица 46

Состояние арматуры в пенозолобетоне в зависимости от вида тепловой обработки и карбонизации бетона

Вид обработки бетона	Потенциал в мВ через 12 суток	Площадь коррозии в %	Наибольшая глубина коррозии в мк	Потеря веса в %
Пропаривание	659	20	9	—
Пропаривание и карбонизация	672	85	52	0,0088
Запаривание	652	25	20	0,0171
Запаривание и карбонизация	662	91,6	34	0,0196

ных свойств пенозолобетона состава 1:2 на белгородском цементе марки 400 и золе ТЭЦ № 11. Расход цемента 250 кг/м^3 , $B/C=0,6$, объемный вес 800 кг/м^3 . Через 6 месяцев хранения образцов в камере с температурой 30°C и относительной влажностью 80% арматура корродировала независимо от режима твердения бетона. Образцы, не подвергавшиеся предварительной карбонизации, в процессе испытания полностью карбонизировались.

По-видимому, в результате естественной карбонизации свойства неавтоклавного пенозолобетона практически сравнялись со свойствами автоклавного и искусственно карбонизированного пенозолобетона. Это положение подтверждается результатами измерения потенциалов арматуры, которые во всех случаях оказались высокими. В предварительно карбонизированных образцах они выше, чем в некарбонизированных.

Особенности ячеистых бетонов таковы, что практически во всех случаях требуется активная защита арматуры в них. Эти бетоны почти всегда применяются в ограждающих конструкциях, где даже при нормальном влажностном режиме помещений возможно накопление влаги вследствие ее конденсации в порах при миграции пара под действием градиента температуры.

§ 20. Защитные покрытия для арматуры в ячеистых бетонах

Рассмотренные выше особенности структуры и химизма ячеистых бетонов, а также случаи серьезных повреждений армированных конструкций из этих бетонов из-за коррозии арматуры убедительно доказывают необходимость специальных мероприятий по ее защите. Эти мероприятия могут осуществляться по двум основным направлениям: первое — защита ячеистого бетона от увлажнения; второе — нанесение на поверхность арматуры защитных покрытий перед бетонированием конструкций.

Выше было показано, что для защитных свойств ячеистых бетонов по отношению к арматуре не имеют решающего значения ни вид и количество вяжущего (цемента или извести), ни объемный вес бетона, ни режим твердения. Введение в бетонную смесь замедлителей коррозии не улучшает существенно защитных свойств ячеистого бетона. Так, например, нитрит натрия в соста-

ве бетона не оказал достаточного защитного действия при периодическом увлажнении образцов.

Таблица 47

Состояние арматуры в автоклавном пеносиликате

Добавка	Режим хранения	Площадь коррозии в %	Глубина коррозии в мм	Потери веса в %
Без добавки	Относительная влажность 95% и температура 30°C	100	469	0,175
То же	Комнатные условия	33	128	0,035
»	Производственное помещение с высокой влажностью воздуха	100	305	0,266
Нитрит натрия 2% веса извести	Относительная влажность 95% и температура 30°C	0	0	—
То же	Комнатные условия	0	0	—
»	Производственное помещение с высокой влажностью воздуха	100	495	0,289

В табл. 47 приводятся результаты годичных испытаний образцов из пеносиликата с арматурой. Состав пеносиликата 1:3,2, расход извести 180 кг/м^3 , $B/B=0,43$, объемный вес 800 кг/м^3 . Добавка нитрита натрия в пеносиликат предохраняет арматуру от коррозии в условиях влажной камеры и не предохраняет в условиях влажного цеха. Таким же испытаниям подвергались образцы автоклавного пенобетона, показавшие аналогичные результаты.

Защитное действие различных замедлителей коррозии было проверено нами в виде добавок в бетон, а также в цементно-казеиновую суспензию для покрытия арматуры. Испытание образцов, приготовленных из пенозолобетона объемным весом 800 кг/м^3 с добавкой нитрита натрия в количестве 2% веса цемента в камере с температурой 30°C и относительной влажностью 80% (табл. 48), показало, что добавка даже несколько ускорила развитие коррозии, особенно в глубину. Это подтверждает известное положение о том, что если замедлитель коррозии анодного типа введен в количестве, недостаточном для полного торможения коррозии, то она становится более интенсивной. Защитное покрытие ар-

матуры цементно-казеиновой суспензией с нитритом натрия в этих условиях себя полностью оправдало — признаков коррозии не наблюдалось за все 12 месяцев испытания.

Таблица 48

Влияние добавки нитрита натрия и защитного покрытия на состояние арматуры в автоклавном пенозолобетоне

Способ защиты арматуры в образцах	Срок испытания в месяцах	Площадь коррозии в %	Глубина коррозии в мм	Потеря веса в %
Контрольный, без защиты	0	9	13	0,013
	3	98	84	0,185
	12	100	108	0,647
Добавка в бетон нитрита натрия	0	3	21	0,0161
	3	100	264	0,189
	12	100	322	0,718
Цементно-казеиновое покрытие с нитритом натрия	12	0	0	0

За последние годы много видов защитных покрытий арматуры в конструкциях из ячеистых бетонов было проверено в лабораторных условиях [14, 140], и некоторые нашли практическое применение на заводах ЖБИ [39]. «Инструкцией по технологии изготовления изделий из автоклавного ячеистого бетона» [119] в качестве защитных покрытий арматуры рекомендуется холодная цементно-битумная мастика, цементно-казеиновая смесь и цементно-полистирольная смесь.

Однако не все покрытия, применяемые для защиты арматуры в ячеистых бетонах, достаточно эффективны. Причина этого в примитивной технологии их нанесения, не обеспечивающей достаточную толщину и сплошность покрытия, либо в механических повреждениях его при транспортировании и укладке каркасов в формы.

Некоторые покрытия (битумно-глинистое, цементно-казеиновое) со временем теряют свои защитные свойства, и коррозия арматуры протекает под ними весьма интенсивно [14]. Это объясняется капиллярно-пористой структурой покрытий. Так, установлено, что в битуме имеются межмицеллярные и межмолекулярные микро-

поры с приблизительными размерами $5-30 \cdot 10^{-8}$ см. В смешанных же композициях образуются поры на границе битум — наполнитель [73].

Нами были исследованы различные композиции для защиты арматуры в автоклавных газобетонах. Выяснилось, что при автоклавной обработке под покрытиями часто возникает коррозия в виде пятен или точек. Поэтому защитный эффект покрытий приходится оценивать по результатам дальнейшего испытания: развиваются или затухают коррозионные процессы под покрытиями.

Покрытия, применяемые в настоящее время, можно разделить на водные суспензии, водные эмульсии и суспензии на летучих растворителях.

Типичным представителем первой группы является цементно-казеиновое покрытие, разработанное и примененное одним из первых. Водные составы на основе цемента с клеевой добавкой (казеиновый клей, эфиры целлюлозы и т. д.), которая вводится для удержания покрытия на поверхности арматуры до термообработки, применялись довольно широко [89—92]. Нами было исследовано цементно-казеиновое покрытие состава: цемент 100 в. ч., казеиновый клей 5 в. ч., вода 40—43 в. ч. Как показывают натурные обследования и длительные лабораторные испытания, покрытие имеет ряд технологических недостатков и со временем теряет свое защитное действие. Можно утверждать, что защитное действие цементно-казеинового состава основано на пассивирующих свойствах цемента, так как из-за большой проницаемости оно не является изолирующим. Об этом свидетельствуют замеры омического сопротивления (рис. 49, кривая 1). Пассивирующее действие цемента со временем перестает сказываться. Равновесный потенциал стали под покрытием разлагается (рис. 50, кривая 1). Причина этого явления может заключаться в изменении состава. Результаты определения pH водной вытяжки из цементно-казеинового покрытия (рис. 51, кривая 1) свидетельствуют об уменьшении pH со временем.

Проведенные исследования [14, 67] показали, что можно значительно повысить защитные свойства цементно-казеинового покрытия, если ввести в его состав ингибиторы коррозии. Табл. 49 иллюстрирует влияние, оказываемое на состояние арматуры защитными покрытиями из цементно-казеиновой суспензии с добавкой за-

медлителей коррозии. Электрический потенциал защищенных стержней значительно более положителен, чем незащищенных, причем карбонизация пенозолобетона не влияет на величину потенциала арматуры под покрытием, т. е. не изменяет его защитных свойств.

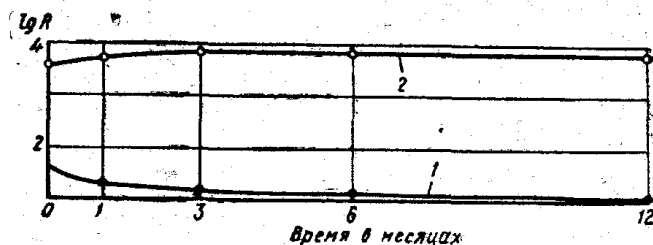


Рис. 49. Изменение омического сопротивления цементно-казеинового (1) и цементно-латексного (2) покрытий

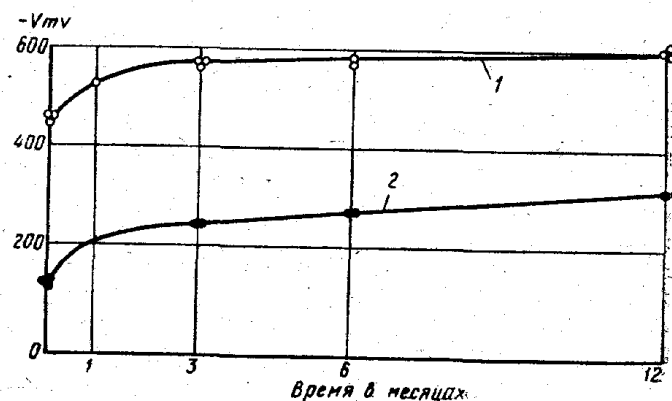


Рис. 50. Изменение электродного потенциала арматуры под цементно-казеиновым (1) и цементно-латексным (2) покрытиями

Таким образом, было установлено, что хорошую, хотя и не абсолютно надежную, защиту арматуры в ячеистых бетонах можно получить путем использования покрытий типа цементно-казеинового с ингибиторами.

Для установления оптимальной добавки наиболее доступного, дешевого и достаточно эффективного замедлителя — нитрита натрия — нами были проведены испыта-

ния [14], результаты которых представлены в виде графиков на рис. 52. Испытания подтвердили, что покрытия с нитритом натрия более надежно защищают арматуру, чем без него. Оптимальное количество нитрита

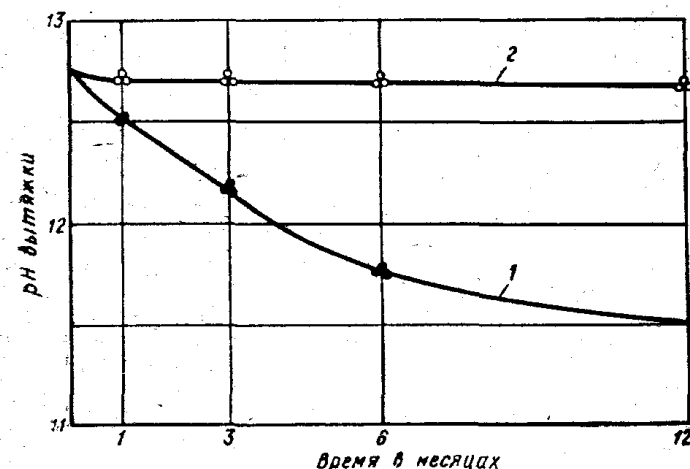


Рис. 51. Изменение pH водной вытяжки из цементно-казеинового (1) и цементно-латексного (2) покрытий

Таблица 49
Результаты испытаний защитных цементно-казеиновых покрытий арматуры в пенозолобетоне

Вид обработки бетона	Добавка замедлителя в состав покрытия в % от веса цемента	Потенциал арматуры в мВ после 12 суток испытания	Состояние арматурных стержней после 6 мес. хранения во влажной камере
Запаривание	Без покрытия	632	Все стержни ржавые
То же	Хромат бария-2	342	Чистые
Запаривание и карбонизация	То же	328	»
Запаривание	Нитрит натрия-20	319	»
Запаривание и карбонизация	То же	326	Один стержень с тонкой пленкой ржавчины около торца, остальные стержни чистые
Запаривание	Бензоат натрия-20	249	Чистые
Запаривание и карбонизация	То же	—	»

натрия в цементно-казеиновой суспензии находится в пределах 5—15%. Карбонизация покрытия не оказывает заметного влияния на его защитные свойства.

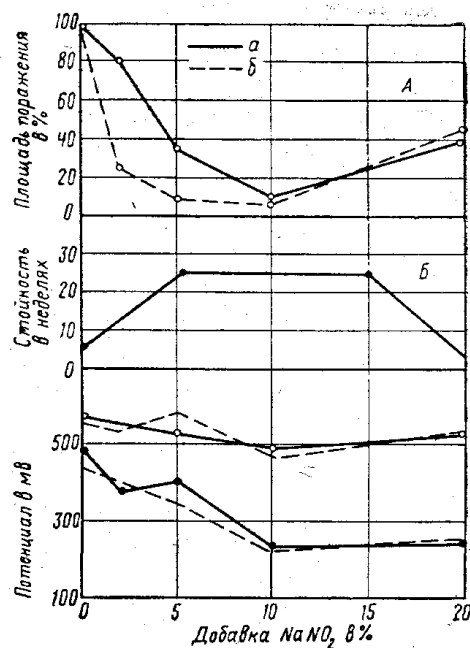


Рис. 52. Влияние NaNO_2 на защитное действие цементно-казеинового покрытия без бетона (А — при периодическом увлажнении 3%-ным раствором NaCl в течение 10 дней; Б — во влажной камере)

2 а — образцы запарены; б — образцы запарены и карбонизированы; 1 — после 1 сут. периодического увлажнения в 3% NaCl ; 2 — то же, после 6 сут.

Опыты показали, что защитные покрытия на основе цементно-казеиновой суспензии практически не ухудшают сцепления арматуры с ячеистым бетоном по сравнению с контрольными (незащищенными) образцами. Ускоренная сушка покрытий при повышенной температуре и обдуве воздухом не изменяет прочности и адгезии покрытия, т. е. не влияет на величину сцепления бетона с арматурой. Вызревание покрытия в камере с относительной влажностью 80% при температуре 60°C приводит к небольшому увеличению сцепления. Вызревание покрытия в течение 24 ч во влажной камере при температуре 30°C повышает сцепление вдвое. Длительная выдержка цементно-казеиновой суспензии до ее нанесения приводит к снижению сцепления арматуры с бетоном. При выдержке до двух суток это понижение не существенно. Семидневное выдерживание при нулевой температуре вызывает резкое ухудшение сцепления.

Однако при изучении свойств цементно-казеиновой водной суспензии было установлено, что она обладает некоторыми особенностями, снижающими ее достоинства как защитного покрытия. Суспензия подвержена расслаиванию. Седиментация частиц цемента происходит довольно быстро и для сохранения однородности смеси необходимо часто и энергично ее перемешивать. Срок существования жидкого цементно-казеинового состава ограничен вследствие процессов гидратации и схватывания цемента. Правда, казеин замедляет схватывание цемента и значительно увеличивает жизнеспособность жидкого состава, но не настолько, чтобы это не влияло на технологию нанесения покрытия. Наконец, высушенное покрытие хрупко и легко повреждается при ударах. Изучение вопроса показало, что значительного улучшения свойств цементно-казеинового покрытия, в частности стабилизации жидкого состава и эластичности, стойкости к ударам затвердевшей пленки, а также и защитных свойств, можно добиться, вводя в его состав латексы.

За рубежом применяют цементно-латексные покрытия, содержащие вулканизирующие добавки. Например, в ГДР разработан такой состав: буна-латекса 14,2%, воды 19%, цемента 62,5%, клеевого раствора 3,8%, вулканизирующей пасты 0,5%. Клеевой раствор состоит из воды — 75%, 25%-ного раствора аммиака — 8,3%, казеина — 16,7%.

Нами был применен дивинилстирольный латекс СКС-65 с соотношением дивинила и стирола 35:65. Латекс имеет низкую температуру пленкообразования, позволяющую получать без применения нагрева и пластификаторов достаточно твердую и атмосферостойкую пленку. Он не коагулирует при введении пигментов и механических воздействиях. Устойчивость латекса не нарушается при воздействии низких и высоких (до 200°C) температур; он стоек в щелочных средах. Твердение покрытий с добавкой латекса СКС-65 происходит за счет гидратации и схватывания цемента и одновременного пленкообразования каучуковой основы латекса в процессе автоклавной обработки. Был подобран следующий состав цементно-латексного покрытия:

портландцемент	100 в. ч.
латекс СКС-65	20 »
казеиновый клей	5 »
вода	35—37 »

Этот состав отличается высокой стабильностью и за одно погружение дает пленку покрытия толщиной 0,2—0,3 мм.

Введение латекса СКС-65 в цементно-казеиновое покрытие значительно улучшило его защитные свойства. Во время автоклавной обработки под покрытием с добавкой латекса возникает незначительная коррозия, которая дальше не развивается.

Измерение потенциалов арматуры показывает, что поверхность металла под покрытием находится в устойчивом пассивном состоянии (см. рис. 50, кривая 2). Замер сопротивления пленок свидетельствует о постепенном уплотнении структуры их (см. рис. 49, кривая 2). Это происходит, по-видимому, не только в результате формирования каучуковой фазы в процессе образования пленки, но и благодаря уплотнению макроструктуры при гидратации цемента в условиях влажного режима испытаний.

Результаты исследования микроструктуры и степени гидратации цемента в цементно-латексном покрытии позволяют заключить, что защитные свойства цементно-латексной пленки обусловлены сплошностью каучуковой фазы, благодаря которой длительно сохраняется высокая щелочность покрытия. Об этом свидетельствуют результаты измерения pH водной вытяжки из цементно-латексного покрытия (см. рис. 51, кривая 2).

Если покрытие имеет дефекты (крупные поры, трещины, околы), то на отдельных участках поверхности металла под ним начинает развиваться язвенная коррозия. Проявление язвенной коррозии особенно заметно при недостаточной концентрации анодных замедлителей. Значения стационарного потенциала электрода зависят от окислительно-восстановительного потенциала электролита. При более высоких значениях окислительно-восстановительного потенциала язвенная коррозия может быть подавлена в результате возникновения пассивного состояния и на анодных участках. Окислительно-восстановительный потенциал системы можно повысить, если ввести в состав покрытия замедлители анодного типа.

Выше было показано ингибирующее действие добавки нитрита натрия в цементно-казеиновое покрытие. Основной причиной коррозионных поражений арматуры под этим покрытием является, очевидно, снижение кон-

центрации нитрита натрия из-за его высокой растворимости.

В качестве малорастворимой пассивирующей добавки для цементно-латексной обмазки нами был исследован хромат бария, который является безопасным анодным замедлителем при условии, если он введен в количестве, достаточном для полного прекращения коррозии [106]. Хромат бария малорастворим, поэтому опасность уменьшения его концентрации за счет вымывания исключается.

Результаты длительных испытаний различных покрытий арматуры приведены в табл. 50, из которой следует, что защитные свойства цементно-латексного покрытия весьма высоки. При добавке же в него хромата бария коррозия стали под покрытием полностью исключается. Цементно-казеиновое покрытие показало слабое защитное действие при длительном испытании, а добавка в него нитрита натрия привела даже к усилению коррозии, приблизив степень поражения к состоянию образцов, испытывавшихся без защитного покрытия. По-видимому, последнее связано с образованием в отдельных местах покрытия дефицита концентрации нитрита натрия вследствие миграции его во влажный бетон.

Изучение технологических свойств цементно-латекс-

Таблица 50

Результаты испытаний покрытий в газобетоне при относительной влажности 80% и температуре 30°C в течение 5 лет

Вид покрытия арматуры	Глубина язв в мм	Площадь поражения в %	Состояние арматуры
Цементно-латексное	20—50	5—10	На отдельных образцах небольшие пятна ржавчины
То же, с 10% хромата бария	0	0	Поверхность чистая, матовая
Цементно-казеиновое	200—300	50—60	Пятна ржавчины, язвы
То же, с 10% нитрита натрия	500—700	100	Сплошная слоистая ржавчина, язвы
Без покрытия	500—600	100	Сплошная слоистая ржавчина

ного покрытия показало, что жидкий состав стабилен и не расслаивается, однако его жизнеспособность невелика: на вторые сутки после приготовления он загустевает и теряет способность наноситься на поверхность арматуры в виде сплошной однородной пленки.

Для увеличения жизнеспособности состава было проверено действие замедлителей схватывания — окиси цинка, буры и трехокси бора, которые добавляли в количестве 1,5% веса цемента, а также сульфитно-спиртовой барды — 0,5% веса цемента.

Оказалось, что все опробованные добавки отодвигают начало схватывания быстросхватывающегося воскресенского цемента, причем наиболее эффективны трехокись бора и с.с.б. Значительно замедляет схватывание теста астраханского цемента (до 11 ч) бура. Другие добавки, наоборот, ускоряют схватывание.

Жизнеспособность цементно-латексной обмазки на воскресенском цементе определяли по изменению вязкости и предельного напряжения сдвига. Оказалось, что оба эти показателя для обмазки с добавкой трехокси бора на четвертые сутки несколько снижаются, однако это не мешает обмазке хорошо наноситься на поверхность арматуры слоем толщиной 350—400 мк. На пятые сутки вязкость возросла, но обмазка сохраняла свойства наноситься на арматуру, на шестые сутки — схватилась.

У обмазки с добавкой с.с.б. на четвертые сутки предельное напряжение сдвига возрастает примерно вдвое, а вязкость — в 1,5 раза. В связи с этим несколько увеличивается толщина покрытия. На пятые сутки обмазка потеряла способность образовывать покрытие. Цементно-латексная обмазка без добавки замедлителей на вторые сутки оказалась уже не пригодной для нанесения вследствие загустевания.

Испытание механических свойств высушенного цементно-латексного покрытия показало удовлетворительную эластичность (не выше 20 по ОСТ 10086—39, МИ 22), адгезию (0 по ТУ МХП 4202, СМН 8) и прочность на удар (не менее 10 кг·см по ГОСТ 4765—59). Таким образом установлено, что можно замедлить схватывание цемента в цементно-латексном составе. Однако при применении трехокси бора в качестве замедлителя необходимо учитывать минералогический состав цемента.

Цементно-латексный состав отличается простотой

приготовления; будучи нанесен на арматуру, быстро высыхает (в течение 2 ч при комнатной температуре), образуя прочную пленку; обеспечивает хорошее сцепление арматуры с газобетоном. Предложенная нами рецептура цементно-латексного состава выгодно отличается от применяемых за рубежом [93] своей простотой, в частности отсутствием вулканизатора.

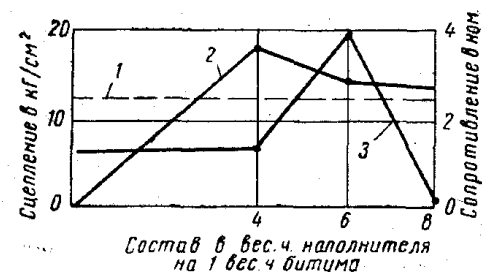
Большой практический интерес представляют защитные покрытия арматуры на основе битума и полимеров, поскольку они в отличие от цементно-казеиновых покрытий имеют неограниченную жизнеспособность, так как не содержат воды, и цемент в них не гидратируется. Кроме того, исключается такая дефицитная составляющая, как казеиновый клей.

Неудачные попытки применения лаковых и битумных пленок для защиты арматуры связаны главным образом с тем, что они, как правило, не выдерживают условий автоклавной обработки. Устойчивость пленок в этих условиях, как будет показано ниже, может быть обеспечена выбором стойкого связующего и достаточным количеством наполнителя.

Из защитных составов на основе органических связующих наиболее доступными являются битумные. Наши опыты [14] показали, что сохранность покрытий на основе битума БН-V после запаривания обеспечивается при введении в него не менее 4 в. ч. наполнителя (молотого песка или цемента). Наполнитель вводят в битумный лак, получаемый растворением битума в уайт-спирите, бензине или керосине. Увеличение содержания наполнителя до 6 в. ч. повышает омическое сопротивление покрытия (рис. 53), а до 8 в. ч. резко понижает его. Сопротивление сдвигу при выдергивании из бетона арматурных стержней с битумно-цементным покрытием состава 1:4—1:8 выше сопротивления сдвигу конт-

Рис. 53. Сопротивление сдвигу арматуры

1 — незащищенной; 2 — защищенной; 3 — омическое сопротивление покрытия



рольных стержней без покрытия. Покрытия с цементом отличаются лучшими защитными свойствами, чем покрытия с молотым песком.

Как удалось показать в работе, выполненной Р. Б. Шапиро совместно с нами, положительное влияние цемента в битумном покрытии можно объяснить уплотнением пористой пленки новообразованиями при гидратации зерен клинкера. Образование жесткого каркаса из зерен клинкера в пленке битума при запаривании в автоклаве предотвращает впитывание битума в ячеистый бетон и обеспечивает высокое сопротивление сдвигу арматуры в бетоне.

Высокие защитные свойства цементно-битумного покрытия подтверждены многочисленными испытаниями [14]. По нашим последним данным, это покрытие не уступает в защитной способности цементно-латексному, что видно из результатов трехлетних испытаний (табл. 51). Результаты более чем пятилетних испытаний образцов защитных покрытий арматуры в пенозолобетеоне, изготовленных на Кураховском заводе А. А. Мрищукон при нашем участии, приведены в табл. 52. Использовались битум марки БН-V, молотая зола-унос, портландцемент и бензин 2-го сорта. Результаты испытания цементно-битумных покрытий вполне удовлетворительны и целиком согласуются с полученными нами в лаборатории (см. табл. 51).

Из покрытий на основе полимерных материалов наибольшее распространение получило цементно-полистирольное. Полистирол не разрушается при обработке в автоклаве, он сравнительно дешев и недефицитен. Некоторые разновидности этого покрытия на основе 15%-ного раствора полистирола в толуоле были испытаны нами совместно с Н. А. Шашкиной [14]. В качестве наполнителей использовали портландцемент, цемент в смеси с молотым песком (1:2), алюминиевую пудру и цинковую пыль. Толщина покрытий, полученных однократным погружением арматурного стержня, после сушки составляла 0,15—0,20 мм. Половину образцов после сушки запарили в автоклаве, поместив в песок, увлажненный известковой водой. Коррозионное испытание состояло в периодическом увлажнении образцов 3%-ным раствором поваренной соли. Результаты показали, что часть покрытий более стойка, чем цементно-казеиновые, однако автоклавная обработка резко понизила защитные свойства покрытий с алюминиевой пудрой и цинковой

Таблица 51

Защитное действие покрытий арматуры в газозолобетеоне
объемным весом 950 кг/м³ в атмосферных условиях

Вид покрытия	Срок испытания в месяцах	Площадь поражения в %	Максимальная глубина поражения в мм	Потеря веса в г	Скорость коррозии в г/см ² ·ч·10 ⁷
Цементно-битумное	П. а.	4	3	0,0020	55,5
	6	5,5	5	0,0013	0,354
	12	5,8	7	0,0029	0,22
	36	6,7	7	0,0038	0,096
Цементно-латексное	П. а.	3,3	5	0,0018	50
	6	63,5	5	0,0020	0,314
	12	3,8	5	0,0022	0,27
	36	4,7	7	0,0030	0,091
Цементно-полистирольное	П. а.	23	3	0,072	200
	6	54	15	0,128	19,6
	12	77	32	0,200	15,4
	36	100	190	0,420	10,6
Без покрытия	П. а.	4	50	0,020	55,5
	6	74	110	0,170	25,2
	12	97	170	0,525	39,8
	36	100	290	0,947	26,3

Примечание. П. а. — непосредственно после запаривания в автоклаве.

пылью вследствие разрушения покрытия реакцией между этими наполнителями и гидроокисью кальция. Первоначально высокие отрицательные потенциалы арматуры под этими покрытиями свидетельствовали об их протекторном действии. Величина потенциала после запаривания показывает отсутствие протекторного действия. Обмазки обеспечивают отличное сцепление арматуры с бетоном.

Значительные по объему исследования цементно-полистирольных покрытий для защиты арматуры в автоклавных силикатных бетонах были выполнены в б. РосНИИМСе (ныне ВНИИСтром), что позволило рекомендовать эти покрытия к применению.

Таблица 52

Защитное действие покрытий арматуры в пенозолобетоне
объемным весом 900 кг/м³ (испытания на Кураховском
заводе ЖБИ)

Расход составляющих на 1 в. ч. битума			Сцеп- ление в кг/см ²	Состояние арматуры после 5 лет и 4 мес.
бензин	зола-унос	цемент		
1,85	1,87	—	11,5	95% поверхности поражено слоистой ржавчиной
1,62	—	4	17	Признаков коррозии не обнару- жено
1,8	—	6	20,7	То же
Цементно-казеиновая об- мазка с нитритом натрия			—	От 40 до 60% поверхности по- ражено слоистой ржавчиной
Контрольные без покрытия			19,1	98—100% поверхности пораже- но слоистой ржавчиной с глу- бокими язвами

Примечание. В течение первых двух лет образцы хранились при периодическом увлажнении, а затем — на открытом воздухе.

О высоких защитных свойствах цементно-полистирольных покрытий свидетельствуют данные С. А. Бале-
зина, Д. Я. Соловей, Л. В. Бабич и С. Д. Бескова [20].
Они применяли составы из 1,5 в. ч. цемента, 0,2 в. ч.
молотого песка и 1 в. ч. 15%-ного раствора полистирола
в ксилоле (или 20%-ного в скипидаре). О толщине за-
щитных покрытий не упоминается. Покрытия указанных
составов обеспечили полную защиту арматуры в авто-
клавном силикатном бетоне объемным весом около
1900 кг/м³ в течение 60 циклов периодического увлаж-
нения (6 ч.) и сушки при 40—42°C (18 ч.).

Проведенные нами неоднократные испытания це-
ментно-полистирольных покрытий в автоклавном яче-
истом бетоне показывают, что они не всегда удовлетво-
рительно защищают арматуру. В частности, это под-
тверждают данные табл. 51, из которых видно, что це-
ментно-полистирольное покрытие значительно уступает
цементно-битумному и цементно-латексному.

Сравнительное изучение этих покрытий, выполненное
Р. Б. Шапиро при нашем участии, позволяет объяснить
недостаточное защитное действие цементно-полисти-
рольного покрытия. Например, были измерены сопротив-
ление и емкость, характеризующие, как это показал

Н. Д. Томашов с сотрудниками [136], суммарную порис-
тость покрытий и ее изменение. Результаты измерений
свидетельствуют о повышенной и возрастающей со вре-
менем пористости и проницаемости цементно-полисти-
рольного покрытия (рис. 54 и 55).

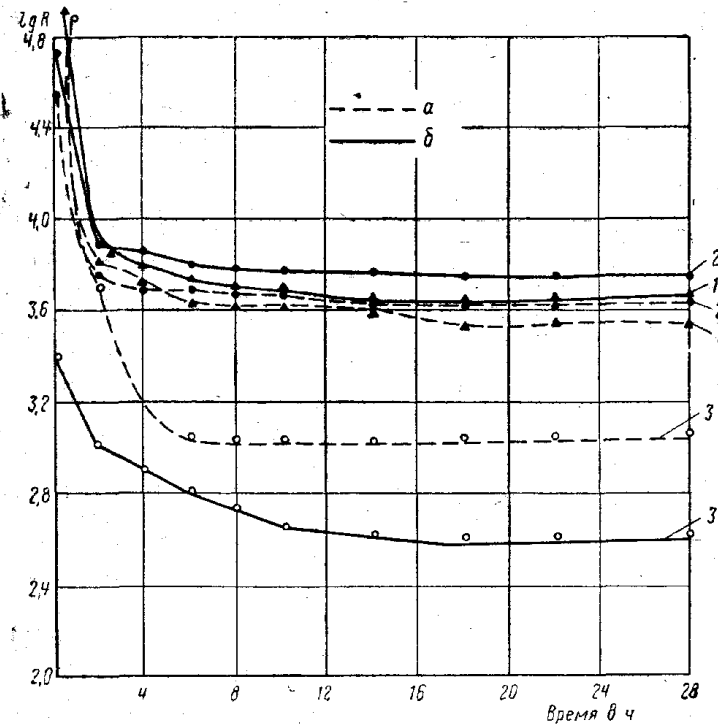


Рис. 54. Омическое сопротивление защитных покрытий

1 — цементно-битумного; 2 — цементно-латексного; 3 — цементно-поли-
стирольного; а — после автоклавной обработки; б — после 3 мес. перио-
дического увлажнения

Измерение стационарных потенциалов стали под за-
щитными покрытиями в процессе испытания периоди-
ческим увлажнением показывает, что под цементно-по-
листирольным покрытием потенциал значительно более
отрицателен, чем под двумя другими. Снятие поляриза-
ционных кривых показало, что цементно-полистирольное
покрытие увеличивает анодную поляризуемость стали в
3 раза, тогда как цементно-латексное — в 8—10 раз, а
цементно-битумное — в 25—30 раз.

**Защитное действие цементно-полистирольных покрытий
Луганского завода ячеистых бетонов**

Вид покрытия	Срок испытания в месяцах	Площадь поражения в %	Глубина коррозии в мм	Состояние поверхности
<i>Испытание периодическим увлажнением</i>				
Контрольные (без покрытия)	1	100	530	Сплошная слоистая ржавчина
	3	100	600	
	6	100	1350	
Цементно-полистирольное (на отходах ударопрочного полистирола)	1	0	320	Отдельные язвы с торца стержней
	3	0	0	
	6	0	420	

Испытание при относительной влажности 80% и температуре 30°C

Контрольные (без покрытия)	3	80	—	Слоистая ржавчина
	6	80	—	
	12	80	162	
Цементно-полистирольное (на отходах ударопрочного полистирола)	3	0	0	Коррозии нет
	6	0	0	
	12	0	0	

витель на битумно-глинистом, горячем сланцебитумно-цементном, эмульсионном битумно-цементном и этиноле-битумно-цементном.

Битумно-глинистое покрытие, предложенное В. Е. Соколовниченко [116], получило распространение благодаря доступности исходных материалов, высокой стабильности и жизнеспособности состава. Битумно-глинистую эмульсию, применяемую для защитного покрытия, готовят разбавлением водой пасты из нефтяного битума (45—50%), суглинков (23—26%) и жирной глины (1—4%). Пасты готовят в механических мешалках перемешиванием кипящего глинистого раствора с нагретой до 160—180°C смесью битумов БН-III и БН-IV.

Правильно приготовленная битумно-глинистая эмульсия практически не расслаивается и может быть использована в течение месяца и более. Однако для получения устойчивых эмульсий требуется навык и тщательный

Таким образом, исследованное нами цементно-полистирольное покрытие не обладает пассивирующим действием, а его изолирующие свойства выражены слабо. Результаты электронномикроскопического и рентгеноструктурного анализов показывают, что автоклавная обработка способствует как разрушению полистирола, так и глубокой гидратации цемента с почти полным связыванием гидрата окиси кальция. Защитные свойства цементно-полистирольного покрытия могут быть повышены путем уменьшения пористости, а также, видимо, введением в его состав ингибиторов.

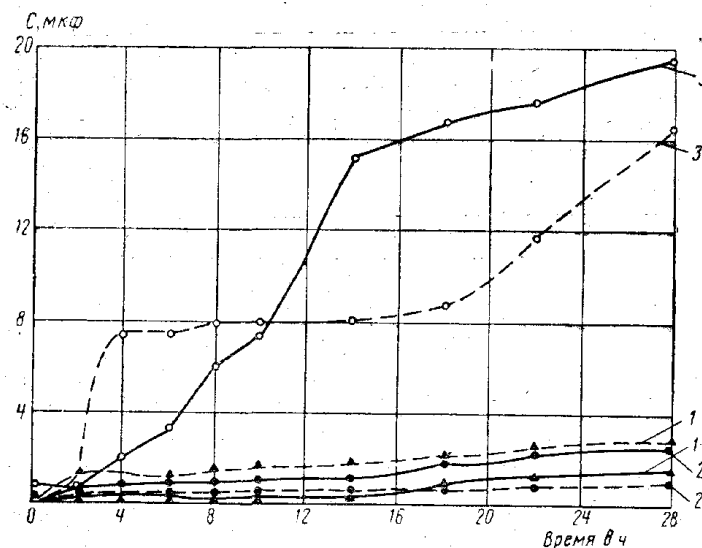


Рис. 55. Емкость защитных покрытий (обозначения те же, что на рис. 54)

Заслуживает внимания опыт применения покрытия такого типа на Луганском заводе ячеистых бетонов, где в качестве связующего были применены кубовые отходы, образующиеся при производстве полистирола, а также отходы производства изделий из ударопрочного полистирола. Как показали результаты выполненных нами ускоренных коррозионных испытаний (табл. 53), эти покрытия показали хорошие защитные свойства.

Из исследованных и применяемых защитных покрытий арматуры в ячеистых бетонах необходимо остано-

контроль температуры и режима смещения. Поэтому на некоторых заводах не могли добиться хорошего качества эмульсий.

Покрyтия из битумно-глинистой эмульсии, как показала неоднократная проверка, обладают слабым защитным действием и могут быть пригодны лишь для временной защиты арматуры от коррозии под действием технологической влаги, когда имеется уверенность, что в течение 1—2 лет эксплуатации влажность конструкций уменьшится и станет ниже критической.

Горячее сланцебитумное покрытие было разработано Н. Л. Дилакторским и Л. В. Ойт [41]. Оно образуется при погружении арматурных каркасов в расплавленный сланцевый битум, смешанный с 2—2,5 в. ч. цемента. Арматурный каркас должен быть выдержан в ванне определенное время, достаточное для его прогрева, иначе слой покрытия получается очень толстым. После остывания и удаления застывших потеков битума каркас можно укладывать в форму. По данным Н. Л. Дилакторского и Л. В. Ойт, покрытие имеет хорошие защитные свойства и не нарушает сцепления арматуры с бетоном. Однако имеются сведения [43], что при эксплуатации плит покрытия из сланцецементного ячеистого бетона с арматурой, защищенной сланцебитумной обмазкой, наблюдаются значительные прогибы и раскрытие трещин вследствие ее ползучести из-за слишком малого количества наполнителя.

Е. Г. Григорьев [39] разработал и применил на Автовском ДСК в Ленинграде покрытие на основе битумной эмульсии и цемента. Битумная эмульсия заводского изготовления содержит битума 40—45%, глины 8—10%, извести 7—10%, воды 45—35%. Автор рекомендует для получения защитного покрытия смесь из 40—50 в. ч. эмульсии, 60—50 в. ч. цемента и 6 в. ч. нитрита натрия. По его данным, при толщине покрытия 0,3—0,4 мм оно не уступает по защитным свойствам цементно-битумному на летучих растворителях, не снижая сцепления арматуры с бетоном. Для замедления схватывания жидкого состава рекомендуется периодически перемешивать состав в ванне и разбавлять его 1 раз в 2 суток порцией свежеприготовленной смеси и водой — каждые 8—10 ч. При этих условиях удается довести жизнеспособность смеси до 5—6 суток.

Этиноле-битумно-цементное покрытие было разработано и проверено на Ангарском заводе ячеистых бето-

нов для защиты арматуры в безавтоклавном газозолобетоне. Защитная смесь состоит из: лака этиноль 5 вес. ч., ксилола 0,7 вес. ч., битума БН-V 1 вес. ч. и цемента 4 вес. ч. Высушенное покрытие отличается большой плотностью и хорошими защитными свойствами, однако для защиты арматуры в бетонах автоклавного твердения непригодно, так как при автоклавной обработке разрушается.

В результате выполненных Р. Б. Шапиро совместно с нами исследований мы пришли к заключению, что недостаточное защитное действие многих применяемых в заводской практике покрытий арматуры (в том числе и получившего значительное распространение глинистобитумного) является следствием не только некачественного нанесения покрытий в заводских условиях, но и чисто эмпирического подбора их составов без учета физико-химических характеристик и влияния на электрохимическое состояние защищаемой поверхности.

Накопленный опыт исследования и применения защитных покрытий для арматуры в ячеистых бетонах позволяет сформулировать основные требования к ним, а также методы оценки и контроля их качества.

Защитные покрытия арматуры должны отличаться: стойкостью в процессе температурно-влажностной обработки изделия, длительностью защитного действия в пористой и влажной среде бетона, значительным сопротивлением сдвигу (малой ползучестью).

Как показали наши исследования, в качестве защитных покрытий для арматуры в легких и ячеистых бетонах могут применяться составы на основе портландцемента с органическим связующим, способные после высыхания образовывать достаточно прочную и плотную пленку, удовлетворяющую вышеперечисленным, а также дополнительным технологическим требованиям, главные из которых:

жизнеспособность, позволяющая достаточно долго (в зависимости от принятой технологии нанесения) использовать приготовленную порцию смеси без снижения свойств получаемого покрытия;

стабильность, т. е. способность смеси сохранять однородность без расслаивания (оседания наполнителя);

способность образовывать достаточно толстую (0,4—0,6 мм), сплошную и однородную пленку на поверхности арматуры за 1—2 приема нанесения.

Кроме того, важно, чтобы не требовалось специаль-

ной подготовки поверхности арматуры и чтобы нанесенная пленка по-возможности быстро высыхала, а материалы для приготовления защитного состава были недефицитны и недороги.

При подборе составов необходимо определять физико-механические свойства высушенных покрытий, которые должны иметь следующие показатели: эластичность (по ОСТ 10086—39, МИ 22) — не выше 20, адгезия (по ТУ МХП 4202, СМН 8) — 0 (полная сохранность пленки), прочность на удар (по ГОСТ 4765—59) — не менее $10 \text{ кг} \cdot \text{см}$.

Решающее значение имеет сцепление защищенной покрытием арматуры с бетоном, которое должно быть не менее нормативного. Величину сцепления рекомендуется проверять по результатам испытания на выдергивание образцов арматуры из бетонных призм размером $10 \times 10 \times 20 \text{ см}$, прошедших соответствующую тепловую обработку. Влияние защитного покрытия на сцепление арматуры с бетоном следует, кроме того, проверять путем испытаний опытной конструкции или ее модели статической нагрузкой.

Согласно результатам наших исследований, для ускоренной лабораторной проверки защитных свойств покрытий можно определять омическое сопротивление и анодную поляризуемость покрытия, нанесенного на стальной стержень, высушенного и погруженного в 3%-ный раствор хлористого натрия. Сопротивление должно быть не ниже $7000 \text{ ом} \cdot \text{см}$, а поляризуемость должна быть не ниже 2. Окончательной следует считать проверку защитных свойств покрытия прямыми коррозионными испытаниями стальных стержней с защитным покрытием в бетонных образцах, подвергающихся периодическому увлажнению в течение 1 и 3 месяцев (240 и 720 циклов) по 3-ч циклу (1 ч увлажнение погружением в пресную воду и 2 ч сушка при 40°C). Могут быть использованы и другие жесткие режимы испытаний для достаточно надежного определения скорости коррозии (весовые потери на единицу поверхности стального образца за единицу времени) контрольных незащищенных стержней в тех же бетонных образцах. Коэффициент защитной способности покрытия (отношение скоростей коррозии незащищенных и защищенных образцов) должен быть не менее 50.

В настоящее время могут быть рекомендованы для

защиты арматуры следующие покрытия на основе цемента:

а) цементно-битумное покрытие толщиной 0,3—0,4 мм, приготавливаемое и наносимое в соответствии с приложением к «Инструкции по технологии изготовления изделий из автоклавного ячеистого бетона» (СН 277—64). Покрытие можно применять для защиты арматуры в легких бетонах на пористых заполнителях, автоклавных силикатных и ячеистых бетонах марки до 75. В бетонах более высоких марок требуется специальная проверка на сцепление арматуры с бетоном;

б) рекомендуемое той же Инструкцией СН 277—64 цементно-полистирольное покрытие толщиной 0,4—0,6 мм целесообразно использовать для защиты арматуры в тех же бетонах, учитывая при этом, что оно обеспечивает более высокое сцепление арматуры с бетоном;

в) цементно-латексное покрытие, по своим защитным свойствам не уступающее цементно-битумному. Оно отличается повышенной эластичностью и поэтому может быть рекомендовано для защиты арматуры как в ячеистых, так и в легких бетонах на пористых заполнителях. Недостатком такого покрытия является ограниченная жизнеспособность защитного состава (1 сутки). С целью улучшения технологичности покрытия необходимо разработать способы замедления схватывания цемента путем введения добавок;

г) этиноле-битумно-цементное покрытие толщиной 0,3—0,4 мм, по своим защитным свойствам равноценное цементно-битумному. Можно применять для ячеистых и легких бетонов, в том числе для бетонов на основе золы-уноса. Покрытие нельзя использовать в бетонах автоклавного твердения.

Условием надежного и длительного защитного действия покрытий является тщательное нанесение, гарантирующее требуемую толщину и сплошность. Приготовление, нанесение и сушка защитных покрытий должны производиться механизированным способом с тщательным соблюдением технологии и пооперационным контролем.

Заслуживает серьезного внимания цинковое покрытие толщиной 30—50 мк, наносимое на арматуру способом горячего или диффузионного цинкования. Оцинкованная арматура в виде стержней, проволоки и сварных сеток применяется в зарубежном, в частности

американском, строительстве [87]. Она хорошо предохранена от коррозии и по сцеплению с бетоном не уступает незащищенной стали. Оцинкованная арматура может применяться в бетоне всех видов, за исключением золобетон. Производство такой арматуры должно быть организовано на предприятиях метизной промышленности.

Таблица 54

Стоимость защитных покрытий для арматурных каркасов

Покрытие	Стоимость 1 т состава с приго- товлением в руб.	Стоимость покрытия 1 т арматурных каркасов	
		в руб.	в %
Цементно-полистирольное на отходах полистирола и каменноугольном сольвенте (Луганское)	126	29,1	223
Цементно-полистирольное на блочном полистироле и каменноугольном сольвенте	152	34,6	205
Цементно-битумное на битуме БН-V и уайт-спирите	50	13,1	100
Этиноле-цементно-битумное (битум БН-V, лак этиноль, ксилол)	123	28,6	218
Битумно-глинистое	95	22,6	172

При выборе защитного покрытия и технологии его нанесения на армокаркасы не последнюю роль играет стоимость. В табл. 54 приведена сравнительная расчетная стоимость основных применяемых и рекомендуемых защитных покрытий. За основу расчета приняты преysкуранные цены на материалы и производственная калькуляция Луганского завода ячеистых бетонов. Согласно последней расход защитного состава на 1 т арматуры составляет 210 кг, а стоимость операций нанесения (окунанием) и сушки этого количества состава — 2 р. 55 к. Стоимость приготовления составов принята по аналогии с затратами на приготовление малярных составов в строительстве (ЕНиР, ст. 8); т. е. 1 р. 42 к. за 100 кг.

Цены основных материалов (в руб. за 1 т):

полистирол блочный	800
полистирол (отходы)	540
портландцемент марки 600	16
сольвент каменноугольный	110

битум марки БН-V	29
уайт-спирит	50
лак этиноль	183
ксилол	110

§ 21. Технология нанесения защитных покрытий на арматурные каркасы

Как показывает опыт, нанесение составов кистями и щетками вручную не гарантирует сплошности, требуемой толщины и однородности покрытий. Большая затрата ручного труда оказывается бесполезной, не обеспечивая качества покрытия.

Наиболее простым и надежным, на первый взгляд, способом нанесения покрытия является погружение каркаса в ванну с жидким составом. Однако для покрытия таким способом крупногабаритных каркасов требуются ванны, вмещающие до 6—7 м³ защитного состава. При сравнительно малом расходе состава на получение покрытия толщиной порядка 0,5 мм возникает необходимость замедлить схватывание составов на основе воды и цемента (цементно-казеиновый, цементно-латексный). Общей задачей при применении всех составов, включая составы на органических растворителях, в которых цемент не схватывается, является борьба с их расслоением — осаждением на дно ванны частиц тяжелого наполнителя. Кроме того, известные трудности возникают в связи с улетучиванием растворителей, поскольку при этом происходит загустевание составов и затрудняется их качественное нанесение.

Нами были изучены разные способы замедления схватывания цементно-водных составов [14]. Наиболее эффективным оказалось охлаждение до температуры, близкой к нулю. Результаты испытания добавок — замедлителей схватывания приводились выше. Несмотря на известный эффект этих способов замедления схватывания, жизнеспособность цементно-водных композиций остается ограниченной.

Учитывая также другие существенные недостатки цементно-казеиновой обмазки (нестабильность состава, хрупкость покрытия), в настоящее время ее нельзя рекомендовать к применению. Однако даже цементно-латексная, отличающаяся стабильностью смеси и эластичностью покрытия, имеет ограниченную жизнеспособ-

ность, что необходимо учитывать, разрабатывая технологию нанесения.

Основным требованием к технологии нанесения покрытий из маложизнеспособных смесей является существенное сокращение объема находящегося в работе жидкого состава с целью уменьшения потерь ценных материалов. В нашей работе [14] описаны устройства, с помощью которых пытались решить задачу механизированного нанесения таких составов с использованием малого объема смеси. Однако все они имели те или иные недостатки и не нашли пока практического применения.

При использовании принципа многократной оборачиваемости защитной смеси в процессе нанесения ее на арматурные каркасы (например, набрызгом) необходимо иметь в виду возможность изменения состава за счет расслоения (выпадения тяжелых частиц наполнителя на горизонтальных или слабонаклонных плоскостях). Опыт Харьковского завода № 3 по нанесению цементно-казеинового покрытия на каркасы и сетки путем полива их смесью из шланга показал, что в результате выпадения цемента в слабонаклонном сборном лотке смесь, поступающая в насос, постепенно отощается и образует тонкое и с пониженной защитной способностью покрытие даже при двукратном нанесении с промежуточной сушкой.

Наиболее заманчива перспектива использования для нанесения покрытий из нестабильных и маложизнеспособных смесей способа окраски в электрическом поле [10, 12, 67]. Этот способ получил широкое распространение в разных отраслях промышленности для окраски массовых изделий. В частности, в строительной промышленности он применяется для окраски столярных изделий.

Сущность способа заключается в том, что лакокрасочный материал подается на вращающийся распылитель (чашу) и за счет совместного действия центробежной силы и сил электрического поля распыляется. Соприкасаясь с чашей, на которую подано высокое напряжение, и проходя через зону коронного разряда, частицы материала приобретают отрицательный заряд, дополнительно диспергируются и силами поля переносятся на заземленное изделие. Одинаково заряженные частицы, отталкиваясь друг от друга, стремятся равномерно расположиться в пространстве, что обеспечивает

однородность осажденного слоя и монолитность образующейся пленки. При этом частицы краски равномерно осаждаются на поверхность каркаса, несмотря на то что распыление ее производится с одной стороны (рис. 56). Второй важной особенностью является прак-

тически полное осаждение материала на изделии, каким бы ажурным оно ни было. Покрытия, получаемые таким способом, отличаются высокой плотностью и однородностью. При этом сводятся к минимуму потери материала и полностью исключаются ручные процессы.

Проведенные нами совместно с Н. К. Розенталем экспериментальные исследования, к сожалению, не позволили получить защитные покрытия в электрическом поле из составов типа цементно-казеинового. Это объясняется отрицательным влиянием воды, которая плохо заряжается и поэтому мешает электродиспергированию частиц смеси. В результате крупные частицы не поддаются действию сил электрического поля, а разлетаются в основном под действием центробежной силы, в нежелательных направлениях. Ведущая разработка способов распыления в электрическом поле вододисперсионных красок позволяет надеяться, что со временем возможно будет вернуться к этому эффективному способу нанесения на арматурные каркасы нестабильных и маложизнеспособных защитных покрытий.

Дальнейшие наши исследования [10] подтвердили возможность и целесообразность нанесения на арматурные каркасы в электрическом поле покрытий из составов, не содержащих воды. Совместно с сотрудниками лаборатории электроокраски НИИ технологии лакокрасочных покрытий нами была отработана техно-

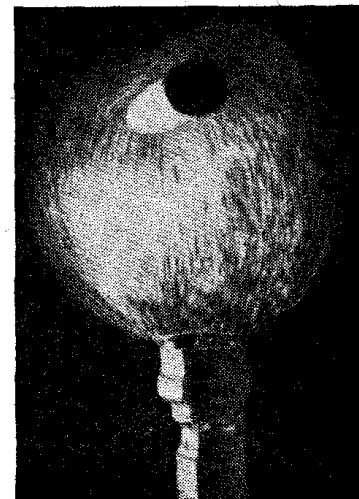


Рис. 56. Обтекающие траектории распыленных частиц краски в электрическом поле

логия нанесения цементно-битумного и аналогичных составов на летучих растворителях.

Учитывая узкую рабочую зону факела распыла указанных составов и необходимость покрывать крупнобаритные арматурные сетки и каркасы, пришлось использовать «роботы», обеспечивающие возвратно-поступательное движение распылителей по вертикали. Арматурные каркасы или пакеты из 5—10 шт. плоских сеток подвешивали на горизонтально перемещающийся конвейер, проходящий через окрасочную и сушильную камеры (рис. 57). Защитный состав распыляли с двух

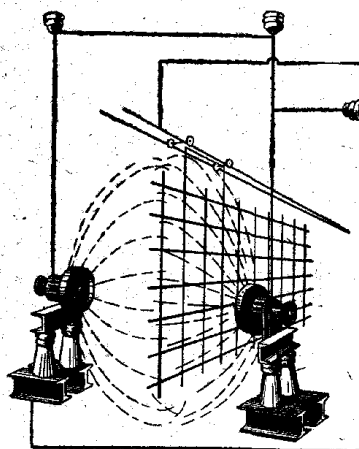


Рис. 57. Схема электроокраски арматурного каркаса

сторон чашечными распылителями диаметром 100 мм с боковой подачей состава. Скорость вращения чаши составляла 1200 об/мин, напряжение равно 100 кВ, расстояние от распылителя до арматурного каркаса — 250 мм. При вязкости цементно-битумного состава 40 см (по ВЗ-4) и расходе 30—60 мл/мин толщина однослойного покрытия составляла в среднем 150 мк. Первый слой подсушивали в течение 5 мин при 60°C, затем наносили второй слой и сушили окончательно при 100°C в течение

15 мин. Толщина двухслойного покрытия после сушки составляла 250—300 мк. Результаты испытания защитных свойств покрытий, полученных электроокраской, показывают, что по качеству они не уступают покрытиям, нанесенным обычным окунанием.

Призмы из автоклавного газобетона объемным весом 800 кг/м³ с заложенными в них арматурными стержнями периодически увлажняли пресной водой. Цикл состоял из 1 ч увлажнения и 2 ч сушки при 40°C. После 720 циклов стержни под цементно-битумным покрытием независимо от способа его нанесения практически не корродировали, тогда как половина поверхности конт-

рольных стержней без покрытия была поражена язвенной коррозией.

Способ нанесения не оказал влияния и на сопротивление сдвигу, которое у защищенной арматуры было несколько выше, чем у незащищенной.

Были исследованы режимы нанесения в электрическом поле и свойства защитных покрытий из термопластических порошков: поливинилбутирала, полиэтилена, полипропилена. Необходимая толщина покрытия, обеспечивающая сплошность пленки, составляет 200—300 мк. Однако при тепловлажностной обработке в щелочной среде бетона покрытия повреждаются и их защитные свойства оказываются хуже, чем у цементно-битумных. Сравнительно неплохие защитные свойства при отличном сцеплении арматуры с бетоном показало покрытие из поливинилбутирала (табл. 55), как в автоклавном газозобетоне, так и в автоклавном газобетоне. Покрытие из полиэтилена низкого давления оказалось хуже, особенно в газозобетоне. Полипропиленовое покрытие частично или полностью разрушилось и практически не замедлило коррозии арматуры.

Исследование показало, что покрытия из термопластических материалов могут быть получены нанесением в электрическом поле, однако для удовлетворительного качества их требуется повышение стойкости пластмасс к тепловлажностной обработке в среде бетона. Кроме того, должна быть разработана конструкция камеры для оплавления покрытий, в которой разность температур в различных зонах не превышала бы нескольких градусов.

В настоящее время имеются два проекта механизированных технологических линий по нанесению на арматурные каркасы защитных покрытий в электрическом поле. Один из них разработан Ленинградским отделением ВПК Лакокраспокрытие, другой — Харьковским. В Харькове на комбинате ЖБИ № 3 работает полумеханизированная установка по нанесению цементно-битумного покрытия на арматурные каркасы и сетки в электрическом поле.

В процессе разработки технологии нанесения цементно-битумного покрытия в электрическом поле удалось найти пути стабилизации смесей. Способ, предложенный И. А. Ляховичем и З. В. Серковой [67] в Харьковском Промстройинипроекте, заключается во введении в смесь

Таблица 55

Результаты испытаний защитных покрытий в ячеистых бетонах при переменном увлажнении (8 раз в сутки) и высушивании при температуре 40°C

Покрытие	Срок испытания в месяцах	Площадь коррозии в %	Наибольшая глубина коррозии в мм	Сопротивление сдвигу в кг/см ²	Примечание
Автоклавный газобетон					
Поливинилбутираль	1	0	0	47,7	Пленка деформировалась (оплавилась). Поверхность стержня темная
	2	0	0		
	3	17,5	144		
Полиэтилен	1	3	0	27,4	Покрытие оплавилось. Пленка черного цвета. Местная коррозия
	2	6	70		
	3	7	222		
Цементно-битумное	1	0	0	21,6	Покрытие остается на бетоне. Стержни чистые
	2	0	0		
	3	0	0		
Незащищенная арматура	1	75	70	28,2	Сплошная равномерная коррозия
	2	96	222		
	3	93	140		

Ангарский газозолобетон

Поливинилбутираль	1	0	0	36,7	Покрытие частично деформировалось (оплавилось). Поверхность стержня темная
	2	0,5	0		
	3	3,5	72,4		
Полиэтилен	1	43	140	13	Пленка сохранилась. Под пленкой пятна коррозии
	2	50,3	11,1		
	3	75	100		
Цементно-битумное	1	0	0	11,1	Покрытие частично остается на бетоне, стержни чистые
	2	0	0		
	3	0	0		
Незащищенная арматура	1	65	450	35,2	Равномерная коррозия
	2	99	300		
	3	100	470		

поверхностно-активной добавки 1% мылонафта и 0,5% едкого натра (от веса цемента).

В проведенных Н. К. Розенталем совместно с нами и Н. Г. Катаевым исследованиях удалось добиться относительной стабильности смесей путем приготовления их в шаровой мельнице. При этом в барабан мельницы загружают расчетное количество цемента и растворитель (в количестве 90% расчетного) и перемешивают в течение 1 ч. Затем добавляют расчетное количество битума, разбитого на куски размером не более 10 мм, и дополнительно перемешивают в шаровой мельнице в течение 2 ч, после чего, добавляя необходимое количество растворителя, устанавливают требуемую вязкость смеси.

Благодаря тому, что первоначально цемент перемешивается с чистым растворителем малой вязкости, достигается наиболее полное диспергирование частиц цемента в постепенно образующемся битумном лаке. Кроме того, происходит некоторое дополнительное домалывание цемента. В результате резко замедляется расслоение цементно-битумной смеси, что облегчает ее нанесение в электрическом поле.

Предложенные способы стабилизации цементно-битумного и аналогичных защитных составов позволяют наносить покрытия окунанием. Институтом Гипростроммеханизация совместно с бюро внедрения НИИЖБа разработан проект технологической линии для механизированного нанесения защитных покрытий на арматурные каркасы способом окунания. По этому проекту

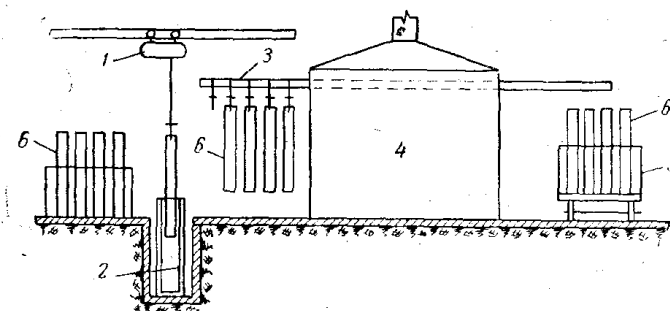


Рис. 58. Схема поточной линии для нанесения защитных покрытий на арматурные каркасы

1 — тельфер на монорейсе; 2 — ванна; 3 — цепные направляющие; 4 — сушильная камера; 5 — передаточная тележка; 6 — арматурные каркасы

строится технологическая линия. Схематически поточная линия изображена на рис. 58.

Подготовленные армокаркасы при помощи тельфера с траверсой погружаются в ванну с защитным составом и затем передаются на цепные направляющие проходной сушильной камеры. По выходе из сушильной камеры армокаркасы поступают на передаточную тележку и далее в формы. Линия предназначена для завода производительностью 35 тыс. м³ ячеистого бетона в год.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аваков А. И., Бердичевский Г. И., Михайлов К. В. «Строительство» № 4, 1951.
2. Александров И. А. Труды конференции по коррозии бетона. Изд. АН СССР, 1937.
3. Александров П. Е. и Кунцевич О. В. Сб. трудов ЛИИЖТ, вып. 174(8), Л., 1960.
4. Алексеев С. Н. Сб. «Коррозия железобетона и методы защиты». Госстройиздат, 1959.
5. Алексеев С. Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне. Госстройиздат, 1962.
6. Алексеев С. Н. Сб. «Армоцемент и армоцементные конструкции». Госстройиздат, 1962.
7. Алексеев С. Н. и Гуревич Э. А. Сб. «Защита строительных конструкций от коррозии». Стройиздат, 1966.
8. Алексеев С. Н. и Гуревич Э. А. «Бетон и железобетон» № 6, 1967.
9. Алексеев С. Н., Илларионова Л. Ф. и Шашкина Н. А. Сб. «Армоцементные конструкции в жилищном, промышленном и сельскохозяйственном строительстве». Госстройиздат, 1963.
10. Алексеев С. Н. и Розенталь Н. К. Сб. «Коррозия, методы защиты и повышения долговечности бетона и железобетона». Стройиздат, 1965.
11. Алексеев С. Н. и Розенталь Н. К. Сб. «Защита строительных конструкций от коррозии». Стройиздат, 1966.
12. Алексеев С. Н. и Розенталь Н. К. Сб. «Окраска изделий в электрическом поле». «Химия», 1966.
13. Алексеев С. Н., Степанова Р. Б. Сб. «Защита строительных конструкций от коррозии». Стройиздат, 1966.
14. Алексеев С. Н. и Шашкина Н. А. Сб. «Коррозия железобетона и методы защиты». Госстройиздат, 1962.
15. Алексеев С. Н., Шашкина Н. А., Пучнина Е. А. Сб. «Коррозия, методы защиты и повышения долговечности бетона и железобетона». Стройиздат, 1965.
16. Артамонов В. С. Журнал прикладной химии, т. XXXIII, 1960.
17. Артамонов В. С. Защита от коррозии транспортных железобетонных конструкций. Трансжелдориздат, 1961.
18. Артамонов В. С. «Транспортное строительство» № 9, 1962.
19. Бабушкин В. И., Матвеев Г. М., Мчедлов-Петросян О. П. Термодинамика силикатов. Стройиздат, 1965.
20. Балекин С. А. и др. Ингибиторы коррозии металлов, вып. 2. Ученые записки МГПИ им. Ленина, М., 1962.
21. Баранов А. Т., Бужевич Г. А. Золобетон. Госстройиздат, 1960.
22. Борок М. М. Сцепление арматуры с бетоном на шлакопортландцементе, Киев, 1947.
23. Брауде З. И. Материалы по стальным конструкциям, вып. 3. Изд. Проектстальконструкция, 1958.

24. Бутт Ю. М. и др. «Строительные материалы» № 9, 1965.
25. Веденкин С. Г., Гладыревская С. А. Сб. «Борьба с коррозией металла на железнодорожном транспорте». Трансжелдориздат, 1951.
26. Вербецкий Г. П. Известия ТНИСГЭИ, т. 14, Энергоиздат, 1962.
27. Вербецкий Г. П. «Бетон и железобетон» № 11, 1964.
28. Вербецкий Г. П. Известия ТНИСГЭИ, т. 16, «Энергия», 1965.
29. Вейц Р. И. «Строительная промышленность» № 9, 1954.
30. Волженский А. В. и Силаенков Е. С. «Строительные материалы» № 10, 1958.
31. Гвоздев А. А. «Бетон и железобетон» № 1, 1956.
32. Гершберг О. А. Технология бетонных и железобетонных изделий. Стройиздат, 1965.
33. Гинзбург Ц. Г., Кунцевич О. В. Известия ВНИИГ им. Введенева, № 51, 1954.
34. ГОСТ 5272—50. Коррозия металлов. Терминология.
35. ГОСТ 4797—64. Бетон гидротехнический.
36. ГОСТ 8424—63. Бетон дорожный.
37. ГОСТ 11024—64. Панели керамзитобетонные для наружных стен жилых и общественных зданий.
38. ГОСТ 11051—64. Бетон легких на пористых заполнителях. Методы испытаний бетонной смеси.
39. Григорьев Е. Г. и Кривицкая И. Г. «Строительство и архитектура Ленинграда» № 9, 1964.
40. Гюнтер Ф. РИЛЕМ. Доклады Междунар. конф. по ускорению твердения бетона, М., июль 1964.
41. Дилакторский Н. Л., Ойт Л. В., Бельченко А. М. Сланцебитумное покрытие для защиты арматуры от коррозии в ячеистых бетонах. Стройиздат, 1965.
42. Дмитриев С. А. Исследование обычных и предварительного напряженных железобетонных конструкций. Стройиздат, 1949.
43. Добрынин Е. «Сельское строительство» № 1, 1966.
44. Довжик В. Г. и Кайсер Л. А. Конструктивно-теплоизоляционный керамзитобетон в крупнопанельном домостроении. Стройиздат, 1964.
45. Довжик О. И., Енишерлова С. Г., Ратинов В. Б. Сб. «Ингибиторы коррозии металлов». «Судостроение», 1965.
46. Залигер Р. Железобетон. ОНТИ, М., 1929.
47. Иванов Ф. М. «Строительная промышленность» № 9, 1954.
48. Иванов Ф. М., Овчаров В. И. Дорожный бетон с добавками хлористых солей. Автоиздат, 1956.
49. Иванов Ф. М., Солнцева В. Л. «Бетон и железобетон» № 5, 1962.
50. Иванов Ф. М., Черномордик Е. И. Сб. научных трудов ВНИИ транспортного строительства, № 13, М., 1965.
51. Инструктивные указания по проектированию армоцементных конструкций. Госстройиздат, М., 1961.
52. Инструкция по защите от коррозии стальных и железобетонных строительных конструкций лакокрасочными покрытиями. Стройиздат, 1964.
53. Инструкция по изготовлению изделий из новых видов легких бетонов. Стройиздат, 1966.

54. Инструкция по применению воздухововлекающих и пенообразующих добавок при производстве керамзитобетонных изделий. Стройиздат, 1965.

55. Инструкция по приготовлению бетона с применением пластифицированного цемента или обычного цемента с добавкой на месте работ сульфитно-спиртовой барды (ИМ 202—51).

56. Инструкция по проектированию и возведению конструкций и сооружений из легкого железобетона. Издание Тбилисского НИИ сооружений, 1937.

57. Казаровицкая Б. А. «Бетон и железобетон» № 10, 1959.

58. Караев З. Ш. Сб. «Коррозия металлоконструкций в море», Баку, 1954.

59. Консервация деталей летучими ингибиторами. СНХ Челябинского экономического района, 1959.

60. Корнфельд И. А., Притула В. А. Защита железобетонных конструкций от коррозии, вызываемой блуждающими токами. Стройиздат, 1964.

61. Корровиц Х. Х. Сб. «Сланцезольные материалы в строительстве», Таллин, 1955.

62. Коррозийное растрескивание и хрупкость. Сб. статей, пер. с англ., Машгиз, 1961.

63. Кудряшов И. Т. Автоклавные ячеистые бетоны и их применение в строительстве. Госстройиздат, 1949.

64. Кудряшов И. Т. и Куприянов В. П. Ячеистые бетоны. Госстройиздат, 1959.

65. Лавринович Е. В. Сб. «Вопросы динамики формирования железобетонных изделий». ЦБТИ МС РСФСР, М., 1961.

66. Лобанов И. А. и Собакина С. А. Сб. «Защита строительных конструкций от коррозии». Стройиздат, 1966.

67. Ляхович И. А. и Серкова З. В. Сб. «Строительные материалы, детали и изделия». Изд. «Будівельник», Киев, 1965.

68. Маддисон О. А. Сб. «Сланцезольные материалы в строительстве», Таллин, 1955.

69. Малик Д. М. «Строительная промышленность» № 11, 1938.

70. Миронов С. А. Автоклавная обработка бетонов. Госстройиздат, 1939.

71. Миронов С. и Лагойда А. Строительная газета № 14 (4879) от 1 февраля 1967 г.

72. Михайлов К. В. Проволочная арматура для предварительно напряженного железобетона. Стройиздат, 1964.

73. Михайлов М. М., Герасимов Н. А. Труды Ленинградского политехнического института, № 184—Электротехника, 1956.

74. Москвин В. М. Пемзобетон в железобетоне. «Строитель» № 4—5, 1933.

75. Москвин В. М. Сб. «Технология бетона». Стройиздат, 1934.

76. Москвин В. М. «Строительная промышленность» № 12, 1951.

77. Москвин В. М. и Алексеев С. Н. «Бетон и железобетон» № 1, 1957.

78. Москвин В. М., Алексеев С. Н. Сб. «Исследования в области защиты бетона и других строительных материалов от коррозии». Госстройиздат, 1950.

79. Москвин В. М., Алексеев С. Н., Батраков В. Г.

- Сб. «Коррозия железобетона и методы защиты». Госстройиздат, 1959.
80. Москвин В. М., Алексеев С. Н., Новгородский В. И. «Защита металлов», № 5, 1965.
81. Москвин В. М., Алексеев С. Н. и Новгородский В. И. Сб. «Коррозия, методы защиты и повышения долговечности бетона и железобетона». Стройиздат, 1965.
82. Москвин В. М., Алексеев С. Н. и Новгородский В. И. Труды VI конференции по бетону и железобетону в Риге. Стройиздат, 1966.
83. Мощанский Н. А. Плотность и стойкость бетонов. Госстройиздат, 1951.
84. Мощанский Н. А. «Промышленное строительство» № 2, 1960.
85. Мощанский Н. А. Повышение стойкости строительных материалов и конструкций, работающих в условиях агрессивных сред. Госстройиздат, 1962.
86. Новые шлаковые цементы. Сб. статей НИИ бетонов, Л., 1931.
87. Опыт строительства за рубежом. Предварительно напряженный железобетон в США. Госстройиздат, 1959.
88. Панфилова Л. И. и Козлова Г. А. «Бетон и железобетон» № 1, 1955.
89. Патент № 35332 от 26/V 1955 г. Польша.
90. Патент № 75768 от 23/II 1956 г. Дания.
91. Патент № 445404 от 16/VI 1953 г. Канада.
92. Патент № 427135 от 28/IV 1955 г. ФРГ.
93. Патент № 110451 от 29/IX 1962 г. Чехословакия.
94. Пурин Б. А. и Лепинь Л. К. Известия АН Латв. ССР, 1958, № 6 (131).
95. Путилова И. Н., Балезин С. А. и Баранник В. П. Ингибиторы коррозии металлов. Госхимиздат, 1958.
96. Пухальский Г. В. «Строительная промышленность» № 15, 1937.
97. Пухальский Г. В. «Строительная промышленность» № 2, 1940.
98. Пухальский Г. В. Сб. «Доменные шлаки в строительстве». Стройиздат, УССР, 1956.
99. Райдн В. К. Сб. «Передовой опыт строительства Эстонской ССР», Таллин, 1957.
100. Ратинов В. Б. и Довжик О. И. «Бетон и железобетон» № 2, 1959.
101. Ратинов В. Б., Розенберг Т. И., Смирнова И. Н. РИЛЕМ. Конференция по проблемам ускорения твердения бетона при изготовлении сборных железобетонных конструкций. Стройиздат, 1964.
102. Ребиндер П. А. Всесоюзное научно-техническое совещание по сушке 11—15 декабря 1956. Пленарные заседания. Профиздат, 1958.
103. Резник В. А. «Строительная промышленность» № 8, 1940.
104. Рекомендации по электрозащите арматуры железобетонных конструкций от коррозии. Газпром СССР, 1965.
105. Ривлин И. Я. Коррозия железа, армированного в силикатите, Таллин, 1955.
106. Розенфельд И. Л. Замедлители коррозии в нейтральных средах. Изд. АН СССР, 1953.

107. Розенфельд И. Л. Атмосферная коррозия металлов. Изд. АН СССР, 1960.
108. Романов В. В. Коррозионное растрескивание металлов. Машгиз, 1960.
109. Романов В. В. Методы исследования коррозии металлов. Изд. «Металлургия», 1965.
110. Саакян В. О. Сб. «Гидротехнический бетон на литонидной немзе». Изд. АН Арм. ССР, Ереван, 1958.
111. Саввина Ю. А. Сб. «Защита строительных конструкций от коррозии». Стройиздат, 1966.
112. Сиверцев Г. Н., Никитина Л. В., Ефимова И. В. Сб. «Химические процессы твердения бетонов». Госстройиздат, 1961.
113. Силаенков Е. С. Долговечность крупноразмерных изделий из автоклавных ячеистых бетонов. Стройиздат, 1964.
114. Скорчеллетти В. В. Теоретическая электрохимия. Госхимиздат, 1959.
115. Скрамтаев Б. Г. и Чернявский И. Д. О применении шлакопортландцемента и шлака в железобетоне. «Цемент» № 5, 1936.
116. Соколович В. Е. Временная инструкция на приготовление антикоррозионных битумно-глинистых паст и способ их нанесения на арматурные каркасы. Оргэнергострой, 1960.
117. Ступаченко П. П. Труды Дальневосточного политехнического института, т. 63, вып. 1, 1964.
118. Ступаченко П. П. Сб. «Защита строительных конструкций от коррозии». Стройиздат, 1966.
119. СН 277—64. Инструкция по технологии изготовления изделий из автоклавного ячеистого бетона. Стройиздат, 1964.
120. СН 245—63. Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий. Стройиздат, 1963.
121. СН 1—61. Технические условия на изготовление и приемку сборных железобетонных и бетонных изделий. Госстройиздат, 1961.
122. СН 65—59. Указания по защите железобетонных конструкций электролизных цехов от коррозии, вызываемой блуждающими токами. Госстройиздат, 1959.
123. СН 262—67. Указания по проектированию антикоррозионной защиты строительных конструкций. Стройиздат, 1968.
124. СН 366—67. Указания по проектированию армоцементных конструкций. Стройиздат, 1967.
125. СН 250—65. Указания по применению в железобетонных конструкциях стержневой термически упрочненной арматуры. Стройиздат, 1966.
126. СНиП I-B.3-62. Бетон на неорганических вяжущих и заполнителях.
127. СНиП I-B.4-62. Арматура для железобетонных конструкций.
128. СНиП I-B.1-62. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования.
129. СНиП I-B.2-62. Вяжущие материалы неорганические и добавки для бетонов и растворов.
130. СНиП III-B.1-62. Бетонные и железобетонные конструкции монолитные. Общие правила производства и приемки работ.
131. СНиП III-B.6-62. Защита строительных конструкций от коррозии. Правила производства и приемки работ.
132. Технические условия и инструкция по технологии производства бетонных работ в промышленном и гражданском строительстве. Госстройиздат, 1959.

133. Технические указания по технологии изготовления и защите бетонных и железобетонных конструкций морских гидротехнических сооружений в суровых климатических условиях (ВСН 118—65). Оргтрансстрой, М., 1965.

134. Томашов Н. Д. Теория коррозии и защиты металлов. Металлургиздат, 1962.

135. Томашов Н. Д. и Титов В. А. «Заводская лаборатория» № 1, 48 (1949); № 7, 802 (1951).

136. Томашов Н. Д., Михайловский Ю. Н. Проблемы коррозии металлов. Труды института физической химии, вып. 8, № 6, 1960.

137. Томашов Н. Д., и Чернова Г. И. Пассивность и защита металлов от коррозии. «Наука», 1965.

138. Тринкер Б. Д. «Промышленное строительство» № 8, 1963.

139. Федин А. А., Чернышов Е. М. Сб. «Исследования по цементным и силикатным бетонам». Изд. Воронежского университета, Воронеж, 1964.

140. Холопова Л. И. Коррозия арматуры в автоклавных ячеистых бетонах и способы ее предупреждения. Стройиздат, 1965.

141. Цискрели Г. Д. и Вербедский Г. П. «Гидротехническое строительство» № 6, 1966.

142. Чернышов Ю. П., Дикунов Е. Н. Известия высших учебных заведений МВО СССР. «Строительство и архитектура» № 10, 1963.

143. Чехов А. П. «Бетон и железобетон» № 10, 1960.

144. Шнейдерова В. В. «Бетон и железобетон» № 1 и 9, 1965.

145. Эванс Ю. Р. Коррозия и окисление металлов. Машгиз, 1962.

146. Электротехнические бетоны. Труды Сибирского НИИ энергетики АН СССР, вып. 2(21), Новосибирск, 1964.

147. Abeles P. V. Concr. and Constr. Eng., 1963, v. 58, № 11.

148. Anweisung für Mörtel und Beton, die Bundesbahn, München, 1947.

149. Arber M. G., Vivian H. E. Austr. J. applied Science, v. 12, № 3, Sept. 1961; № 4, del. 1961.

150. Baumel A., Engel H. J. Arch. Eisenhüttenwesen, № 7, 1959.

151. Betonstein Zeitung, № 9, 1963.

152. Brocard J. RILEM. Symposium, Stockholm, 1957, v. 1, p. 49.

153. Burchartz H., Bauer O. Stahl und Eisen, 1917, № 27—32.

154. Cahill T. The Wire Industry, February and March, 1965.

155. Campus F. AJM Bull. Scient., № 7—9, 1950.

156. Campus F. Batir, № 59, Juin 1956.

157. Chambaud R. Ann. de l'Inst. techn., 2 (1949), № 101.

158. Colloquium RILEM. CRC, 6—9 September 1965, Wexham Springs, England.

159. Comité Européen du Béton, Bull. d'Inform., № 13, 1959.

160. Czernin W., Zementchemie für Bauingenieure, Wiesbaden—Berlin, 1960.

161. Dehler E. Baustoffindustrie, № 9, 1965.

162. Delarue J., Espresati A., Sibony A. Bull. RILEM, 1964, New Series, № 24, Sept.

163. De Stryker R. Draht, v. 12, p. 143, 1961.

164. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 170, Berlin, 1965.

165. DJN 1045, Best. für Ausf. von Bauwerken aus Stahlbeton, 1952.

166. Dumas F. Travaux, Sept., 1965.

167. Evans R. H. Proc. of the Inst. of Civil Eng., p. III, v. 4, 1955, № 3.

168. Everling W. O. Yearb. Amer. Iron Steel Inst., 1954, p. 185.

169. Verfügungen und Mitteilungen des Ministeriums für Bauwesen, Berlin, den 20 Januar, 1965, № 1.

170. Finley H. F. Corrosion, March 1961, v. 17, № 3.

171. Friedland R. J. Amer. Concr. Inst., v. 22, № 2, 1950. (Proc. v. 42).

172. Gary D. A. für Eisenbeton, Heft 47, Berlin, 1920.

173. Godfrey H. J. J. of the Prestressed Concr. Inst., 5, 1960, March.

174. Goodfrei H. J. Corrosion, v. 17, p. 241, 1961.

175. Gräff O. Beton und Eisen 34 (1935), № 9, p. 146—150.

176. Henkel F. Zement-Kalk-Gips, 8 (1955).

177. Hill P. W. Rev. Mat. Constr., № 528, p. 91, 1964.

178. Honigman E. J. M. Beton und Eisen 34 (1935), № 19, p. 301—306.

179. J. Amer. Concr. Inst., v. 38, № 4, Febr. 1942.

180. J. Amer. Concr. Inst., v. 27, № 9, Mag. 1956 (Proc. v. 52) pp. 913—987.

181. Jüniche W. Zum Weiterentwicklung von vergüteten Spannstählen, Rheinhausen Vortrag auf dem Betontag 1965 vom 31 März bis 2 April in Berlin.

182. Korrosionsschutz bei Spannbeton und Stahlbetonbauteilen. Betonstein Zeitung, № 9, 1963.

183. Kosaka K., RILEM-Symposium on Durability of Concrete, Proc., 1961.

184. Kroone B., Blakey F. A. J. Amer. Concr. Inst., Dec. 1959, № 6, v. 31, p. 497—510.

185. Krüger L. D. A. für Eisenbeton, Heft 71, Berlin, 1933.

186. Lewis F. J. Civ. Eng. and Public Works Rev., v. 51, № 602, August, 1957.

187. Lewis D., Copenhagen W. The South African Ind. Chemist, October, 1957.

188. Lewis D., Copenhagen W. Corrosion, v. 15, July 1959, p. 382—388.

189. Leonhardt, Spannbeton für die Praxis. Berlin, 1962.

190. Lobry de Bruyn C. A. Colloquium RILEM CRC, 6—9 Sept., 1965.

191. Lobry de Bruyn C. A. Theissing E. M., Zement-Kalk-Gips, № 15, 1962.

192. Lobry de Bruyn C. A. Zement-Kalk-Gips, № 51, 1962.

193. Maraghini M. La Ricerca Scientifica 26 (1956), S. 2761.

194. McHasson R. L., Greatbans W. D., Corrosion, v. 16, p. 557, 1960.

195. Meng W. V. Zement-Kalk-Gips, v. 12, p. 529, 1959.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	Стр. 5
Глава 1. Сущность процесса коррозии стали в бетоне и его защитное действие	8
§ 1. Основные сведения из теории коррозии металлов	8
§ 2. Условия пассивности стали в нейтральных и щелочных средах	15
§ 3. Механизм защитного действия бетона	19
Глава 2. Основные факторы, влияющие на состояние стальной арматуры в бетоне	27
§ 4. Влияние среды на защитные свойства бетона	27
§ 5. Влияние окружающей среды на процесс коррозии стали в бетоне	52
§ 6. Плотность бетона и толщина защитного слоя	60
§ 7. Вид вяжущего и режим твердения бетона	70
§ 8. Добавки, вводимые в бетонную смесь	81
§ 9. Трещины в бетоне	104
Глава 3. Виды разрушения арматуры в бетоне вследствие коррозии	116
§ 10. Уменьшение сечения элементов вследствие коррозионных потерь	116
§ 11. Хрупкое растрескивание под напряжением	118
§ 12. Водородное охрупчивание	128
§ 13. Меры предупреждения хрупкого коррозионного разрушения	132
Глава 4. Защита арматуры обычных и предварительно напряженных железобетонных конструкций	136
§ 14. Выбор видов конструкций и армирования, назначение толщины защитного слоя и плотности бетона	136
§ 15. Особенности технологии изготовления железобетонных конструкций, обеспечивающие сохранность арматуры	146
§ 16. Меры защиты армирующих сеток в армоцементных конструкциях	155

§ 17. Защита поверхности железобетонных конструкций	Стр. 157
Глава 5. Защита арматуры в конструкциях из легких, ячеистых и автоклавных силикатных бетонов	161
§ 18. Особенности коррозии арматуры и ее защита в легких бетонах	161
§ 19. Особенности коррозии арматуры в ячеистых бетонах	174
§ 20. Защитные покрытия для арматуры в ячеистых бетонах	190
§ 21. Технология нанесения защитных покрытий на арматурные каркасы	213
Литература	221

Алексеев Сергей Николаевич
КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА АРМАТУРЫ В БЕТОНЕ

Стройиздат
Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 9

Редактор издательства *И. Л. Глезарова*
Суперобложка художника *Н. Ларского*
Технический редактор *Е. Л. Темкина*
Корректоры *Н. П. Короткова, С. Ю. Цверина*

Сдано в набор 22/XII—1967 г. Подписано к печати 9/IV—1968 г.
Т-05527. Бумага 84×108¹/₁₆—3,625 бум. л. 12,18 усл. печ. л. (13,21 уч.-изд. л.).
Тираж 10500 экз. Изд. № А VI-9767. Зак. № 898. Цена 66 коп.

Подольская типография Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
г. Подольск, ул. Кирова, д. 25

ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
12	11-я снизу	нитраты	нитриты
47	5-я снизу	слоями	солями
158	8-я снизу	(см. § 4)	(см. § 14)
199	Таблица 50, голов- ка второй колонки	в мм	в мк

Зак. 898